



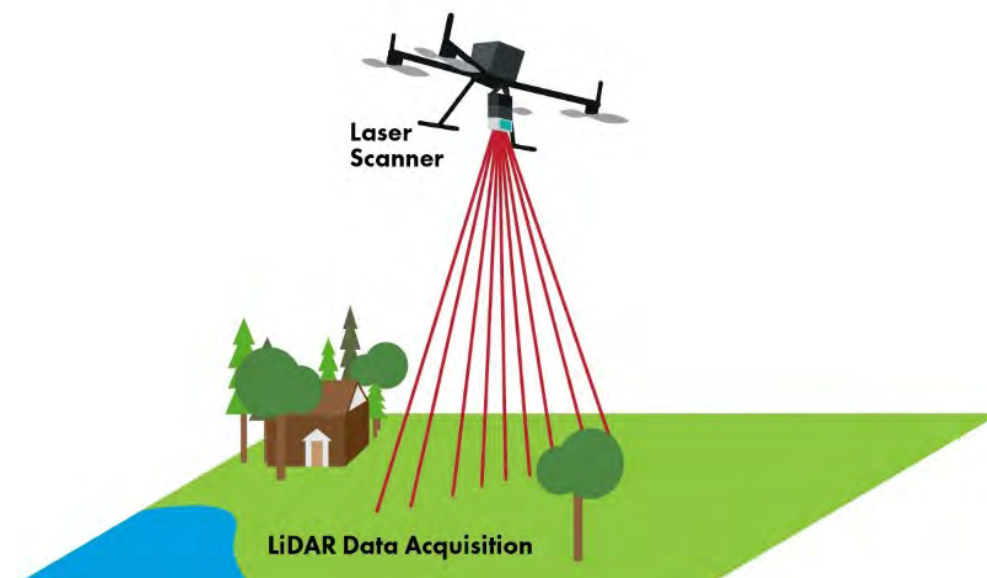
Владимир Андреевич Усольцев

доктор сельскохозяйственных наук,
Заслуженный лесовод РФ,
профессор кафедры лесной таксации
и лесоустройства УГЛТУ.
Автор 970 печатных работ, в том числе
45 монографий по проблемам оценки
и моделирования биологической
продуктивности лесов
и по культурологическим вопросам.



В. А. Усольцев

Применение лидаров в лесной таксации



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Уральский государственный лесотехнический университет»
(УГЛТУ)

В. А. Усольцев

ПРИМЕНЕНИЕ ЛИДАРОВ В ЛЕСНОЙ ТАКСАЦИИ

Монография

Электронное издание

Екатеринбург
УГЛТУ
2026

УДК 630*52:630*174.754+303.732

ББК 43

У76

Рецензенты:

кафедра лесоводства и лесопаркового хозяйства Оренбургского государственного аграрного университета (завкафедрой канд. с.-х. наук, доцент, *Г. Т. Бастаева*;

Н. С. Иванова, д-р биол. наук, ведущий научный сотрудник Ботанического сада УрО РАН

Усольцев, Владимир Андреевич.

У76

Применение лидаров в лесной таксации : монография / В. А. Усольцев ; Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Уральский государственный лесотехнический университет. – Екатеринбург : УГЛТУ, 2026. – 17 Мб. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – Текст : электронный.

ISBN 978-5-94984-978-1

В течение последних 30 лет применение лидаров в лесном деле непрерывно увеличивается, а в последние 10 лет количество публикаций, посвященных использованию беспилотных лидаров в лесной проблематике, нарастает по экспоненте. В монографии приведены достижения ученых в применении лидаров воздушного и наземного базирования в исследовании лесного полога. Отмечены достоинства и недостатки бортовых, беспилотных и наземных лидаров при их применении к дистанционному зондированию морфоструктуры и биомассы деревьев и древостоев, а также перспективы их совместного действия. По материалам двух авторских баз данных о морфоструктуре и биомассе лесообразующих видов Евразии построены регрессионные модели зависимости массообразующих и продукционных показателей деревьев и древостоев от морфометрии крон и полога, замеренной в полевых условиях, но также доступной для лидарного сканирования. Предложенные модели могут быть использованы для валидации результатов лидарного сканирования деревьев лесообразующих видов Евразии, а также при моделировании морфологии их крон и полога в целом.

Предназначено для специалистов в области разработки и управления лесными кадастрами, разработки систем лесного мониторинга и экологических программ разного уровня, а также для преподавателей, аспирантов и студентов по специальности «лесное дело».

Издается по решению редакционно-издательского совета Уральского государственного лесотехнического университета.

УДК 630*52:630*174.754+303.732

ББК 43

Автор выражает благодарность аспиранту Николаю Ивановичу Плюхе за содействие в оформлении иллюстраций.

Мин. системные требования: IBM Intel Celeron 1,3 ГГц ; Microsoft Wondows XP SP3 ; Видеосистема Intel HD Graphics ; дисковод, мышь.

Изображение на обложке взято с сайта: <https://inertiallabs.com/forestry-management-using-lidar/>

ISBN 978-5-94984-978-1

© ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет», 2026

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	5
1. Воздушная лидарная оценка морфоструктуры насаждения	15
1.1. Измерения с помощью лазерных высотомеров с узким следом	15
1.2. Измерения с помощью лазерных высотомеров с широким следом	17
1.3. Использование беспилотных лидаров (БПЛА) при сканировании морфоструктуры деревьев	25
Выводы по главе 1	27
2. Сегментация крон деревьев по данным воздушного лидарного зондирования	29
2.1. Сегментация деревьев по растровой модели высоты полога	32
2.1.1. <i>Сегментация крон по методу локальных максимумов</i>	32
2.1.2. <i>Сегментация крон по методу «растущей зоны»</i>	46
2.1.3. <i>Сегментация крон по методу морфологического водораздела</i>	59
2.2. Сегментация деревьев непосредственно по лазерному облаку точек	92
2.2.1. <i>Нисходящий (top-to-bottom) метод сегментации профиля деревьев</i>	93
2.2.2. <i>Восходящий (bottom-to-top) метод сегментации профиля деревьев</i>	104
2.3. Сравнение точности методов сегментации по растровой модели высоты полога и по лазерному облаку точек	115
2.4. Сегментация вертикального профиля деревьев полноволновыми лидарами	134
2.5. Оценка биомассы деревьев по лазерным метрикам	184
Выводы по главе 2	185
3. Наземная лидарная оценка морфоструктуры и биомассы деревьев	190
3.1. Оценка диаметров и сбег ствола дерева	190
3.2. Архитектурный анализ деревьев на языках кодирования	196
3.3. Алгоритм автоматической сегментации деревьев и крон полога	209
3.4. Идентификация древесных видов по текстуре коры	220
3.5. Оценка квалитетических показателей древесины по лазерным метрикам	227
3.6. Оценка биомассы деревьев по лазерным метрикам	234
Выводы по главе 3	241
4. Оценка морфоструктуры деревьев посредством совместного сканирования бортовым и наземными лидарами	243
4.1. Оценка морфологических показателей дерева при разновременном (не совмещенном) его сканировании бортовым и наземными лидарами	243
4.2. Оценка морфологических показателей дерева при одновременном (совмещенном) его сканировании бортовым и наземными лидарами	247

4.3. Наземная и бортовая лидарные оценки морфологии и запаса горючих материалов в кроне, необходимых при моделировании лесных пожаров	253
Выводы по главе 4	259
5. Оценка массообразующих и продукционных показателей деревьев и насаждений по морфометрии крон и полога, доступной для лидарного сканирования (по материалам авторских баз данных)	262
5.1. Оценка массообразующих показателей деревьев и насаждений по морфометрии крон и полога	262
5.1.1. <i>Взаимосвязь диаметра ствола на высоте груди и диаметра кроны</i>	263
5.1.2. <i>Модели для оценки диаметра стволов деревьев и древостоев по морфометрии крон и полога</i>	265
5.1.3. <i>Модели для оценки возраста деревьев и древостоев лесообразующих видов Евразии по морфометрии крон и полога</i>	266
5.1.4. <i>Оценка сбежистости стволов деревьев лесообразующих видов Евразии для бортового лазерного зондирования</i>	271
5.2. Оценка биопродукционных показателей деревьев и насаждений по морфометрии крон и полога	274
5.2.1. <i>Аллометрические модели для оценки биомассы деревьев лесообразующих видов по диаметру кроны в связи с использованием БПЛА</i>	274
5.2.2. <i>Аллометрические модели для оценки биомассы деревьев лесообразующих видов по диаметру кроны и высоте дерева</i>	276
5.2.3. <i>Регрессионные модели для оценки фитомассы древостоев на основе бортового лидара</i>	281
5.2.4. <i>Аллометрические модели для оценки биомассы отмерших ветвей растущих деревьев в естественных сосняках и культурах по морфометрии крон, доступной для лидарного сканирования</i>	286
5.2.5. <i>Прогнозирование радиального прироста стволов в естественных сосняках и культурах по морфометрии крон, доступной для лидарного сканирования</i>	288
Выводы по главе 5	292
6. Оценка морфометрических показателей кроны по данным полевой таксации деревьев (по материалам авторской базы данных)	295
6.1. Моделирование высоты крепления кроны по данным полевой таксации	295
6.2. Моделирование показателей формы кроны по данным полевой таксации	300
Выводы по главе 6	303
Заключение	306
Библиографический список	307

ВВЕДЕНИЕ

Леса, представляющие собой основной тип наземных экосистем, играют незаменимую роль в поддержании глобальной климатической системы, замедлении роста концентрации парниковых газов и достижении углеродной нейтральности. Точное получение информации о свойствах отдельных деревьев (порода деревьев, высота дерева, диаметр на высоте груди, ширина кроны и т. д.) важно для понимания текущего состояния и изменений в лесных ресурсах и экологических преимуществах лесов, а также для обеспечения эффективной защиты и устойчивого управления лесами [Performance and sensitivity of individual tree segmentation methods for UAV-LiDAR in multiple forest types, 2022].

Для устойчивого лесопользования требуется большой объем информации в виде таких параметров, как видовой состав, высота полога, запас и объемный прирост древесины. Эти параметры являются основой для инвентаризации лесов. В настоящее время большинство из этих переменных оцениваются путем измерений на пробных площадях посредством традиционной наземной таксации, что является дорогостоящим и трудоемким процессом, но это единственный метод получения точных данных для инвентаризации лесов на небольших площадях. В последние годы прилагаются большие усилия для снижения затрат за счет разработки систем инвентаризации, основанных на дистанционном зондировании [Fusion of airborne LiDAR and digital photography data for tree crowns segmentation and measurement, 2015].

При инвентаризации лесов использовались как спутниковые снимки, так и аэрофотоснимки, позволяющие получать довольно надежные характеристики лесов на участках площадью более 100 га. По аэрофотоснимкам высокого разрешения определялись таксационные характеристики древостоев на площади 1–3 га, однако их получение было довольно трудоемким и весьма чувствительным к систематическим ошибкам [A segmentation based method to retrieve stem volume estimates from 3-D tree height models produced by laser scanners, 2001]. Быстрое развитие компьютерных технологий позволило внедрить мощный процесс полуавтоматической инвентаризации лесов, основанный на определении границ кроны отдельных деревьев. Полуавтоматическая инвентаризация является экономически эффективной и может использоваться для многих целей, особенно в сочетании с полевыми измерениями. Тем не менее, хотя методы полуавтоматической инвентаризации были разработаны в основном с использованием аэрофотоснимков и видеоизображений, получаемая точность была недостаточной [Dralle, Rudemo, 1996; Brandtberg, Walter, 1998; Determination of the spatial distribution of trees from digital aerial photographs, 1998].

Традиционные методы описания трехмерной структуры лесных насаждений и фиксации индивидуальных характеристик деревьев включают полевую таксацию и дешифрирование аэрофотоснимков, однако оба метода имеют ограничения, которые можно снять с помощью лидарного или радарного зондирования [3D Forest structure analysis from optical and LIDAR data, 2006; Данилин, Медведев, 2005; Danilin, Medvedev, 2011]. Полевая таксация может быть трудоемкой, отнимающей много времени и ограниченной по причине пространственной доступности [Adaptive clustering of airborne LiDAR data to segment individual tree crowns in managed pine forests, 2010], а оптическая аэрофотосъемка напрямую не дает 3D-информации о структуре леса [Isolating individual trees in a savanna woodland using small footprint lidar data, 2006]. Более того, результаты исследования могут неточно отражать текущее состояние лесных ресурсов на большой территории [Performance and sensitivity of individual tree segmentation methods for UAV-LiDAR in multiple forest types, 2022].

Традиционный анализ лесных ресурсов позволяет исследовать отдельные деревья на пробной площади с помощью метода отбора проб, который не только трудоемок, но и в определенной степени разрушителен для исследуемой растительности. Коэффициент отражения в каждой полосе изображения оптического дистанционного зондирования может указывать на содержание хлорофилла и состояние древостоя, и эти характеристики тесно связаны с параметрами насаждений [Ke, Quackenbush, 2011]. Однако в практическом применении методы, основанные на изображениях, ограничены такими факторами, как сложность типов насаждений, наличие облачности, требуемое время съемки, пространственное разрешение снимков и насыщенность данными [A survey of remote sensing-based aboveground biomass estimation methods in forest ecosystems, 2014; ISS observations offer insights into plant function, 2017]. Радарные изображения в некоторой степени решают проблему облачности при дистанционном зондировании, но в насаждениях с высокой плотностью полога и сложной вертикальной структурой различия в откликах между различными полосами могут быть нечеткими [SAR-based estimation of above-ground biomass and its changes in tropical forests of Kalimantan using L-and C-Band, 2018].

К настоящему времени горизонтальная структура лесных насаждений изучена лучше, чем вертикальная структура полога, представляющая важную экологическую характеристику [Characterizing 3D vegetation structure from space: Mission requirements, 2011]. Ярусы растительного покрова (верхний ярус, подлесок и напочвенный покров) различаются по своей плотности и размерам. Более точная оценка вертикального профиля полога с высоким пространственным разрешением полезна для многих применений в лесном хозяйстве [Фарбер и др., 2003; Лазерное сканирование и цифровая аэро-съемка – новая перспектива лесозоологического мониторинга и таксации

леса, 2005; Данилин и др., 2005; Ares, Neill, Puettmann, 2010; Данилин, Целитан, 2024], исследованиях углеродного цикла [Moore, Van Miegroet, Nichol, 2007] и экологии [Brokaw, Lent, 2000; Camprodon, Brotons, 2006]. Например, лесоводы используют модели горючих материалов для прогнозирования поведения низовых пожаров [Pyne, Andrews, Laven, 1996], которые требуют информации о толщине, влажности и плотности растительности нижних ярусов [Sandberg, Ottmar, Cushon, 2001; Finney, 2004; Andrews, Bevens, Seli, 2005].

Лидар представляет метод оптического дистанционного зондирования, который использует ультрафиолетовый, видимый или ближний инфракрасный свет для измерения расстояния до целевых объектов или их свойств [Jensen, 2007]. Он является более совершенным, чем другие традиционные методы дистанционного зондирования, поскольку позволяет получать трехмерные изображения удаленных объектов на основе импульсов, отраженных от цели [Jensen, 2007]. Трехмерные изображения позволяют изучать стереоструктуры и топологические взаимосвязи объектов, поэтому лидар широко применяется в исследованиях лесов [Dubayah, Drake, 2000; LiDAR remote sensing of forest structure, 2003].

В зависимости от различных используемых платформ применяются следующие методы лидарного сканирования: космическое, бортовое, беспилотное и наземное [Capturing tree crown formation through implicit surface reconstruction using airborne lidar data, 2009; New opportunities for forest remote sensing through ultra-high-density drone lidar, 2019]. Лазерная альтиметрическая система *Geoscience* (GLAS) – это лидарная система, работающая в космосе. GLAS является важной частью программы НАСА по изучению Земли, проводимой на спутнике ICESat с 12 января 2003 года [Afzal et al., 2007]. Этот прибор оснащен тремя лазерами, каждый из которых имеет лидарный канал с длиной волны 1 064 нм для измерения высоты поверхности и плотности облаков, а также лидарный канал с длиной волны 532 нм для регистрации вертикального распределения облаков и аэрозолей. Три лазера использовались последовательно по одному на протяжении всей миссии. Режим миссии включал в себя съемки продолжительностью от 33 до 56 дней, которые проводились несколько раз в год. Основные цели прибора GLAS: измерение высоты ледяного покрова, а также обнаружение и измерение облаков, вертикальных профилей атмосферного аэрозоля, высоты рельефа, растительного покрова и толщины морского льда. В 2019 г. были запущены еще два космических лидарных сканера – GEDI и ICESat-2, – в целях которых была оценка растительной биомассы. Спутниковые лидарные данные позволяют проводить оценку биомассы в глобальном масштабе, и с их помощью удастся измерять морфологические признаки лесных сообществ, по которым далее можно оценить наземную биомассу [Vazirabad, Karslioglu, 2011].

В предлагаемом аналитическом обзоре основное внимание будет сосредоточено на бортовом, беспилотном и наземном лидарном сканировании.

Лидар обеспечивает измерение расстояния между платформой дистанционного зондирования и поверхностью с географической привязкой. Расстояние до объекта рассчитывается путем измерения интервала времени между передачей лазерного импульса и обнаружением отраженного сигнала [Wehr, Lohr, 1999; Mallet, Bretar, 2009]. Этот подход обеспечивает достаточную проникающую способность в фоновом режиме и отличается как высоким разрешением по дальности, так и отличной помехозащищенностью [Agent-based region growing for individual tree crown delineation from airborne laser scanning (ALS) data, 2015; The GEDI simulator: a large-footprint waveform lidar simulator for calibration and validation of space borne missions, 2018]. Лидар, предоставляющий информацию о горизонтальной и вертикальной структуре лесного полога, продемонстрировал многообещающую способность оценивать структуру лесов и связанные с ней параметры, такие как высота полога, размер кроны и биомасса [Lidar remote sensing for ecosystem studies, 2002; Above-ground biomass estimation in closed canopy neotropical forests using lidar remote sensing: factors affecting the generality of relationships, 2003; LiDAR remote sensing of forest structure, 2003; Characterizing vertical forest structure using small-footprint airborne LiDAR, 2003; Ковязин и др., 2020]. Точная оценка биомассы в лесах значительно помогает количественно оценить углеродный цикл в наземной экосистеме, поскольку лес служит основным резервуаром углерода на суше [Zhao, Popescu, Nelson, 2009]. Кроме того, путем получения точных данных о биомассе лесов можно разработать перспективные стратегии лесопользования [Holmgren, 2004].

В зависимости от характера цели, одиночный импульсный луч может вызвать одно или несколько отраженных эхо-сигналов. Лазерный луч, проникающий вглубь лесного полога, дает картину неструктурированного трехмерного облака точек, представляющего собой дискретную модель объекта. В последнее время появилась необходимость в данных дистанционного зондирования отдельных деревьев, в частности их крон. Во-первых, предпринимаются усилия по разработке методов объективной оценки состояния деревьев на основе массы листьев и плотности кроны, которые являются ключевыми параметрами состояния насаждений [Remote sensing of foliar mass and chlorophyll as indicators of forest health: Preliminary results from a project in Norway, 2005]. Эти усилия в значительной степени основаны на данных о кронах отдельных деревьев. Во-вторых, в целях лесного планирования все большее внимание уделяется крупномасштабным данным по отдельным деревьям, что подчеркивает ценность биофизических свойств, связанных с качеством древесины [Næsset, Økland, 2002].

В самом начале использования лазеров при зондировании лесного полога уже были выявлены по крайней мере два их недостатка: ограниченная способность проникновения и обнаружения земли сквозь полог и довольно

низкая вероятность обнаружения верхушечных побегов деревьев. Однако ситуация меняется, когда увеличивается количество импульсов, передаваемых лазерным сканером. В лесных массивах бореальной лесной зоны между кронами деревьев существуют просветы, вследствие чего более 30 % данных о первом импульсе могут отражаться непосредственно от земли без какого-либо взаимодействия с кронами деревьев [A segmentation based method to retrieve stem volume estimates from 3-D tree height models produced by laser scanners, 2001]. Увеличивая количество импульсов, можно получать сигналы с каждого отдельного дерева, а также из промежутков между деревьями. Это позволяет детально исследовать лесные массивы и создавать трехмерные модели высоты деревьев. Анализируя трехмерную модель высоты деревьев с помощью методов визуализации изображений, можно определить местоположение и высоту отдельных деревьев, размер кроны и на основе этих данных узнать диаметр ствола, густоту, сумму площадей сечений, запас и биомассу [A segmentation based method to retrieve stem volume estimates from 3-D tree height models produced by laser scanners, 2001].

Современные бортовые лазерные сканерные системы позволяют получать наборы данных об облаках точек высокой плотности с точной географической привязкой. Наряду с быстрым развитием технологий в этой области в последние годы появились новые методы получения ключевых данных на уровне деревьев. Разработанные методы позволили успешно получить высококачественные данные о местоположении и высоте деревьев, а также довольно точные оценки диаметра ствола, размера кроны и видовой принадлежности деревьев [A segmentation based method to retrieve stem volume estimates from 3-D tree height models produced by laser scanners, 2001; Persson, Holmgren, Södermann, 2002; Holmgren, Persson, 2004; LIDAR-based geometric reconstruction of boreal type forest stands at single tree level for forest and wildland fire management, 2004; Solberg, Naesset, Bollandsas, 2006; Estimation of tree diameter at breast height (DBH) and biomass from allometric models using LiDAR data: a case of the Lake Broadwater Forest in Southeast Queensland, Australia, 2025].

Бортовые лидары дают возможность анализировать насаждения в трехмерном формате на больших площадях. Они применяются к природным ландшафтам для определения высоты рельефа [Airborne laser topographic mapping results, 1984; Automated measurements of terrain reflection and height variations using and airborne infrared laser system, 1985; Airborne lidar for profiling of surface topography, 1991; Ritchie, 1995; Kraus, Pfeifer, 1998; Bretar, Chehata, 2010], классификации растительного покрова [Antonarakis, Richards, Brasington, 2008; Invasive plants transform the three-dimensional structure of rain forests, 2008; Prediction of species specific forest inventory attributes using a nonparametric semi-individual tree crown approach based on fused airborne laser scanning and multispectral data, 2010; Review of methods of small-footprint airborne laser scanning for extracting forest inventory data in boreal forests, 2008; Yoon, Shin, Lee, 2008], оценки среды обитания диких животных [The use of

airborne lidar to assess avian species diversity, density, and occurrence in a pine/aspen forest, 2008; Mapping snags and understory shrubs for a LiDAR-based assessment of wildlife habitat suitability, 2009], биомассы [Nelson, Krabill, Maclean, 1984, Nelson, Krabill, Tonelli, 1988b; Zhao, Popescu, Nelson, 2009; High-resolution forest carbon stocks and emissions in the Amazon, 2010; Estimating biomass carbon stocks for a Mediterranean forest in central Spain using LiDAR height and intensity data, 2010] и лесных горючих материалов [Modeling airborne laser scanning data for the spatial generation of critical forest parameters in fire behavior modeling, 2003; Andersen, McGaughey R. J., Reutebuch, 2005; Accuracy of large-scale canopy heights derived from LiDAR data under operational constraints in a complex alpine environment, 2006; Mapping surface fuel models using lidar and multispectral data fusion for fire behavior, 2008], а также относительной сомкнутости полога и запаса товарной древесины [Maclean, Krabill, 1986]. Предыдущие исследования, в которых основное внимание уделялось оценке характеристик лесных насаждений с помощью сканирующих лазеров, использовали данные с относительно большим лазерным следом от 5 до 25 м [Laser altimetry waveform measurement of vegetation canopy structure, 1994; Lidar remote sensing of forest canopy structure and related biophysical parameters at the H. J. Andrews experimental forest, Oregon, USA, 1997; Lidar remote sensing of the canopy structure and biophysical properties of Douglas-fir western hemlock forests, 1999; Surface lidar remote sensing of basal area and biomass in deciduous forests of eastern Maryland, USA, 1999; Analysis of laser altimeter waveforms for forested ecosystems of central Florida, 1997; Blair, Rabine, Hofton, 1999; Use of large-footprint scanning airborne lidar to estimate forest stand characteristics in the Western Cascades of Oregon, 1999] или с узким следом, но только с возвратными импульсами от верхушек деревьев и от земли [Næsset, 1997a, b; Magnussen, Boudewyn, 1998; Magnussen, Eggermon, LaRiccia 1999]. Был также применен компактный лидар, способный регистрировать все изменяющееся во времени распределение возвращаемой энергии импульса или формы волны для измерения высоты деревьев и запаса древостоя [Nilsson, 1996].

Лидар стал многообещающим инструментом в лесном деле для анализа структуры лесных насаждений [Dubayah, Drake, 2000; Naeset, Bjercknes, 2001; LiDAR remote sensing of forest structure, 2003; Modeling airborne laser scanning data for the spatial generation of critical forest parameters in fire behavior modeling, 2003; Popescu, Wynne, 2004]. Эти усилия по количественной оценке лесного полога в настоящее время способствуют совершенствованию моделирования пожаров [Mapping surface fuel models using lidar and multispectral data fusion for fire behavior, 2008; Wing, Eklund, Sessions, 2010] и управления лесами [Wynne, 2006; The role of LiDAR in sustainable forest management, 2008]. Благодаря своей способности генерировать трехмерные (3D) данные с высоким пространственным разрешением и точностью лидарная технология все чаще используется в экологии [Lidar remote sensing for ecosystem studies, 2002; Gaveau, Hill, 2003; Hopkinson et al., 2004; Mapping

snowpack depth beneath forest canopies using airborne lidar, 2004b], геоморфологии [Analysis of LiDAR-derived topographic information for characterizing and differentiating landslide morphology and activity, 2006], сейсмологии [Effects of realistic surface topography on seismic ground motion in the Yangminshan region of Taiwan based upon the spectral-element method and LiDAR DTM, 2009] и дистанционном зондировании среды [Detection and analysis of individual leaf-off tree crowns in small footprint, high sampling density lidar data from the eastern deciduous forest in North America, 2003; Медведев, Данилин, Мельников, 2007]. Лидар широко и успешно применяется в исследованиях лесного полога [Naesset, Bjerknes, 2001; St-Onge, Achaichia, 2001; Popescu, Wynne, Nelson, 2002; LiDAR remote sensing of forest structure, 2003; Popescu, Wynne, Nelson, 2003; Quantifying forest above ground carbon content using LiDAR remote sensing, 2004; Popescu, Wynne, 2004; Generation of crown bulk density for *Pinus sylvestris* L. from lidar, 2004; Suárez et al., 2005; Popescu, 2007; A lidar-based hierarchical approach for assessing MODIS fPAR, 2008; Estimation of carbon stocks in New Zealand planted forests using airborne scanning lidar, 2008; A comparison of individual tree and forest plot height derived from lidar and InSAR, 2009] и перспективен для картографирования отдельных деревьев в сложных и смешанных насаждениях [Detection and analysis of individual leaf-off tree crowns in small footprint, high sampling density lidar data from the eastern deciduous forest in North America, 2003; Popescu, Wynne, 2004; Isolating individual trees in a savanna woodland using small footprint lidar data, 2006; Koch, Heyder, Weinacker, 2006; Estimating basal area and stem volume for individual trees from lidar data, 2007]. Успешная идентификация и определение характеристик отдельных деревьев имеют решающее значение в лесном деле, особенно для моделирования роста отдельных деревьев [Landscape-scale parameterization of a tree-level forest growth model: a k-nearest neighbor imputation approach incorporating LiDAR data, 2010; Vepakomma, St-Onge, Kneeshaw, 2011], увязки с биометрическими моделями [Modeling radiation and photosynthesis of a heterogeneous savanna woodland landscape with a hierarchy of model complexities, 2008] и более точными показателями биомассы в лесах [Popescu, Wynne, Nelson, 2003]. Тем не менее для точного моделирования лесов по-прежнему требуются дальнейшие усовершенствования.

В последние годы быстро расширяется использование бортовых лидарных технологий для измерения биофизических характеристик лесов. Помимо характеристики рельефа местности, лидарные данные предоставляют новую информацию о поверхности кроны и таких параметрах растительности, как высота, густота стволов и размеры кроны, что имеет решающее значение для экологического моделирования. Данные бортового лидара сочетают в себе как высоту поверхности, так и точные контурные координаты, а алгоритмы обработки позволяют идентифицировать отдельные деревья или группы деревьев для извлечения различных результатов измерений

из их трехмерного формата [Popescu, Wynne, Nelson, 2002]. Лазерное бортовое сканирование явилось новой технологией, благодаря которой технический потенциал открывает возможности для новых применений [Flood, Gutelius, 1997; Ackermann, 1999; Данилин, Сведа, 2001; Danilin, Medvedev, Sweda, 2001; Realistic 3D-modeling of forest growth with natural effect, 2010]. Однако обработка лидарных данных воздушного сканирования отстает от уровня его технического инструментария [Axelsson, 1999].

Разбиение горизонтальной проекции лесного полога на составляющие его проекции крон связано с процедурой сегментации (оконтуривания крон). Сегментация изображения представляет область компьютерного зрения, включающую в себя разбиение изображения на множество составляющих его областей [Гонсалес, Вудс, 2005]. Первые подходы к сегментации отдельных деревьев и вычленению их из полога на основе лидарных данных показали многообещающие результаты, особенно в хвойных насаждениях [Persson, Holmgren, Södermann, 2002; Detection and analysis of individual leaf-off tree crowns in small footprint, high sampling density lidar data from the eastern deciduous forest in North America, 2003; Popescu, Wynne, Scrivani, 2004; Popescu, Wynne, 2004].

Было разработано несколько методов оценки надземной биомассы в лесах, основанных на сегментации отдельных деревьев [Bortolot, Wynne, 2005; Popescu, 2007; Zhao, Popescu, Nelson, 2009; Edson, Wing, 2011]. Сегментация деревьев имеет большое значение для лесного хозяйства [Isolating individual trees in a savanna woodland using small footprint lidar data, 2006; Koch, Heyder, Weinacker, 2006; Estimating basal area and stem volume for individual trees from lidar data, 2007]. После точного сегментирования можно получить структурные характеристики дерева, такие как высота дерева, диаметр кроны, высота основания кроны, ее площадь сечения, диаметр на высоте груди (DBH), объем древесины, биомасса и видовая принадлежность [Данилин, Красиков, 2001; Danilin, Medvedev, 2004; Danilin, Farber, Medvedev, 2004; Estimating basal area and stem volume for individual trees from lidar data, 2007; Single-tree forest inventory using lidar and aerial images for 3D treetop positioning, species recognition, height and crown width estimation, 2007; Predicting individual tree attributes from airborne laser point clouds based on the random forests technique, 2011].

Сегментация отдельных деревьев по данным дистанционного зондирования имеет множество применений в исследованиях лесов [Characterizing habitats associated with fisher den structures in the Southern Sierra Nevada, California using discrete return lidar, 2012]. Например, информация о структуре дерева (высоте дерева и размере кроны) может быть получена напрямую с высокой точностью сегментации [Solberg, Naesset, Bollandsas, 2006; A new method for segmenting individual trees from the lidar point cloud, 2012; Fusion of airborne LiDAR and digital photography data for tree crowns segmentation and measurement, 2015; Tkacheva, Danilin, 2017]. Другие атрибуты, такие как биомасса и накопление углерода, также могут быть получены с помощью

эмпирических уравнений, основанных на структурных показателях дерева после его сегментации [Isolating individual trees in a savanna woodland using small footprint lidar data, 2006; Zhao, Popescu, Nelson, 2009]. Кроме того, используя сегментацию деревьев, можно без трудоемких работ провести инвентаризацию лесов, которая имеет большое значение для управления лесным хозяйством [Using individual tree crown approach for forest volume extraction with aerial images and laser point clouds, 2005].

Было разработано несколько методов оконтуривания крон деревьев из облака лидарных данных. В большинстве из них деревья выделяются с помощью растровой модели высоты крон (CHM), т. е. на растровом изображении, полученном из нормализованного лидарного облака точек [A segmentation based method to retrieve stem volume estimates from 3-D tree height models produced by laser scanners, 2001; HIGH-SCAN: The first European-wide attempt to derive single tree information from laser scanner data, 2001; Popescu, Wynne, Nelson, 2003; Detection and analysis of individual leaf-off tree crowns in small footprint, high sampling density lidar data from the eastern deciduous forest in North America, 2003; Estimation of timber volume and stem density based on scanning laser altimetry and expected tree size distribution functions, 2004]. Вершины деревьев обычно идентифицируются с пиками в модели высоты крон, обнаруженными с помощью алгоритма фильтрации локальных максимумов. Однако на результат выделения деревьев в растровых методах сильно влияют пространственное разрешение названной модели и коэффициент сглаживания, которые необходимы для снижения шума и выделения границ кроны. Когда сегментация выполняется по модели высоты крон, на результат влияет интерполяция, осуществляемая в процессе растеризации. Более того, в сложных насаждениях, характеризующихся изменчивыми размерами крон, невозможно найти оптимальный коэффициент сглаживания [Koch, Heyder, Weinacker, 2006]. Не существует также надежных правил для выбора пространственного разрешения модели высоты крон, которое зависит от типа программ и свойств набора данных [Hengl, 2006].

Выявленные кроны сегментируются по верхушечным побегам деревьев с использованием принципа «растущей зоны» (*region growth*) [A segmentation based method to retrieve stem volume estimates from 3-D tree height models produced by laser scanners, 2001; Tiede, Hochleitner, Blaschke, 2005; Solberg, Naesset, Bollandas, 2006], алгоритмов морфологического водораздела (*watershed*) или заливки [Pyysalo, Hyypä, 2002; Koch, Heyder, Weinacker, 2006; Detection of individual trees and estimation of tree height using LiDAR data, 2007; Predicting individual tree attributes from airborne laser point clouds based on the random forests technique, 2011; Heinzl, Weinacker, Koch, 2011; Ene, Naesset, Gobakken, 2012], а также методов, основанных на подборе шаблона (*template matching*) [Persson, Holmgren, Södermann, 2002; Prediction of stem attributes by combining airborne laser scanning and measurements from harvesters, 2012; Bayesian approach to tree detection based on airborne laser

scanning data, 2014]. В сложных многоярусных насаждениях из-за сглаживания комбинации групп деревьев могут быть сегментированы в одной кроне, что снижает точность оценок [Effects of individual tree detection error sources on forest management planning calculations, 2011]. Чтобы решить эту проблему, результаты сегментации с использованием принципа «растущей зоны» ограничиваются введением правил по форме крон [Solberg, Naesset, Bollandas, 2006], а в алгоритме определения по морфологическому водоразделу предварительно оценивается размер кроны [Heinzel, Weinacker, Koch, 2011]. При сравнении результатов сегментации, полученных как по модели высоты крон, так и по лидарному пространственному облаку точек (PCS), оказалось, что наибольшая точность достигается в домене облаков точек [Wallace, Lucieer, Watson, 2014].

Для более точного моделирования лесов и управления ими по-прежнему требуется дальнейшее уточнение методик. Поскольку деревья являются наиболее важным компонентом леса, успешная сегментация деревьев имеет решающее значение в лесном деле. В связи с этим необходимо прикладывать больше усилий в разработке методов сегментации деревьев для 3D-лидарных облаков точек [Reitberger, Krzystek, Stilla, 2008a, 2008c; A new method for segmenting individual trees from the lidar point cloud, 2012].

В последние годы количество публикаций, посвященных использованию беспилотных лидаров (дронов) в лесной проблематике, нарастает по экспоненте. Полет дрона позволяет охватить большие пространства и выполнять это за меньшее количество времени и с гораздо меньшими финансовыми затратами. Что касается точности данных, то погрешность при создании 3D-моделей из облаков точек у наземных датчиков составляет ± 5 см, а датчики для БПЛА обеспечивают получение данных с погрешностью $\pm 1,5$ – $2,0$ см. Данные облака точек с БПЛА могут быть собраны в 3D-модели с помощью программного обеспечения *DJI Terra* [Willoughby, 2023].

Возможности и результаты лазерного профилирования лесного полога, а также его профилирования по наведенной лазером флуоресценции и оценки структуры крон по степени деполяризации лазерного сигнала на начальный период с 1960-х до 1990-х гг. были проанализированы ранее [Усольцев, 1998]. Позднее [Усольцев, 2014] были показаны результаты лазерного зондирования лесного полога отечественными исследователями, в частности И. М. Данилиным с соавторами [Данилин, 2003; Данилин, Медведев, Мельников, 2005; Данилин, Фаворская, 2011]. Дальнейшее изложение материала по теме «Применение лидаров в лесной таксации» будет сосредоточено на конкретных примерах продвинутых исследований в их развитии примерно с начала 2000-х гг. по настоящее время.

ГЛАВА 1. ВОЗДУШНАЯ ЛИДАРНАЯ ОЦЕНКА МОРФОСТРУКТУРЫ И БИОМАССЫ НАСАЖДЕНИЯ

Существуют два основных пространственных масштаба для определения параметров насаждений по данным воздушного лазерного сканирования: в масштабе насаждения биофизические переменные усредняются по площади, охватывающей совокупность деревьев (например, средняя высота полога, биомасса, густота деревьев, индекс листовой поверхности), в то время как в индивидуальном масштабе они оцениваются в конкретном насаждении на уровне отдельных деревьев (например, высота дерева, диаметр кроны, высота крепления кроны) [3-D mapping of a multi-layered Mediterranean forest using ALS data, 2012]. Различают профилирование лесного полога с помощью лазерных высотомеров с узким и широким следом.

1.1. Измерения с помощью лазерных высотомеров с узким следом

Лидар представляет активный метод дистанционного зондирования с использованием лазерного излучения. Лидарные системы измеряют время прохождения импульса лазерной энергии (для изучения растительности обычно с длиной волны, близкой к инфракрасной) между датчиком и целью. Этот падающий импульс энергии взаимодействует с древесным пологом (листьями и ветвями) и поверхностью земли и отражается обратно к датчику. Измеряется время прохождения импульса от момента инициирования до его возврата к датчику, которое определяет расстояние от прибора до объекта (лазерная альтиметрия).

С 1980-х гг. было проведено несколько экспериментов по определению высоты и запаса насаждений с помощью различных бортовых лазерных профилирующих и лидарных систем [Aldred, Bonnor, 1985; Maclean, Krabill, 1986; Nelson, Swift, Krabill, 1988]. Путем лазерного профилирования получали такие массообразующие показатели, как высота полога [Nelson, Swift, Krabill, 1988] и его плотность. Последнюю рассчитывали как количество импульсов, отраженных от полога, деленное на общее количество переданных импульсов [Nilsson, 1996]. Было показано, что запас древесины связан с площадью вертикального сечения профиля древесного покрова, полученной с помощью аэрофотоснимков [Hugershoff, 1939; Maclean, Martin, 1984]. Затем для оценки запаса древесины использовали площадь вертикального сечения профиля кроны, полученную с помощью лазерного профилирования [Maclean, Krabill, 1986; Nelson, Swift, Krabill, 1988; Naesset, 1997b].

В скандинавских хвойных насаждениях в возрасте от 31 до 145 лет было выполнено профилирование лесного полога с шириной лазерного следа от 12,8 до 16,5 см, по результатам которого рассчитаны запасы древесины, сопоставленные с запасами, полученными традиционной наземной таксацией [Naesset, 1997b]. Запас рассчитан двухфакторной аллометрической зависимостью от высоты и плотности полога с коэффициентами детерминации 0,456–0,472 в сосняках и 0,838–0,887 – в ельниках. Примерно в том же диапазоне (0,52–0,78) были коэффициенты детерминации при оценке запаса по данным лазерного профилирования других исследователей [Maclean, Krabill, 1986; Nelson, Swift, Krabill, 1988; Nilsson, 1996]. Более высокие показатели детерминации в ельниках авторы объяснили меньшим размером лазерного следа (12,8 см), по сравнению с сосняками (16,5 см), мотивируя тем, что плотность полога лучше регистрируется лидаром с узким размером следа [Naesset, 1997b], хотя различие морфоструктуры полога двух разных пород тоже могло иметь значение. Сделан вывод о перспективности лазерного профилирования с целью оценки запаса насаждений, точность которого сопоставима с результатами фотограмметрии, однако с целью повышения эффективности лазерного профилирования насаждений лазерные сканеры нуждались в дополнительной калибровке [Naesset, 1997b].

Измерения с помощью лазерных высотомеров с узким следом были использованы для оценки высоты древесного полога [Magnussen, Boudewyn, 1998; Naesset, 1997a; Nelson, Swift, Krabill, 1988; Nilsson, 1996], процента проективного покрытия полога [Weltz, Ritchie, Fox, 1994], запаса стволовой древесины [Naesset, 1997b] и надземной биомассы [Nelson, Swift, Krabill, 1988]. Однако подобные датчики с высоким разрешением, как правило, давали стабильные отражения от земли только в относительно открытом лесном пологе [Weishampel, Ranson, Harding, 1996], что затрудняло оценку надземной биомассы в сомкнутых многоярусных насаждениях, в частности ввиду частого отсутствия совпадающих полевых и лазерных данных [Nelson, 1997; Nelson, Oderwald, Gregoire, 1997; Nelson, Gregoire, Oderwald, 1998].

В подобных экспериментах лазеры обычно работали в режиме профилирования, т. е. регистрировалась только одна строка по маршруту полета непосредственно под самолетом. Для крупномасштабного практического применения лазерных данных метод профилирования позволил бы получить довольно ограниченную выборку [Naesset, 1997b]. Лидарные датчики с узким следом могут оказаться неоптимальными для картографирования структуры леса по нескольким причинам. Во-первых, след небольшого диаметра часто не попадает на верхушки деревьев [Nelson, 1997]. Во-вторых, из-за его небольшого размера для картографирования больших площадей требуется длительное полетное время. Наконец, с системами, которые реги-

стрируют только первый и/или последний возврат импульса, трудно определить, прошел ли конкретный импульс сквозь полог до самой земли. В насаждениях с высоким пологом может отражаться от земли только один из нескольких тысяч импульсов [Blair, Hofton, 1999]. Если рельеф земли неизвестен, точное определение высоты древесного полога невозможно. Большинство бортовых лидарных систем имели низкую высоту полета, небольшой (5–30 см) диаметр следа и высокую частоту пульсаций (1000–10000 Гц). Кроме того, большинство лидарных систем регистрировали расстояние до самой высокой и/или самой низкой отражающей поверхности в пределах следа и вместо полной картины давали множество лазерных отражений, расположенных в непосредственной близости друг от друга [Estimation of tropical forest structural characteristics using large-footprint lidar, 2002].

1.2. Измерения с помощью лазерных высотомеров с широким следом

Лидарные системы с широким следом (*large-footprint*) [Blair, Rabine, Hofton, 1999; Optimization of an airborne laser altimeter for remote sensing of vegetation and tree canopies, 1994] обладают рядом преимуществ, которые помогают избежать этих проблем. Во-первых, благодаря увеличению размера следа до диаметра крон, образующих полог деревьев (10–25 м), лазерные импульсы достигают земли даже в густых насаждениях [Weishampel, Ranson, Harding, 1996]. Во-вторых, увеличенный размер следа позволяет избежать ошибок, присущих лидарам с узким следом, которые часто не регистрируют верхушечные побеги деревьев. В-третьих, лидарные системы с широким следом работают на больших высотах и позволяют получать широкий спектр изображений, что снижает затраты на картографирование больших площадей [Blair, Rabine, Hofton, 1999]. Наконец, названные системы оцифровывают весь обратный сигнал (или полную форму волны), предоставляя таким образом данные о вертикальном распределении ярусов полога от верхней его части до земли [Estimation of tropical forest structural characteristics using large-footprint lidar, 2002].

Концептуальная основа получения отражений посредством лидара с широким следом показана на рис. 1. Время прохождения отраженной энергии до сенсора полностью оцифровывается и преобразуется в единицы расстояния (с учетом скорости света). Первый показатель возвращенного импульса используется для определения расстояния до вершин деревьев, а последний – для определения расстояния до земли, разность между которыми дает высоту полога, полученную с помощью лидара. Форма обратного сигнала показывает вертикальное распределение структурных элементов

(т. е. листьев и ветвей), перехваченных импульсами. На любой конкретной высоте амплитуда сигнала определяет энергию возвращенного импульса. Форма сигнала дает только видимый профиль кроны (листьев и ветвей) из-за ослабления луча, проходящего через крону, и должна быть скорректирована для приближения к истинному профилю полога [Surface lidar remote sensing of basal area and biomass in deciduous forests of eastern Maryland, USA, 1999; Ni-Meister, Jupp, Dubayah, 2002].

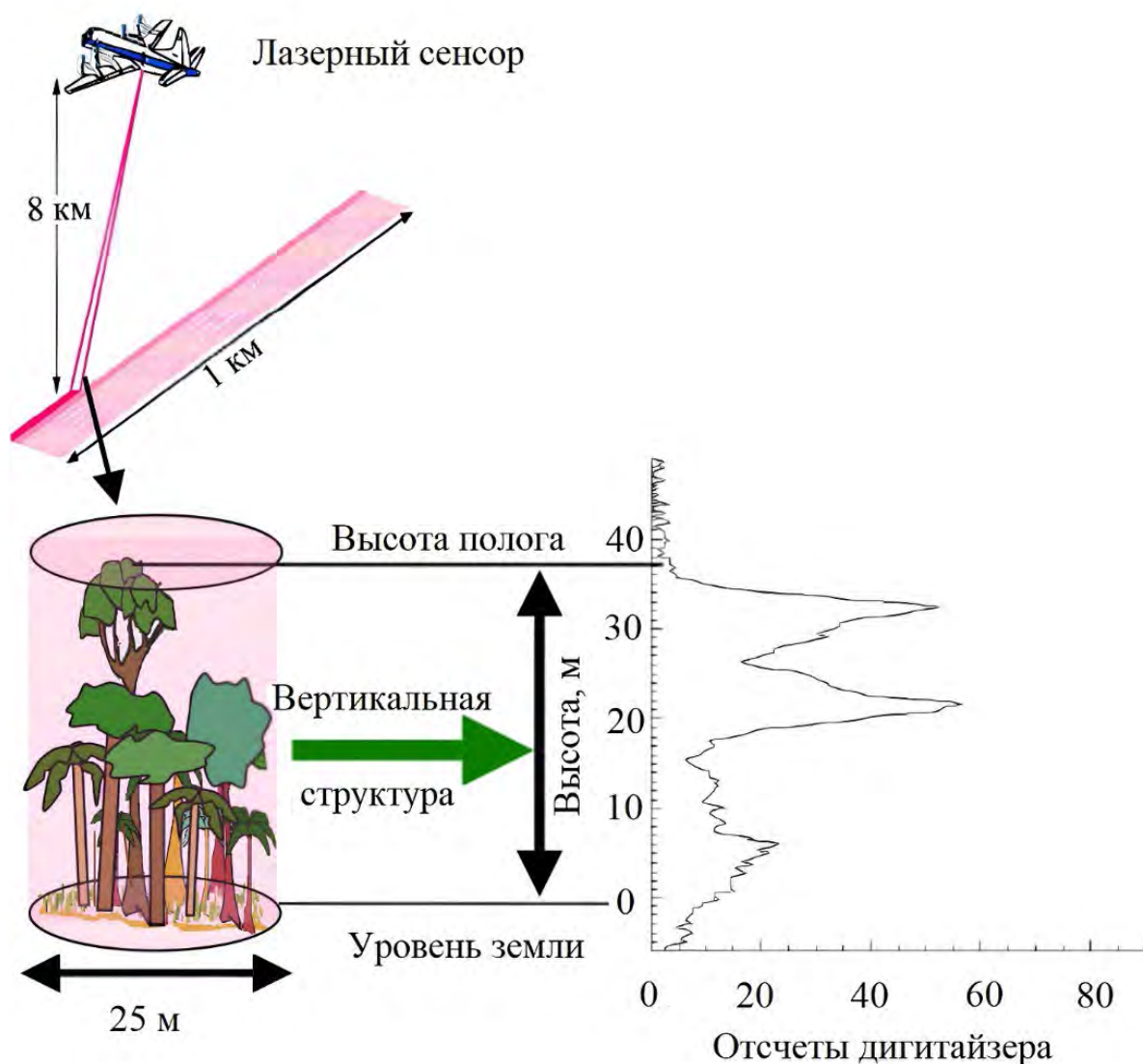


Рис. 1. Концептуальная основа получения отражений посредством лидара с широким следом. Падающие импульсы лазерной энергии, распределенные по Гауссу от платформ, находящихся в воздухе или в космосе, отражаются от различных частей кроны, в результате чего формируется обратный сигнал, амплитуда которого зависит от площади отражающих поверхностей (листьев и ветвей) на данной высоте. Вся форма сигнала отражает вертикальное распределение структур, на которые падает луч. Часть падающего света проникает полностью сквозь полог, создавая последний возврат от земли импульса с большой амплитудой волны [Estimation of tropical forest structural characteristics using large-footprint lidar, 2002]

Лидарные системы с широким следом, включающие информацию, содержащуюся в форме обратного лазерного сигнала, использовались для определения высоты и структуры полога в различных условиях его сомкнутости [Surface lidar remote sensing of basal area and biomass in deciduous forests of eastern Maryland, USA, 1999; Use of large-footprint scanning airborne lidar to estimate forest stand characteristics in the Western Cascades of Oregon, 1999]. Поскольку подобные лидарные системы измеряют топографию нижнего яруса даже в условиях высокой плотности лесного полога, была показана возможность регистрации структуры лесного покрова, статистически неотличимой от полевых измерений [Lidar remote sensing of forest canopy structure and related biophysical parameters at the H. J. Andrews experimental forest, Oregon, USA, 1997], и способность точной фиксации пространственной изменчивости его высоты [Drake, Weishampel, 2000]. Эти системы также позволили точно оценивать надземную биомассу как дугласовой пихты и западного хемлока [Lidar remote sensing of the canopy structure and biophysical properties of Douglas-fir western hemlock forests, 1999; Use of large-footprint scanning airborne lidar to estimate forest stand characteristics in the Western Cascades of Oregon, 1999], так и смешанно-лиственного насаждения умеренного пояса [Surface lidar remote sensing of basal area and biomass in deciduous forests of eastern Maryland, USA, 1999]. В обоих случаях данные, полученные с помощью лидарных платформ, были включены в регрессионные модели для получения структурных оценок и биомассы насаждений. Было обнаружено, что эти взаимосвязи являются значимыми даже в условиях плотной структуры полога. В частности, при оценке надземной биомассы на основе лидара был предсказан общий уровень объясненной изменчивости надземной биомассы (около 96 %) с использованием соответствующих регрессионных моделей [Use of large-footprint scanning airborne lidar to estimate forest stand characteristics in the Western Cascades of Oregon, 1999].

На уровне насаждения оценивали вертикальную стратификацию полога [Identifying and quantifying structural characteristics of heterogeneous boreal forest using laser scanner data, 2005; Modeling airborne laser scanning data for the spatial generation of critical forest parameters in fire behavior modeling, 2003; Generation of crown bulk density for *Pinus sylvestris* L. from lidar 2004; Characterizing vertical forest structure using small-footprint airborne LiDAR, 2003]. При этом для выделения различных слоев полога использовали интенсивность сигналов и применяли контролируемый кластерный анализ, предполагая, что виды имеют разные коэффициенты отражения света [Discrimination of vegetation strata in a multi-layered Mediterranean forest ecosystem using height and intensity information derived from airborne laser scanning, 2010]. Этот метод довольно хорошо работал в чистых (одновидовых) экосистемах. Интенсивность сигналов трудно поддается анализу, поскольку она зависит от датчика, а также от геометрии, ориентации и оптических свойств

объекта (листьев, ветвей, стволов). Некоторые авторы регистрировали ярусы полога, анализируя распределения вероятностей Вейбулла или модели профиля плотности сигнала [Estimating canopy structure of Douglas-fir forest stands from discrete-return LiDAR, 2007; Measuring heights to crown base and crown median with LiDAR in a mature, even-aged loblolly pine stand, 2009; Extracting LiDAR indices to characterize multi-layered forest structure using mixture distributions functions, 2010; The accuracy of estimating individual tree variables with airborne laser scanning in a boreal nature reserve, 2004; 3-D mapping of a multi-layered Mediterranean forest using ALS data, 2012]. Сопоставление средней высоты полога, полученной бортовым лидаром с дискретным отражением сигнала, и средней высоты Лорея, рассчитанной на пробных площадях, показало, что лидарный показатель объяснял 76 % изменчивости средней высоты Лорея [Validation of the ICESat vegetation product using crown-area-weighted mean height derived using crown delineation with discrete return lidar data, 2008].

Во влажных тропических лесах в Коста-Рике было проведено исследование с использованием бортового сканирующего лидара с широким следом [Blair, Rabine, Hofton, 1999]. Диаметр лазерного следа варьировал от 1 до 70 м, расстояние между следами варьировало как вдоль, так и поперек трассы, а разрешение по вертикали составило около 30 см. Основной целью исследования было проверить способность лидарных систем с большим следом регистрировать структурные характеристики лесов для всего спектра типов растительного покрова – от пастбищ до вторичных и первичных тропических лесов [Estimation of tropical forest structural characteristics using large-footprint lidar, 2002].

На основе осциллограммы импульсов были получены четыре показателя (метрики) (рис. 2). Высота полога (LHT), оцененная лидаром, была рассчитана по разности сигналов от верхней части полога и сигнала возврата с земли. Затем медианная высота энергии сигнала (HOME) была рассчитана путем нахождения медианы полного сигнала (т. е. превышения среднего уровня шума) по форме волны, включая энергию, возвращаемую как от крон деревьев, так и от поверхности земли. Местоположение медианной энергии привязывается к центру последнего гауссова импульса, чтобы получить высоту полога. Предполагается, что медианная высота энергии сигнала чувствительна к изменениям как вертикальной структуры полога, так и степени его открытости (в связи с густотой). Отношение высоты к медиане (HTRT) дало представление о том, как положение медианной высоты энергии сигнала изменяется относительно высоты полога. Наконец, был рассчитан коэффициент возврата сигнала от земли (GRND) путем деления общей интенсивности (т. е. количества отсчетов дигитайзера) во всех тридцатисантиметровых вертикальных ячейках, содержащихся в последнем гауссовом пике [Hofton, Minster, Blair, 2000], на сумму интенсивности всех остальных

вертикальных ячеек формы волны в пологе (рис. 2). Таким образом, коэффициент возврата сигнала от земли дает приблизительное представление о степени сомкнутости полога. Затем перечисленные четыре показателя были включены в процедуру пошаговой регрессии для прогнозирования измеренной в полевых условиях суммы площадей сечений, среднеквадратического диаметра ствола и надземной биомассы. Последняя рассчитана по имеющейся регрессионной модели с диаметром ствола [Brown, 1997].

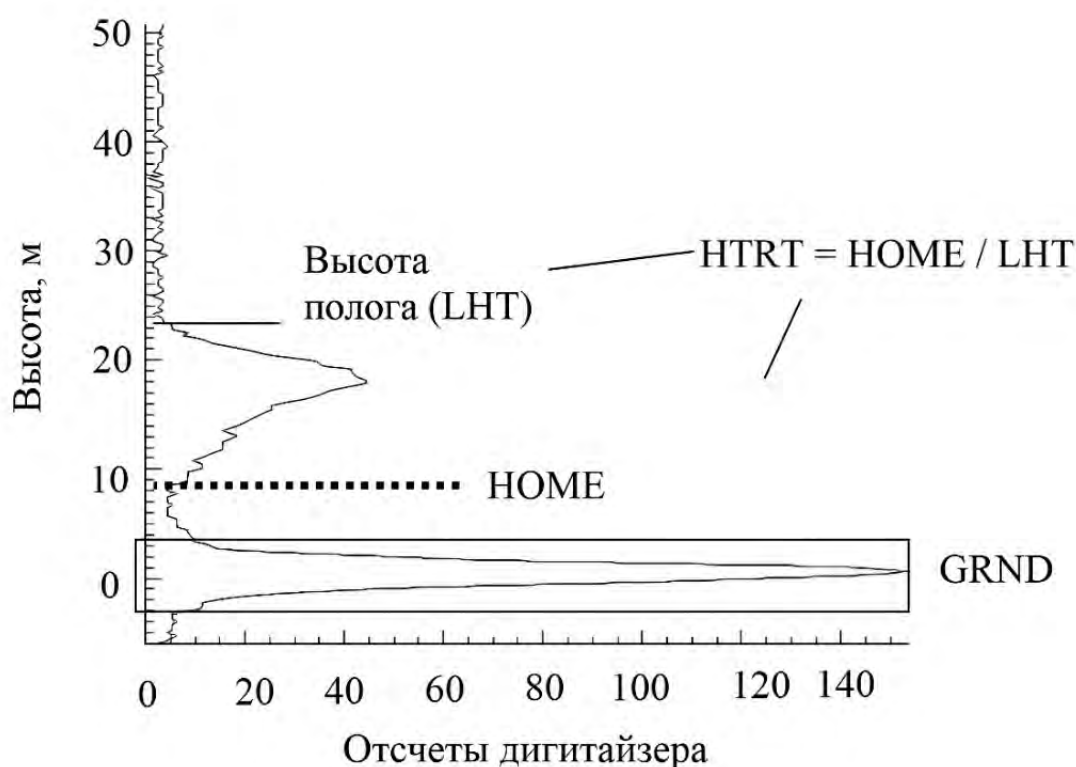


Рис. 2. Показатели, полученные на основе сигналов лидара и использованные в качестве независимых переменных для оценки структурных и продукционных характеристик насаждения. Обозначения и пояснения в [Estimation of tropical forest structural characteristics using large-footprint lidar, 2002]

Анализ с использованием наземных данных и данных, полученных с помощью лазерного высотомера, был проведен как на уровне отдельных лазерных следов (круг диаметром 25 м), так и на уровне пробных площадей (0,5 га) с совпадающими сенсорными и полевыми данными (рис. 3, а, б). Для каждой пробной площади были выбраны только лазерные следы, полностью входящие в площадь (т. е. центр следа находился на расстоянии более 12,5 м от границы площади), чтобы избежать влияния внешней структуры полога, не замеренной на земле (рис. 3).

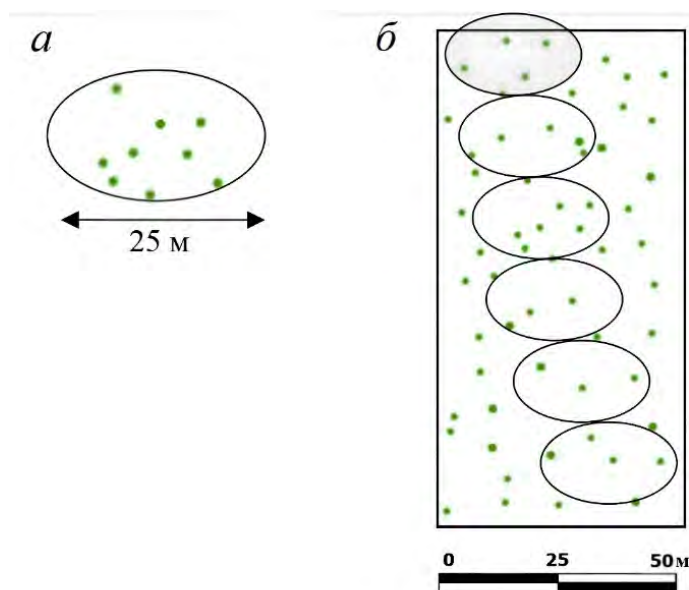


Рис. 3. Анализ лазерных следов с использованием наземных данных и данных, полученных с помощью лазерного высотомера: *а* – анализ на уровне лазерного следа включал все деревья, которые были расположены в его пределах; *б* – анализ на уровне насаждения включал все деревья, которые в него входили, и все сигналы, которые полностью находились в том же насаждении (т. е. на расстоянии 12,5 м от границы насаждения). В этом случае были включены четкие сигналы сенсора, а серые не включены. Как на уровне следа, так и на уровне насаждения, деревья, попавшие внутрь обозначенных площадей, были использованы для расчета продукционных характеристик насаждения. Эти полученные на пробных площадях характеристики были сопоставлены с: *а* – метриками отдельных следов; *б* – средними метриками всех следов в насаждении [Estimation of tropical forest structural characteristics using large-footprint lidar, 2002]

На уровне следа лидарные показатели были получены на основе отдельных сигналов (рис. 3, *а*). Значения на уровне пробной площади были рассчитаны как средние значения показателей для всех следов на площади (рис. 3, *б*). Показатели, полученные на основе осциллограмм сенсорных следов (рис. 2), затем были использованы для оценки полученных в полевых условиях структурных и продукционных характеристик леса как на уровне следа, так и на уровне пробной площади с использованием пошаговой множественной регрессии. На уровне следа (0,05 га) сенсорные показатели, особенно НОМЕ, достоверно оценивали все три структурных признака насаждений во всем диапазоне лесорастительных условий. Показатель НОМЕ объяснял 59 и 53 % изменчивости среднего диаметра ствола и надземной биомассы соответственно, а с добавлением в число независимых переменных остальных трех сенсорных показателей объясненная изменчивость повысилась до 77 и 73 % соответственно. Показатель GRND объяснял 27 % изменчивости суммы площадей сечений, а с включением в модель дополнительно LHT и HTRT – 39 % [Estimation of tropical forest structural characteristics using large-footprint lidar, 2002].

На уровне пробной площади (0,5 га) все взаимосвязи между структурными (продукционными) и лидарными показателями оказались намного теснее, чем на уровне сенсорного следа. Для всех однофакторных моделей уровни их объясненной изменчивости более чем на 35 % выше, чем на уровне следа, и варьируют от 72 до 92 %. Геометрическая интерпретация однофакторных моделей для среднего диаметра стволов, суммы площадей сечений и надземной биомассы дана на рис. 4.

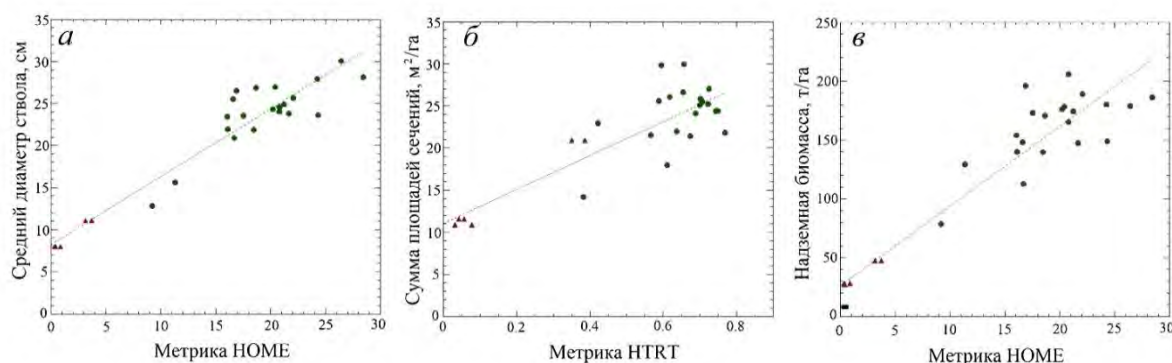


Рис. 4. Геометрическая интерпретация однофакторных моделей для:
 а – среднего диаметра стволов; б – суммы площадей сечений; в – надземной биомассы.
 Модели а–в объясняют соответственно 92, 72 и 89 % изменчивости искомого
 показателя [Estimation of tropical forest structural characteristics
 using large-footprint lidar, 2002]

Таким образом, показатели, полученные с помощью лазерного высотомера с широким следом, в значительной степени коррелированы со структурными характеристиками тропических лесов как на уровне сенсорного следа, так и на уровне пробной площади во всем диапазоне условий структурно сложных тропических влажных лесов. На уровне сенсорных следов площадью 0,05 га взаимосвязь между лидарными метриками и структурными (биопродукционными) характеристиками насаждений ослаблена проблемами геолокации, а также более высоким уровнем изменчивости структуры насаждений на уровне следов. Тем не менее даже с учетом названных факторов взаимосвязи между лидарными метриками и структурными характеристиками тропических лесов остаются довольно тесными во всем диапазоне выбранных условий [Estimation of tropical forest structural characteristics using large-footprint lidar, 2002].

Близкие результаты были получены в насаждениях дугласии и западного хемлока в штате Орегон (США), где анализировались насаждения всех классов возраста как по данным лидара (средняя высота полога, м; число волн импульсов и относительный объем средней части полога, м³/м²), так и по данным наземной таксации (средний диаметр стволов, см; сумма площадей сечений, м²/га и надземная биомасса, т/га). При оценке среднего

диаметра древостоя статистически значимой оказалась лишь средняя высота полога (рис. 5, *а*), а при оценке суммы площадей сечений и надземной биомассы – число волн импульсов и объем средней части полога (рис. 5, *б*, *в*) [Lidar remote sensing of the canopy structure and biophysical properties of Douglas-fir western hemlock forests, 1999].

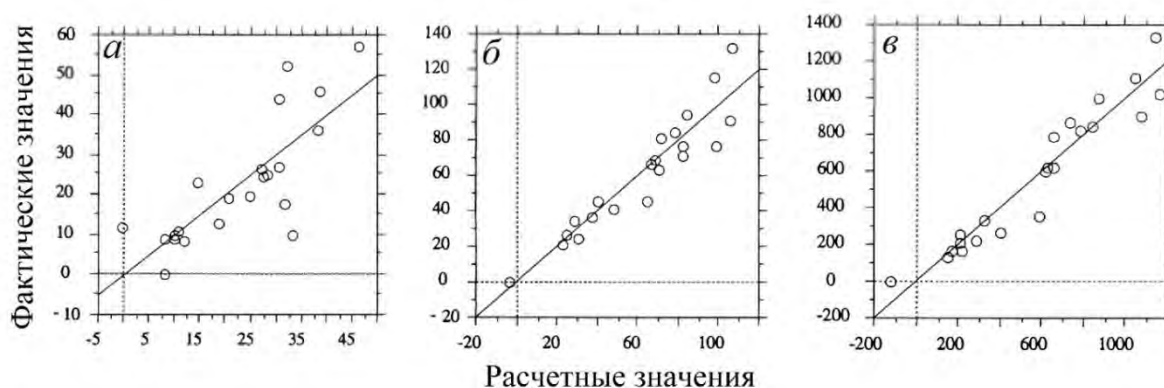


Рис. 5. Геометрическая интерпретация моделей: *а* – для среднего диаметра стволов; *б* – суммы площадей сечений; *в* – надземной биомассы, – объясняющих соответственно 61, 87 и 91 % изменчивости искомого показателя [Lidar remote sensing of the canopy structure and biophysical properties of Douglas-fir western hemlock forests, 1999]

Недавние исследования показали, что интеграция функционально обоснованных моделей (*process-based models*) с данными лидарного зондирования может улучшить результаты моделирования на уровнях от древостоя до региональных масштабов [Bai, Pang, Kong, 2024]. Для оценки возможности использования функционально обоснованных моделей для крупномасштабного моделирования распределения запасов углерода в культурах лиственницы ольгинской (*Larix olgensis*) в Китае была применена параметризованная модель 3-PG, прогнозирующая рост на физиологических принципах. Модель была использована для моделирования среднего диаметра ствола и общей биомассы, которые впоследствии были подтверждены широким спектром данных наблюдений, включая данные пробных площадей, инвентаризации лесного фонда и данные бортового лазерного сканирования. Результаты показали, что модель 3-PG обладает относительно высокой точностью для прогнозирования как среднего диаметра, так и общей биомассы в древостое и региональном масштабе, с коэффициентами детерминации в диапазоне от 0,78 до 0,88. Основываясь на оценке общей биомассы, была составлена карта запасов углерода в культурах лиственницы лесного хозяйства Менджиаганг с пространственным разрешением 20 м. Сделан вывод, что интеграция модели 3-PG и данных бортового лазерного зондирования позволяет хорошо прогнозировать запасы биомассы и углерода в региональном и даже более крупных масштабах [Bai, Pang, Kong, 2024].

Обычно при оценке адекватности моделей, описывающих зависимость структурных и биопродукционных показателей насаждений от лидарных метрик, полевые данные рассматриваются в качестве истинных, хотя известно, что их определение на пробных площадях связано с ошибками. В связи с этим было рассмотрено влияние неопределенностей в полевых данных, вызванных ошибками измерений, моделями и ошибками определения местоположения, на оценку точности прогнозов биомассы с помощью воздушного лазерного сканирования на уровне пробной площади [Persson, Ekstrom, Ståhl, 2022]. Представлены методы теоретического анализа, которые учитывают взаимодействие источников ошибок. Модель определения характеристик ошибок (ЕСМ) использована для описания структуры ошибок прогнозов, основанных на лидарном зондировании, и показано, как параметры ЕСМ могут быть скорректированы при наличии ошибок в полевых данных. Показаны также возможности коррекции среднеквадратических ошибок (RMSE). Основываясь на данных, полученных в скандинавских лесах, был сделан вывод, что ошибки полевых привязок влияют на прогнозы, основанные на лидарном зондировании. За счет учета этих ошибок среднеквадратическая ошибка прогнозов, основанных на дистанционном зондировании, была снижена на 6–18 %. Было обнаружено, что наиболее важными источниками ошибок в полевых привязках являются остаточные ошибки аллометрической модели биомассы и ошибки определения местоположения деревьев на пробной площади. В совокупности на эти два источника приходилось 97 % дисперсии, в то время как ошибки измерений и неопределенности параметров модели биомассы в данном исследовании были незначительными [Persson, Ekstrom, Ståhl, 2022].

1.3. Использование беспилотных лидаров (БПЛА) при сканировании морфоструктуры деревьев

За период с 1990-х по 2020-е гг. количество публикаций, посвященных применению БПЛА-лидаров в лесном деле, нарастало по экспоненте, тогда как применение бортовых лазерных платформ вышло на плато, и в перспективе последние могут быть полностью вытеснены БПЛА-лидарами [Tang, Shao, 2015; Forest and UAV: A bibliometric review, 2016; Zhen, Quackenbush, Zhang, 2016]. В одной из обзорных работ последних лет [Harnessing unmanned aerial vehicles and IT's sustainable forestry management – Skyward Solutions, 2024] рассматривается интеграция БПЛА для устойчивого управления лесами с акцентом на инновационные решения, предлагаемые компанией *Skyward Solutions*. Представлен подробный анализ использования БПЛА в лесном хозяйстве, подчеркивающий их потенциал для революци-

онного изменения различных аспектов управления лесами. Обсуждается использование БПЛА, оснащенных передовыми датчиками и технологиями получения изображений, для таких задач, как мониторинг лесов, оценка породного состава и выявление нарушений. Исследуется роль БПЛА в содействии эффективной инвентаризации лесов, оценке состояния деревьев, их биомассы и мониторингу связывания углерода. Рассмотрены ключевые особенности платформ и технологий БПЛА компании *Skyward Solutions*, включая их возможности для аэрофотосъемки высокого разрешения, лидарного сканирования и инфракрасного зондирования. Описаны преимущества использования БПЛА в лесном деле, в частности повышение эффективности, снижение затрат и сведение к минимуму воздействия на окружающую среду, по сравнению с традиционными методами. Обсуждается интеграция данных БПЛА с географическими информационными системами (ГИС) для комплексного картографирования и анализа лесов, подчеркивается преобразующий потенциал БПЛА в продвижении методов устойчивого управления лесами [Harnessing unmanned aerial vehicles and IT's sustainable forestry management – Skyward Solutions, 2024].

Однако остаются проблемы, связанные с оптимизацией обработки данных и методами эффективной интеграции полученных данных для мониторинга лесов. В качестве одного из путей решения проблемы предложена интеграция лидарных и мультиспектральных данных, полученных с помощью БПЛА, для идентификации лесных видов и мониторинга их физиологического состояния [Integrating drone-based LiDAR and multispectral data for tree monitoring, 2024]. На примере смешанных насаждений хвойных и лиственных пород в парке Тичино (Италия) были проведены полевые кампании по определению видового состава насаждений, индекса листовой поверхности (LAI , m^2/m^2), содержания хлорофилла в пологе (CCC , $г/м^2$) и данных морфоструктуры и полноцветных (мультиспектральных) RGB-изображений, полученных с БПЛА. Для связи LAI и CCC с мультиспектральными характеристиками были использованы пять алгоритмов машинного обучения: регрессия гауссовых процессов, регрессия опорных векторов, частичная регрессия методом наименьших квадратов, нейронная сеть и алгоритм «случайный лес». Лучший результат был получен по регрессии гауссовых процессов, объяснившей 83 и 80 % изменчивости LAI и CCC соответственно (рис. 6).

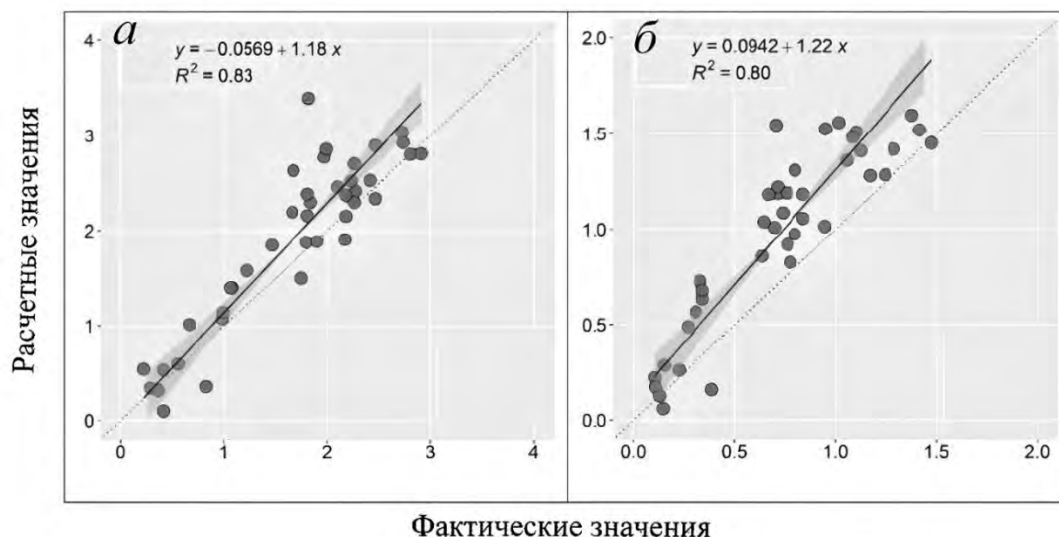


Рис. 6. Соотношение расчетных и измеренных значений: а – LAI; б – CCC
[Integrating drone-based LiDAR and multispectral data for tree monitoring, 2024]

Полученные результаты подчеркивают потенциал интеграции лидарных и мультиспектральных данных, полученных с помощью БПЛА, для эффективного с точки зрения затрат и корректного мониторинга состояния лесов.

Выводы по главе 1

С помощью различных бортовых лазерных профилирующих систем с узким следом оценивали площадь вертикального сечения профиля лесного полога, которая рассматривалась как важная переменная при оценке запаса насаждения. Кроме запаса насаждений, измерения с помощью лазерных высоотомеров с узким следом использованы для оценки высоты древесного полога, процента проективного покрытия полога и надземной биомассы. Однако подобные датчики с высоким разрешением, как правило, давали стабильные отражения от земли только в относительно открытом лесном пологе, что затрудняло оценку надземной биомассы в сомкнутых многоярусных насаждениях. В подобных экспериментах лазеры обычно работали в режиме профилирования, т. е. регистрировалась только одна строка по маршруту полета непосредственно под самолетом. Для крупномасштабного практического применения лазерных данных метод профилирования давал бы довольно ограниченную выборку.

Лидарные системы с широким следом обладают рядом преимуществ, которые помогают избежать названных проблем. Во-первых, благодаря увеличению размера следа до диаметра крон, образующих полог деревьев, лазерные импульсы достигают земли даже в густых насаждениях. Во-вторых, увеличенный размер следа позволяет избежать ошибок, присущих лидарам

с узким следом, которые верхушечные побеги деревьев часто не регистрируют. В-третьих, лидарные системы с широким следом работают на больших высотах и позволяют получать широкий спектр изображений, что снижает затраты на картографирование больших площадей. Наконец, названные системы оцифровывают весь обратный сигнал (или полную форму волны), предоставляя таким образом данные о вертикальном распределении ярусов полога от верхней его части до земли.

Для всего спектра типов растительного покрова в тропиках взаимосвязи между структурными (продукционными) показателями и лидарными метриками на уровне древостоя оказались намного теснее, чем на уровне сенсорного следа. Для всех однофакторных моделей уровни их объясненной изменчивости варьируют от 72 до 92 %. В насаждениях дугласии и западного хемлока в США лазерные метрики объяснили от 61 до 91 % изменчивости структурных и продукционных показателей насаждений. Интеграция данных лидарного зондирования с функционально обоснованными моделями и мультиспектральными данными полога повышает надежность результатов.

За период с 1990-х по 2020-е гг. количество публикаций, посвященных применению БПЛА-лидаров в лесном деле, нарастало по экспоненте, тогда как применение бортовых лазерных платформ вышло на плато, и в перспективе последние могут быть полностью вытеснены БПЛА-лидарами.

ГЛАВА 2. СЕГМЕНТАЦИЯ КРОН ДЕРЕВЬЕВ ПО ДАННЫМ ВОЗДУШНОГО ЛИДАРНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Использование бортового лидара на уровне древостоя, в основном для хвойных лесов, дало хорошие результаты при оценке запаса и средней высоты [Naesset, 1997a, 1997b; Magnussen, Boudewyn, 1998; Lidar remote sensing of the canopy structure and biophysical properties of Douglas-fir western hemlock forests, 1999; Surface lidar remote sensing of basal area and biomass in deciduous forests of eastern Maryland, USA, 1999]. Однако в типичных условиях лесов умеренного пояса подход, основанный на использовании лидара на уровне древостоя, сопряжен со многими трудностями. Методы, применяемые на уровне насаждений, не являются подходящими для описания вертикальной стратификации сложных лесных экосистем с открытым доминирующим пологом и развитым нижним ярусом из травянистых и древесных растений [Di Castri, 1981]. Поскольку в одном древостое может встречаться несколько древесных видов с различными ростовыми характеристиками, для расчета параметров древостоя необходимо заранее знать количество и распределение древесных видов, а для целей лесопользования требуется информация об отдельных деревьях. Таким образом, определение морфологии отдельных деревьев и классификация видов являются необходимыми условиями при использовании технологий дистанционного зондирования.

Сегментацию отдельных деревьев с помощью воздушного (бортового, БПЛА) лидарного сканирования связывают с двумя подходами в зависимости от применяемой модели [Performance and sensitivity of individual tree segmentation methods for UAV-LiDAR in multiple forest types, 2022].

Первый подход основан на построении растровой модели высоты полога (СНМ) насаждения по облакам точек (*point clouds*) с последующей сегментацией кроны деревьев [A survey of remote sensing-based aboveground biomass estimation methods in forest ecosystems, 2014; A novel vegetation point cloud density tree-segmentation model for overlapping crowns using UAV LiDAR, 2021]. Алгоритмы для извлечения растровой сетки модели поверхности кроны на основе лазерных точек включают использование максимальных значений высотных отметок (Z) с интерполяцией по пустым узлам сетки [A segmentation based method to retrieve stem volume estimates from 3-D tree height models produced by laser scanners, 2001; Detection and analysis of individual leaf-off tree crowns in small footprint, high sampling density lidar data from the eastern deciduous forest in North America, 2003; Estimation of timber volume and stem density based on scanning laser altimetry and expected tree size distribution functions, 2004], кригинг [Popescu, Wynne, 2004], алгоритм «активного контура» [Persson, Holmgren, Södermann, 2002; Development of filtering, segmentation and modelling modules for LIDAR and multispectral data

as a fundamental of an automatic forest inventory system, 2004] и метод *TopoSys* [LIDAR-based geometric reconstruction of boreal type forest stands at single tree level for forest and wildland fire management, 2004], сопровождаемые гауссовскими фильтрами нижних частот для сглаживания модели. Деревья расположены в виде локальных максимумов, представляющих собой узлы сетки, имеющие наибольшее значение Z в окружении восьми соседей [Persson, Holmgren, Södermann, 2002; A segmentation based method to retrieve stem volume estimates from 3-D tree height models produced by laser scanners, 2001; LIDAR-based geometric reconstruction of boreal type forest stands at single tree level for forest and wildland fire management, 2004] или большего их числа [Popescu, Wynne, 2004; Development of filtering, segmentation and modelling modules for LIDAR and multispectral data as a fundamental of an automatic forest inventory system, 2004]. Эти модели создаются на основе интерполяции данных облака точек, и для определения местоположения отдельных деревьев используется алгоритм локального максимума (LM); затем область лесного полога вокруг каждого максимума, соответствующего отдельному дереву, сегментируется с помощью алгоритма морфологического водораздела (*watershed algorithm*) [Gougeon, 1995; Wang, Gong, Biging, 2004; Comparative testing of single-tree detection algorithms under different types of forest, 2011]. Совмещение модели высоты полога с алгоритмом водораздела для сегментации отдельных деревьев *Picea glauca* и *Abies fabri* на северо-востоке Канады показало, что около 76 % пикселей были одинаковыми у обоих видов, и различий их морфологии не было выявлено [Wang, Gong, Biging, 2004]. Использование алгоритма локального максимума, основанного на адаптивном среднем смещении (*MeanShift*) [Comaniciu, Meer, 2002], показало, что метод позволяет идентифицировать большее число угнетенных деревьев на 30 %, по сравнению с упомянутым выше алгоритмом [Hu, Chen, Xu, 2017]. При объединении модели густоты деревьев, оцениваемой по облакам точек, с усовершенствованным алгоритмом морфологического водораздела точность определения высоты деревьев и площади крон в Северном Китае превысила 85 % [A novel vegetation point cloud density tree-segmentation model for overlapping crowns using UAV LiDAR, 2021]. Эти исследования показали, что сегментация деревьев с использованием растровых данных наиболее подходит для хвойных деревьев с выраженными верхушками стволов, в то время как у широколиственных деревьев с асимметричной формой кроны, перекрывающимися и низко опущенными кронами результаты часто завышены или отсутствуют [Graph SLAM correction for single scanner MLS forest data under boreal forest canopy, 2017]. Подобные модели неидеальны, поскольку сам процесс интерполяции вносил соответствующие неопределенности, а также при сегментации использовались только первые возвратные точки импульсов. При этом неизбежны проблемы при сильном перекрытии крон [Koch, Heyder, Weinacker, 2006], а многие угнетенные деревья остаются необнаруженными [Reitberger, Krzystek, Stilla,

2009a]. Кроме того, основным фактором, влияющим на точность сегментации, является разрешающая способность растровых данных [Performance and sensitivity of individual tree segmentation methods for UAV-LiDAR in multiple forest types, 2022]. Было показано [A survey of remote sensing-based aboveground biomass estimation methods in forest ecosystems, 2014; A bottom-up approach to segment individual deciduous trees using leaf-off lidar point cloud data, 2014], что из 24 методов 18 основаны на модели высоты полога и только 6 – на сегментации облака точек.

Второй подход основан на обнаружении и сегментации крон деревьев непосредственно по лидарному облаку точек [A new method for segmenting individual trees from the lidar point cloud, 2012; A bottom-up approach to segment individual deciduous trees using leaf-off lidar point cloud data, 2014]. Он использует данные нормализованного облака точек (NPC) и пространственные взаимосвязи между облаками точек и реальными структурными характеристиками насаждений, что позволяет избежать ошибок, вызванных генерированием растровой модели высоты полога [3D segmentation of single trees exploiting full waveform LIDAR data, 2009; Yao, Krzystek, Heurich, 2012; A new method for segmenting individual trees from the lidar point cloud, 2012; Kuželka, Slavík, Surový, 2020]. Основные, связанные с подходом методы включают кластеризацию по К-среднему значению, алгоритм нормализованных сечений (*normalized cutting*) на основе вокселей (объемных пикселей), сегментацию кластеров на основе облака точек (PCS) и укладку слоев (*layer stacking*) (LS) [Yao, Krzystek, Heurich, 2012; Layer stacking: A novel algorithm for individual forest tree segmentation from LiDAR point clouds, 2017; Individual tree detection and crown delineation from unmanned aircraft system (UAS) LiDAR in structurally complex mixed species eucalypt forests, 2021]. При использовании основанного на облаках точек метода кластеризации с распознаванием по расстоянию для сегментации деревьев сосны, березы и тополя войлочного в Южной Финляндии были точно идентифицированы 75 % отдельных эталонных деревьев [Yao, Krzystek, Heurich, 2012]. Для сегментации деревьев в хвойных лесах был предложен восходящий алгоритм «снизу вверх» (*bottom-up*) с учетом расстояния между деревьями по их вершинам в сочетании с оценкой порогового значения [A bottom-up approach to segment individual deciduous trees using leaf-off lidar point cloud data, 2014]. Подход был апробирован на водоразделе Шейверс-Крик в США, где показатель обнаружения составил 84 %, а точность идентификации обнаруженных деревьев достигла 97 %. Однако, учитывая, что лиственные деревья сегментируются непосредственно на основе нормализованного облака точек, эффект сегментации не был идеальным. При использовании алгоритма укладки слоев в сложных насаждениях было правильно идентифицировано более 90 % деревьев [Layer stacking: A novel algorithm for individual forest tree segmentation from LiDAR point clouds, 2017]. В целом, точность алгорит-

мов сегментации деревьев, основанных непосредственно на нормализованном облаке точек, зависит от плотности точек, расположения кластеров деревьев, возраста древостоя и густоты деревьев на исследуемом участке [Yin, Wang, 2019].

Далее на конкретных примерах рассмотрим названные два подхода раздельно.

2.1. Сегментация деревьев по растровой модели высоты полога

Сегментация крон на основе модели высоты полога выполняется несколькими методами. Здесь рассмотрим три наиболее распространенных:

- локальных максимумов;
- «растущей зоны» (*region growth*);
- морфологического водораздела (*watershed*).

2.1.1. Сегментация кроны по методу локальных максимумов

На испытательном полигоне на юге Швеции с высокой точностью было измерено GPS-положение и морфология всех деревьев ели европейской, сосны обыкновенной и березы повислой, и результаты сопоставлены с данными их сканирования лидаром, установленным на вертолете [Persson, Holmgren, Södermann, 2002]. Кроме того, впервые были оценены методы обработки изображений, основанные на теории активных контуров [Cohen, 1991; Kass, Witkin, Terzopoulos, 1998]. Цели этого исследования состояли в том, чтобы: 1) оценить успешность обнаружения отдельных деревьев путем сегментирования модели их крон; 2) оценить точность лазерных оценок высоты деревьев, диаметра кроны, диаметра и объема ствола обнаруженных деревьев [Persson, Holmgren, Södermann, 2002].

Результаты лазерного профилирования были использованы для создания карты (модели) поверхности полога с локальными максимумами, соответствовавшими положению верхушек деревьев. Лазерный луч обладает способностью проникать сквозь кроны деревьев, и данный факт, с одной стороны, обеспечивает фиксацию рельефа местности, но, с другой стороны, приводит к большим колебаниям оценок высоты кроны того или иного дерева, что затрудняет разделение (вычленение из общего полога) крон деревьев. Сигналы, получаемые от внутренней структуры крон, были устранены путем формирования поверхности, соответствующей внешним очертаниям крон, а колебания высоты, вызванные выступающими ветвями, были устранены путем сглаживания [Persson, Holmgren, Södermann, 2002].

Метод идентификации деревьев и оценки их высоты и диаметра кроны включал пять этапов [Persson, Holmgren, Södermann, 2002]:

- 1) создание цифровой модели поверхности полога (DSM);
- 2) создание цифровой модели рельефа (DTM);
- 3) создание цифровой модели высоты полога (DCM);
- 4) сглаживание модели высоты полога в разных масштабах;
- 5) расчет высоты дерева, диаметра кроны, диаметра и объема ствола идентифицированных деревьев [Persson, 2001].

Выполнение первых трех этапов приведено на рис. 7 [Individual tree detection using UAV-lidar and UAV-SfM data: A tutorial for beginners, 2021].

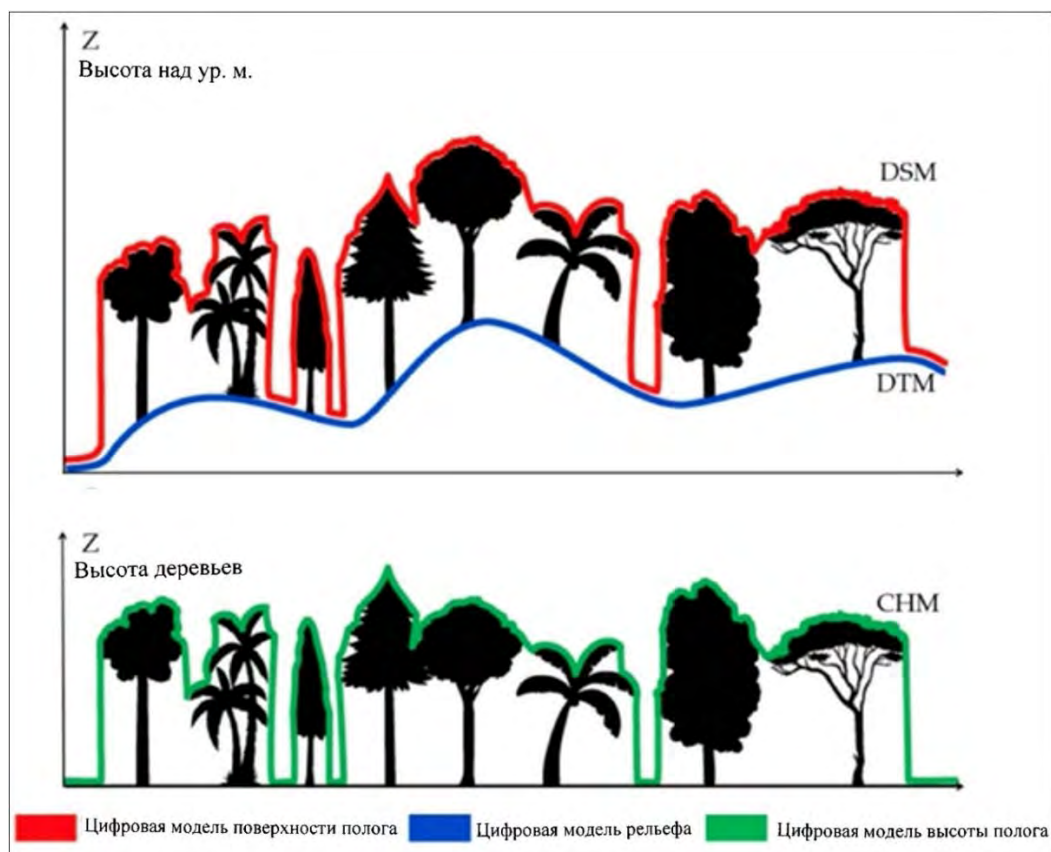


Рис. 7. Формирование цифровых моделей DSM, DTM и CHM [Individual tree detection using UAV-lidar and UAV-SfM data: A tutorial for beginners, 2021]

Были выбраны лазерные данные, охватывающие полевые пробные площади. Неравномерно распределенные точки отраженных лазерных импульсов были преобразованы в два растровых слоя с размером ячейки 1/3 м. Первый растровый слой (DSM_{min}) соответствовал высоте самой низкой точки лазерного отражения, а второй растровый слой (DSM_{max}) – высоте наивысшей точки отражения в каждой ячейке (рис. 8, а). Если в ячейке не было точек лазерных отражений, для нее усреднялись высоты восьми соседних ячеек [Persson, Holmgren, Södermann, 2002].

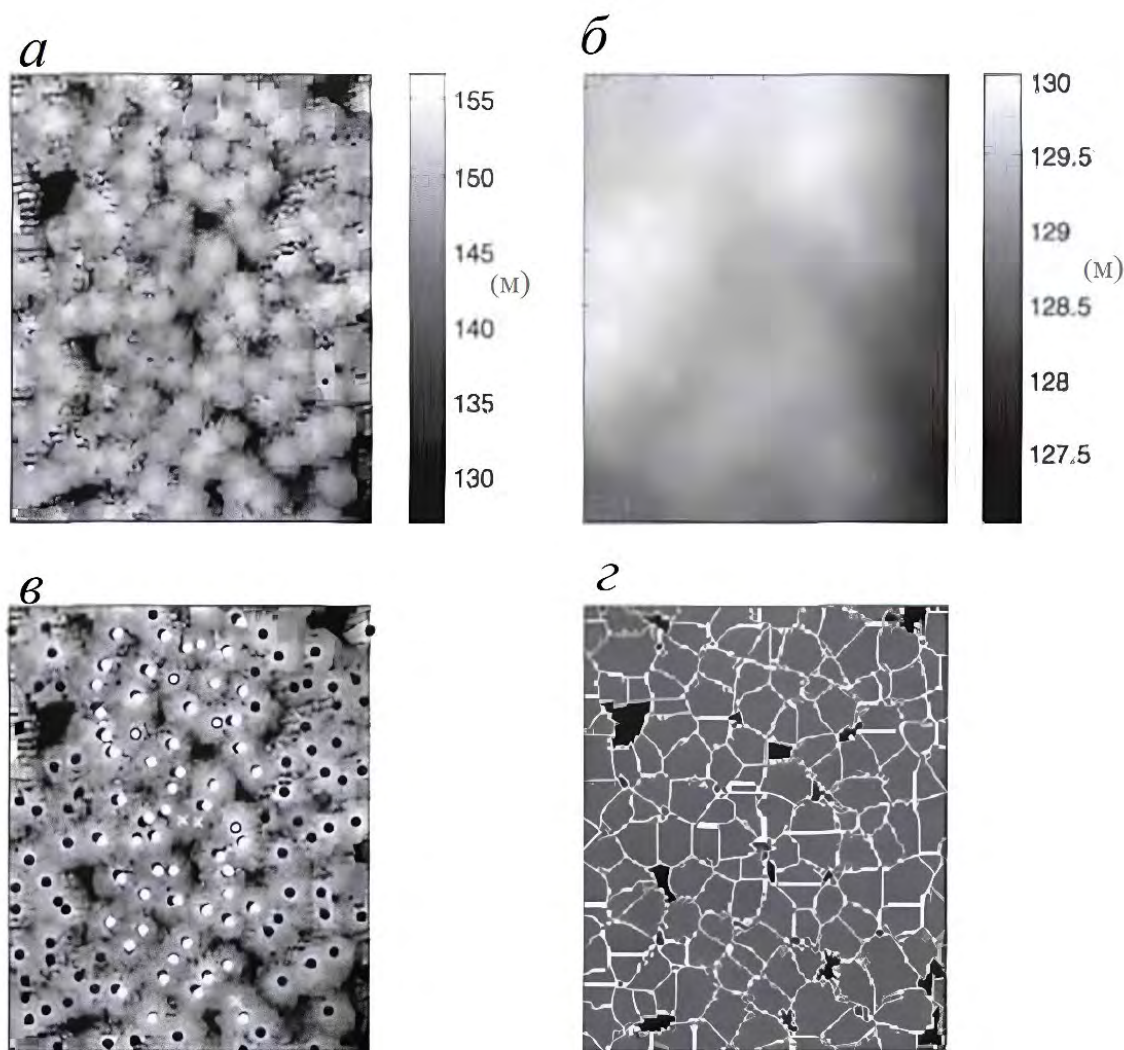


Рис. 8. Построение цифровой модели: *а* – поверхности полога (DSM_{max}); *б* – рельефа (DTM); *в* – показано расположение деревьев, измеренное лазером и в полевых условиях; черные точки обозначают положение верхушек деревьев, измеренное лазером, белые точки – положение стволов, измеренное в полевых условиях, черные кружки с белыми точками – положение, измеренное как лазером, так и в полевых условиях в одном и том же пикселе; *г* – показаны сегментированные кроны деревьев [Persson, Holmgren, Södermann, 2002]

Первый растровый слой (DSM_{min}) использовался для создания цифровой модели рельефа (DTM) с использованием активных контуров, реализованных в ранее разработанном алгоритме [Elmqvist, 2000] (рис. 8, *б*). Контур представлен сеткой, которая прикрепляется к точкам лазерных отметок. Для низкочастотной фильтрации желательно было использовать поверхность, огибающую кроны деревьев, и не включать пиксели, импульсы которых проникают внутрь кроны. Чтобы удалить импульсы, проникшие в полог, был применен тот же алгоритм активного контура, который использовался для регистрации рельефа, так что поверхность активного контура (ACS) соответствовала внешней части крон (рис. 9, *а*). Затем была рассчитана разница между цифровой моделью поверхности (DSM_{max}) и цифровой моделью

рельефа (DTM), и для получения изображения был установлен двухметровый порог. Во избежание того, чтобы пикселям, расположенным близко к дереву, были присвоены значения ACS, которые были интерполированы между кроной дерева и землей, пороговое изображение было отфильтровано по медиане (5 на 5). Предполагалось, что нулевые пиксели после применения медианного фильтра относятся к отражениям от земли. Пиксельные значения, при которых разница в высоте между ACS и исходной лазерной оценкой высоты превышала 2 м, были заменены на значения ACS (рис. 9, б). Таким образом, были удалены импульсы, проникающие в крону, что привело к меньшему искажению оценок высоты деревьев [Persson, Holmgren, Södermann, 2002].

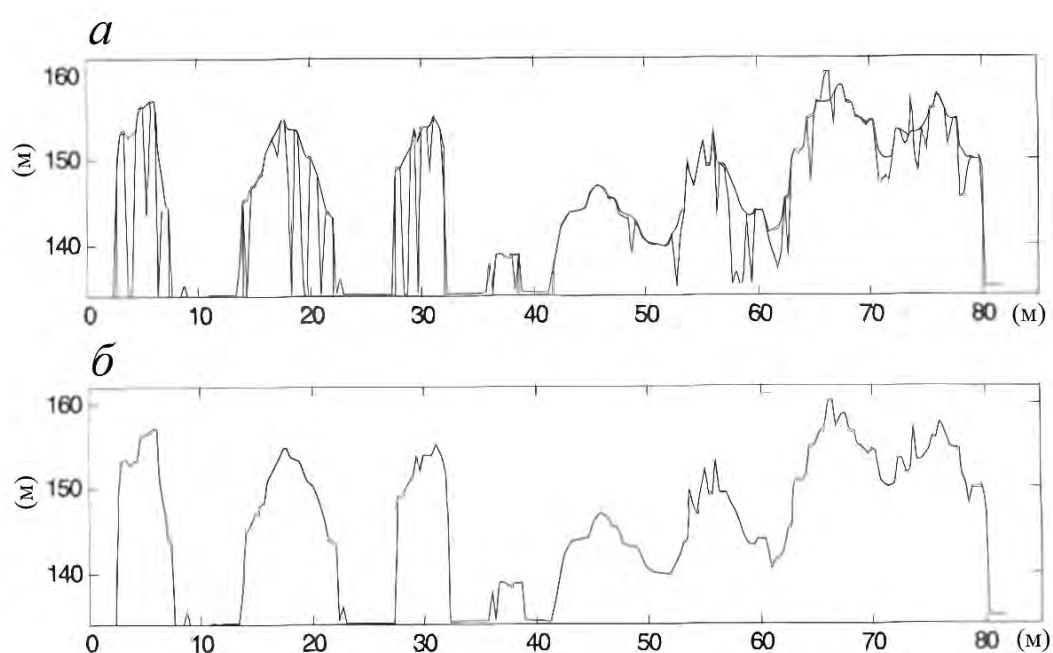


Рис. 9. Регистрация импульсов: а – профиль поверхности активного контура; б – цифровая модель полога (DCM) [Persson, Holmgren, Södermann, 2002]

Чтобы сгладить поверхность полога и повысить вероятность того, что каждое дерево будет иметь единственный максимум высоты, был использован двумерный гауссов фильтр. Расположение деревьев было определено путем поиска локальных максимумов высоты на сглаженных изображениях. Сиды¹ были размещены в каждом пикселе на высоте более 2 м над поверхностью земли и их поднимали в направлении, имеющем наибольший уклон. Когда начальная точка достигала положения, в котором все соседние пиксели имели меньшие значения, обнаруживался локальный максимум.

¹ *Cud (seed)* – это число, которое устанавливает начальные условия для создания изображения. Если использовать один и тот же сид, то при одинаковых параметрах и запросах будет генерироваться одно и то же изображение.

Покрытие верхней границы крон было оценено путем группировки тех пикселей, которые достигли того же максимума, и эти пиксели определяли сегмент. Масштаб сглаживания был выбран таким образом, чтобы в целом ни одно дерево не имело более одного максимума [Persson, Holmgren, Södermann, 2002].

Чтобы оценить результаты анализа, каждое обнаруженное дерево было соотнесено с соответствующим (целевым, исходным) деревом, измеренным на полигоне. Для каждого сегмента могли возникнуть три различных случая: 1) в сегменте не было целевого дерева; 2) в сегменте было одно целевое дерево; 3) в сегменте было более одного целевого дерева. В первом случае у сегмента не было целевого дерева, во втором целевое дерево было связано с деревом, обнаруженным с помощью лазера, и в третьем случае целевое дерево, которое было ближе всего к позиции дерева, обнаруженного лазером, было привязано к этому дереву. Когда лазерные и целевые деревья были связаны в соответствии с приведенными правилами, было проверено каждое целевое несвязанное дерево. Для каждого из них был выполнен поиск на расстоянии не более двух пикселей во всех направлениях. Если был найден сегмент, который не был связан и находился в пределах пробной площади, целевое дерево было связано с этим сегментом. Если в лазерных данных не было обнаружено дерево (обычно небольшое дерево рядом с большим), это меньшее дерево, измеренное в полевых условиях, связывалось с обнаруженным деревом, если оно располагалось ближе, чем правильное более высокое дерево, измеренное в полевых условиях. Эту ошибку в привязке можно было обнаружить, сравнив высоты связанных выборочных деревьев, измеренные в полевых условиях и с помощью лазера. Чтобы удалить неправильно связанные деревья, из набора данных были исключены деревья, высота которых, измеренная с помощью лазера, в два раза превышала высоту, измеренную в полевых условиях. Возможность привязывать деревья друг к другу позволила выяснить, насколько правильно можно обнаружить отдельные деревья [Persson, Holmgren, Södermann, 2002].

Автоматически выделенные деревья с использованием наименьшего размера лазерного следа сравнивались с деревьями, измеренными в полевых условиях. На рис. 8, в белыми метками показано расположение деревьев в полевых условиях (белая точка указывает на то, что дерево было обнаружено и связано, а белый крестик – на то, что дерево не было идентифицировано). Из 795 деревьев было обнаружено 562 (71 %), и было два ложных обнаружения. Небольшие деревья, расположенные рядом с высокими, имеют большую вероятность не быть обнаруженными (рис. 10). Большинство крупных деревьев были обнаружены.

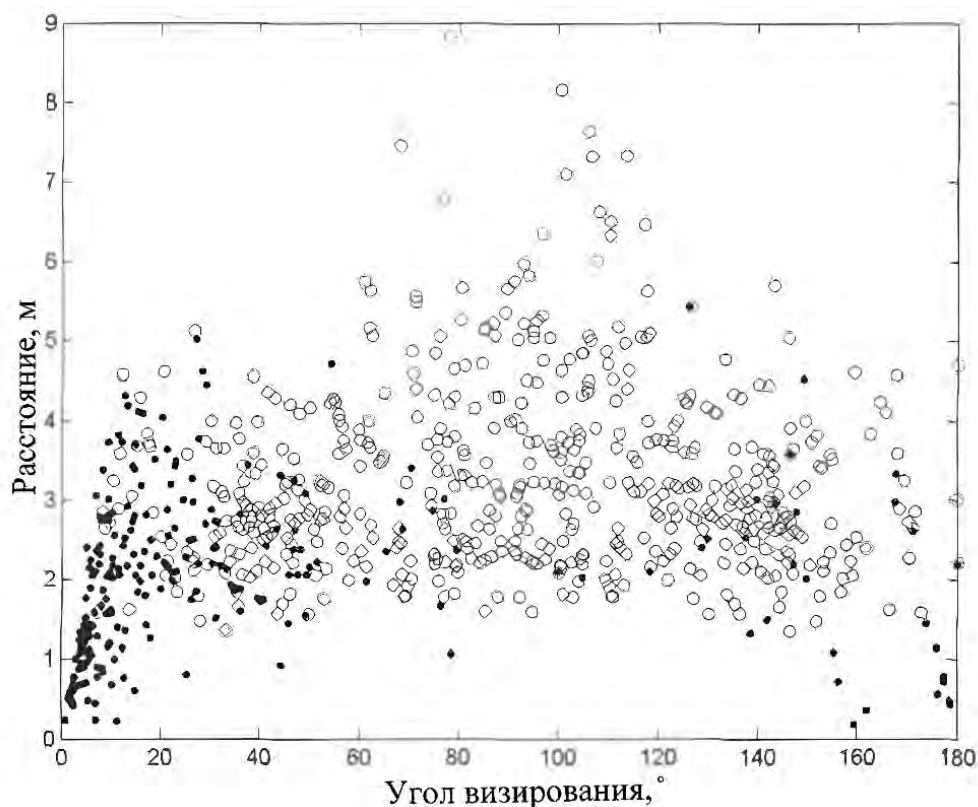


Рис. 10. Распределение обнаруженных (пустые кружки) и не обнаруженных (заполненные кружки) деревьев в связи с расстоянием (м) до ближайшего обнаруженного дерева и вертикальным углом между зенитом и вершиной ближайшего обнаруженного дерева [Persson, Holmgren, Södermann, 2002]

Поскольку большинство не обнаруженных деревьев были небольшими, они не внесли существенного вклада в суммарный объем стволов. Объем ствола обнаруженных деревьев сравнивался с объемом ствола всех деревьев. Объемы стволов обнаруженных деревьев были рассчитаны по значениям диаметра ствола и высоты дерева, полученным с помощью лазера и измеренных в полевых условиях, и сопоставлены с объемом всех деревьев на пробных площадях, полученных по данным полевых измерений. Общий оцененный лазером объем обнаруженных деревьев составил 89 % от фактического общего объема, а объем, оцененный по тем же деревьям в полевых условиях, составил 91 % от общего объема [Persson, Holmgren, Södermann, 2002].

На рис. 11, а высота деревьев, оцененная с помощью лазера, сопоставлена с высотой 135 деревьев, измеренной в полевых условиях. Лазерная оценка объяснила 98 % изменчивости высот деревьев, полученных в полевых условиях. На рис. 11, б показан рассчитанный с помощью лазера диаметр кроны, сопоставленный с диаметром кроны, измеренным в полевых условиях для тех же деревьев. Коэффициент детерминации оказался равным 0,58, т. е. лазерная оценка объяснила 58 % изменчивости диаметров крон в полевых условиях. При использовании произведения лазерных оценок

диаметра кроны и высоты дерева для расчета «лазерных» оценок диаметра ствола последние были сопоставлены с полевыми данными о диаметре стволов тех же деревьев (рис. 11, в), и было установлено, что лазерные оценки объясняли 83 % изменчивости полевых оценок диаметра ствола. Кроме того, объем ствола деревьев, рассчитанный с использованием лазерных измерений высоты дерева и диаметра ствола, был сопоставлен с объемом ствола, рассчитанным в полевых условиях по высоте дерева и диаметру ствола (рис. 11, г), и было установлено, что «лазерная» оценка объема ствола объясняет 88 % изменчивости фактического объема [Persson, Holmgren, Södermann, 2002].

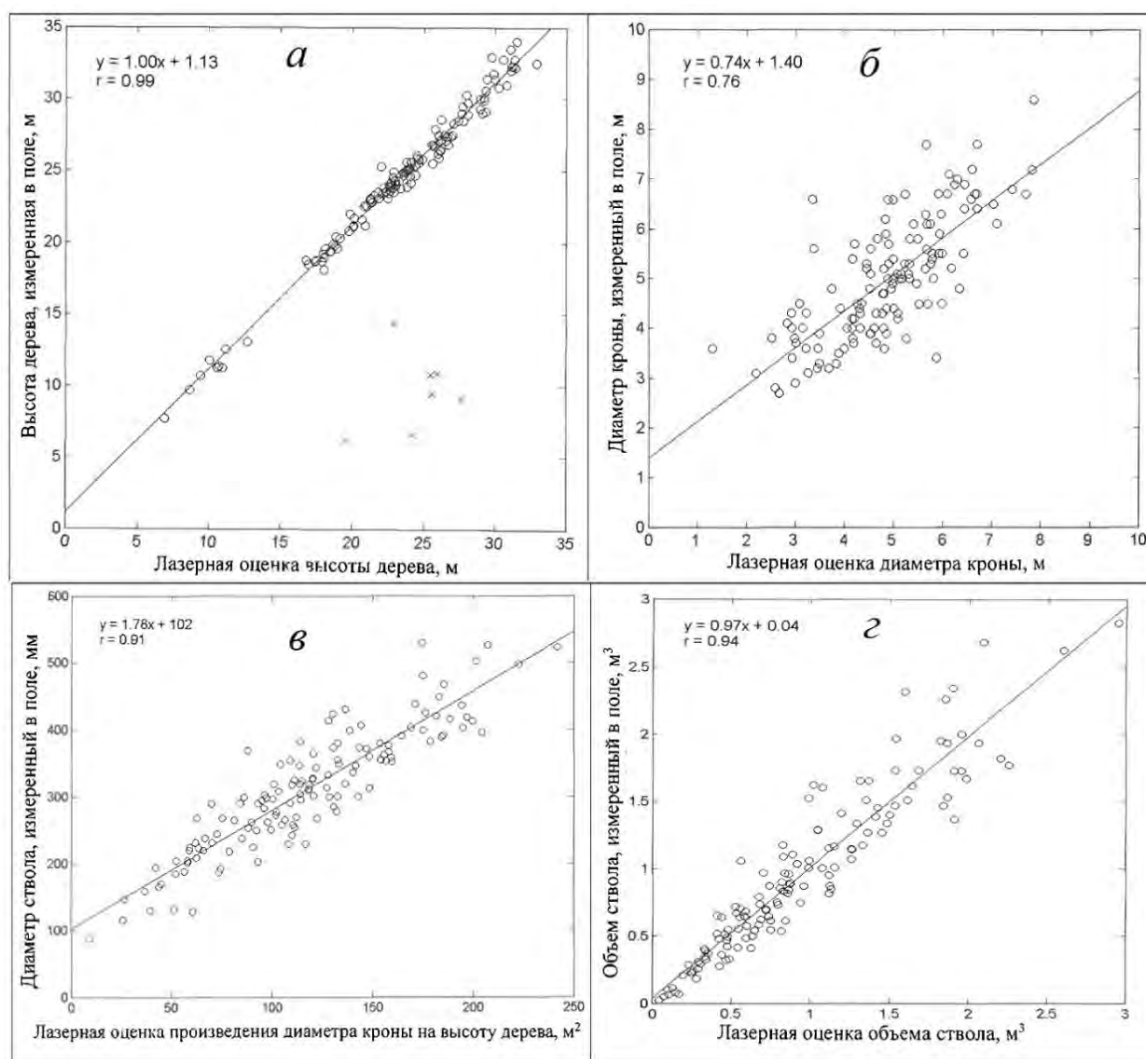


Рис. 11. Линейные связи полевых замеров с лидарными оценками:
 а – высоты деревьев; б – диаметра кроны; в – диаметра ствола;
 г – объема ствола [Persson, Holmgren, Södermann, 2002]

Наряду с изложенным выше методом сегментации крон была осуществлена сегментация кроны по методу локального максимума с переменным размером окна, зависящим от высоты дерева [Persson, Holmgren, Södermann, 2002]. Исследования были проведены на юго-востоке США в штате Вирджиния в насаждениях разного видового состава с целью разработать и тестировать алгоритмы оценки высоты деревьев с использованием лидарных данных. Существующие алгоритмы обработки лидарных данных реализованы с помощью фирменного программного обеспечения и, как правило, используют фильтрацию растительности для получения модели рельефа местности. Основная задача обработки, которую необходимо выполнить, прежде чем пытаться оценить параметры насаждения, – это определение характеристик рельефа местности и создание цифровой модели рельефа. Эта уникальная возможность лазерного сканирования напрямую замерять уровень поверхности земли, проникая под кроны деревьев, является одним из основных преимуществ лидара перед традиционной фотogramметрией. Для определения высоты деревьев использовалось вычитание изображений с использованием интерполированных данных о первом и последнем возврате импульса [Young, Evans, Parker, 2000], хотя не все последние возвратные импульсы достигали поверхности земли. При использовании сканирующей системы *Optech ALTM 1020* проникало под полог и достигало поверхности земли лишь 20–30 % импульсов [Flood, Gutelius, 1997; Kraus, Pfeifer, 1998]. При этом более частый возврат лазерных импульсов от краев кроны, а не от верхушечного побега существенно занижал высоту дерева [Nilsson, 1996; Næsset, 1997a].

Как отмечалось выше, чтобы иметь возможность оценивать высоту лесного полога, необходимо оцифровать рельеф местности. Однако разделение лазерных точек на отраженные от земли и отраженные от крон деревьев представляет непростую задачу. На двумерном черно-белом снимке лидарных данных (рис. 12) более высокие точки представлены светлыми пикселями, а более низкие – темными. Снимок был получен путем интерполяции облака лидарных точек первого (рис. 12, а) и последнего (рис. 12, б) возврата в обычную сетку с использованием линейного кригинга². Размер ячейки интерполированной сетки составил 0,5 м. Оба изображения показывают одну и ту же область лиственного древостоя в верхней левой части снимка и молодой сосновой плантацией в его правом нижнем углу. Хотя очевидно, что на рис. 12, б показаны точки меньшей высоты с более темными пикселями, на них просматриваются и части крон лиственных деревьев. Предполагаемые возвраты от земли также заметны в молодом хвойном древостое, по-

² Кригинг, или регрессия на основе гауссовских процессов – это метод интерполяции, для которого интерполированные значения моделируются гауссовским процессом, определяемым предыдущими ковариациями.

скольку они проявляются в виде небольших участков с более темными пикселями. Очевидно, что последние возвраты не обязательно проникают сквозь плотные слои полога, чтобы зафиксировать уровень земли, и большинство возвратов по-прежнему относятся к фрагментам крон [Popescu, Wynne, Nelson, 2002].

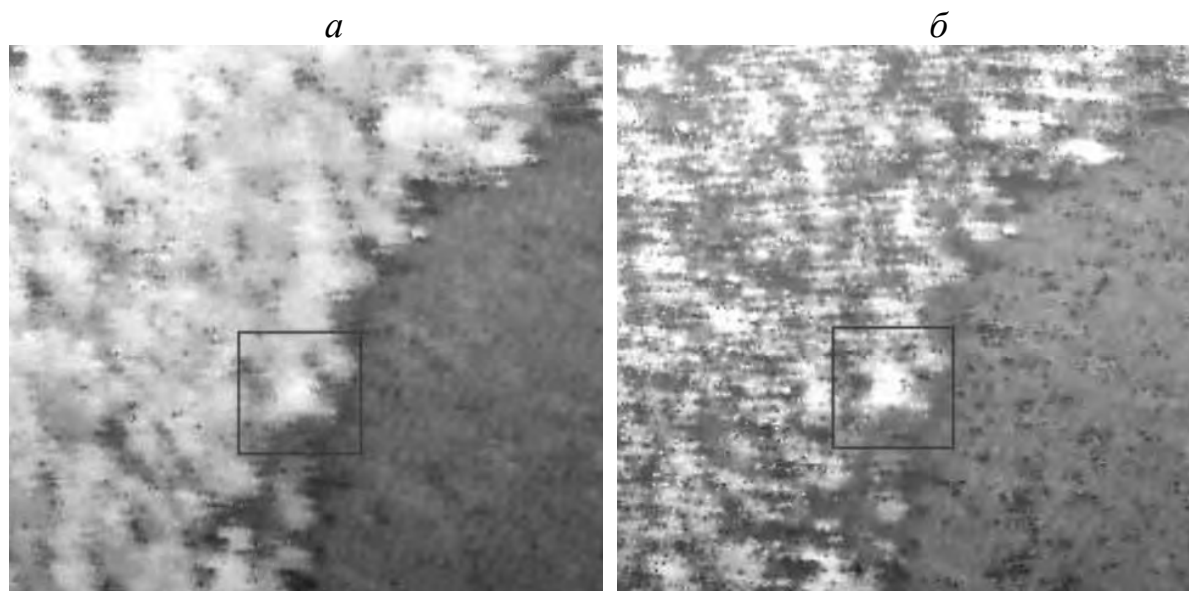


Рис. 12. Лидарное изображение лиственно-хвойного насаждения: *а* – по первым; *б* – по последним возвратам импульсов [Popescu, Wynne, Nelson, 2002]

Для построения модели рельефа местности на основе последних возвращенных лидарных импульсов применен пошаговый подход (рис. 13). На первом шаге построения модели формируется сетка с размером ячейки 5 м (рис. 14) с фиксированием минимальной высоты лазерной точки в каждой ячейке. Изображение, полученное на втором шаге алгоритма (рис. 14), сформировано путем интерполяции с использованием линейного кригинга лидарных точек, выбранных на первом этапе. Высокие точки лазерного излучения, отражающие растительность, показаны на рис. 14 в виде вершин со светлыми пикселями, а более темные «впадины» соответствуют истинным отражениям импульсов от земли.

На третьем шаге алгоритма определяются лазерные точки с использованием локального минимального фильтра с размером окна 3×3 пикселя (т. е. 1,5 м). Итоговая цифровая модель рельефа интерполируется с использованием линейного кригинга из неравномерно распределенных точек, определенных на третьем шаге. Размер ячейки сетки для интерполированной модели рельефа равен 0,5 м [Popescu, Wynne, Nelson, 2002].

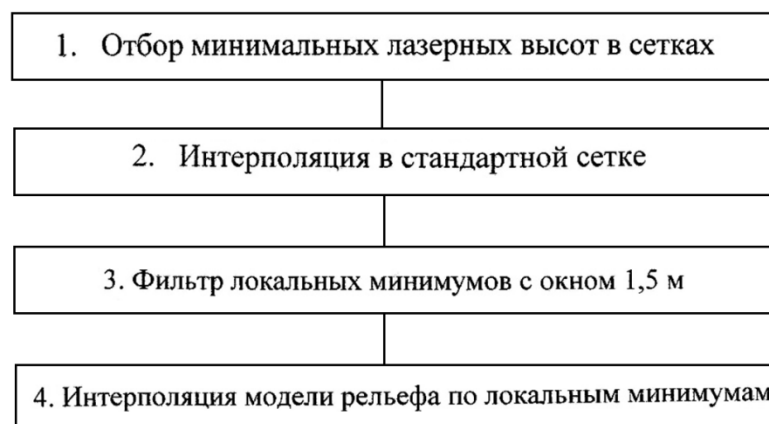


Рис. 13. Блок-схема алгоритма создания карты рельефа [Popescu, Wynne, Nelson, 2002]

Построение цифровой модели рельефа было промежуточным шагом на пути к оценке высоты деревьев. Модель высоты крон деревьев была рассчитана как разница между отражениями импульсов от крон и соответствующими значениями модели рельефа. Модель поверхности крон деревьев получена путем интерполяции первых отражений лидарных импульсов в стандартной сетке. На рис. 15 показано ортоизображение (цветная инфракрасная фотография) всего тестового участка площадью 36,5 га, покрытого данными лидара (рис. 15, *а*), и модель высоты крон на выделенном фрагменте участка (рис. 15, *б*).

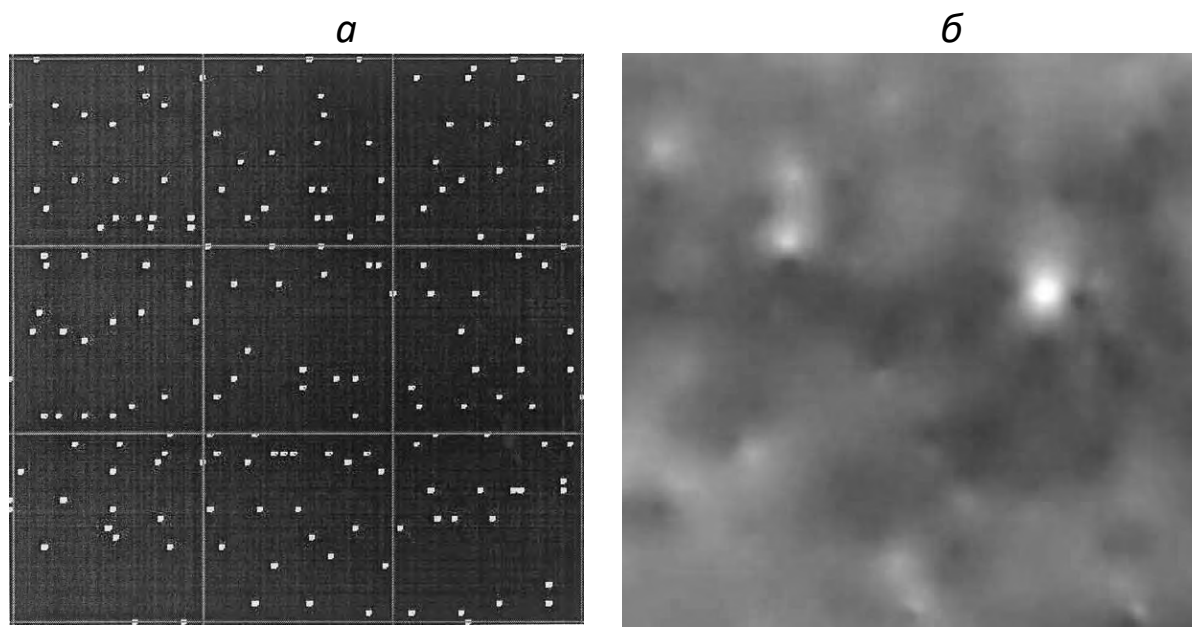


Рис. 14. Изображение, полученное на втором шаге алгоритма: *а* – наложение на лазерные точки сетки с размером ячейки 5 м; *б* – интерполированное изображение самых низких лидарных отметок в ячейках сетки [Popescu, Wynne, Nelson, 2002]

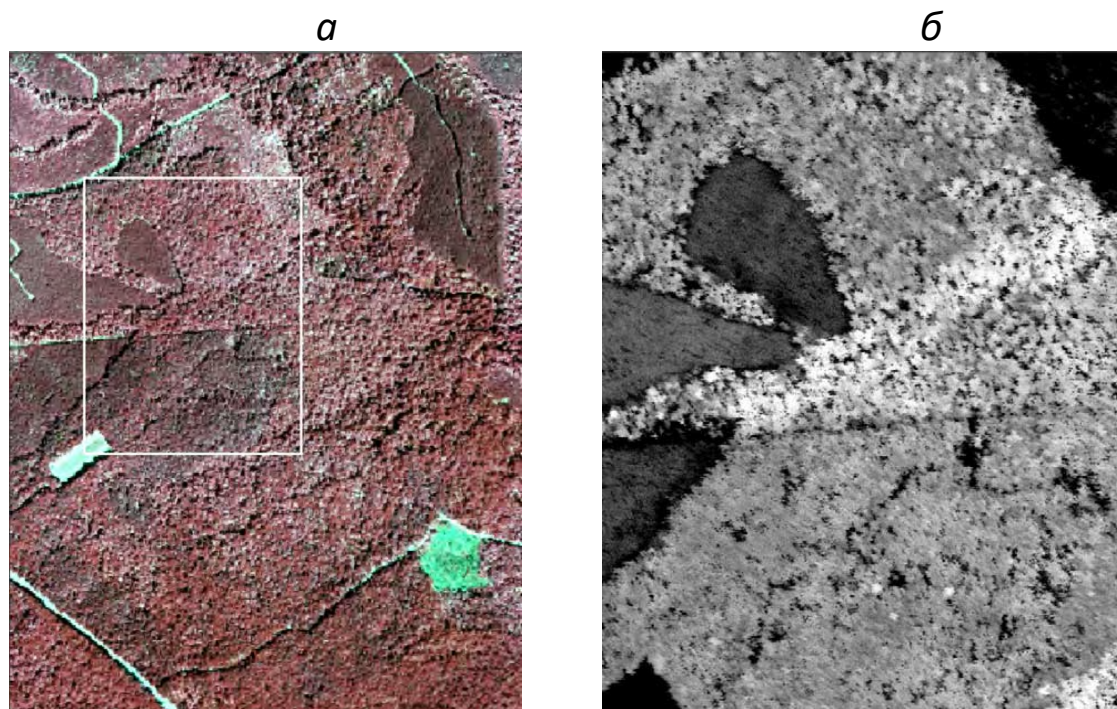


Рис. 15. Ортоизображение всего тестового участка:
 а – с выделенным прямоугольным фрагментом;
 б – модель высоты крон на выделенном фрагменте участка
 [Popescu, Wynne, Nelson, 2002]

При использовании распространенного метода, используемого для определения расположения деревьев на оптических изображениях с высоким разрешением, применяется фильтр локального максимума с окном переменного размера, заданного пользователем, обычно 3×3 , 5×5 и 7×7 пикселей [Niemann, Adams, Hay, 1999; Pinz, 1999]. Технология локального максимума, используемая для получения оптических изображений, основана на том факте, что коэффициент отражения кроны дерева обычно наибольший на ее вершине. Метод локального максимума основан на предположении, что наивысшему значению высот лазерных сигналов в кроне одного и того же дерева соответствует его вершина. Успешное определение местоположения дерева с помощью метода локального максимума зависит от тщательного выбора размера окна фильтра. Если размер фильтра слишком мал или слишком велик, то возможны ошибки при его использовании. Статичность этого метода не согласуется со сложной структурой полога лиственных и смешанных сосновых древостоев. Метод локального максимума с переменным размером окна основан на предположении, что существует множество форм и размеров крон деревьев и что фильтр переменного локального максимума должен быть настроен на размер, который соответствует пространственной структуре полога. Фильтр локального максимума лучше всего подходит для деревьев с одной четко очерченной вершиной, в частности для хвойных пород [Popescu, Wynne, Nelson, 2002].

Выбор подходящего размера окна для поиска вершин деревьев основан на зависимости между высотой деревьев и размером их кроны. Данные замеров 189 деревьев, полученные в ходе полевой таксации, были использованы для определения зависимости:

$$D_{cr} = 2,21 + 0,01022 H^2; R^2 = 0,51, \quad (1)$$

где D_{cr} – диаметр кроны, м; H – высота дерева, м. Зависимость (1) дала основу для непрерывного изменения размера фильтра локального максимума при перемещении по сетке значений лазерных высот деревьев. Согласно модели (1), размер окна варьировал от 3×3 до 25×25 пикселей, что соответствует диаметру кроны от 1,5 до 12,5 м. Алгоритм считывает значение высоты в каждом пикселе и вычисляет размер окна для поиска локального максимума. Если текущий пиксель соответствует локальному максимуму, он помечается как вершина дерева (рис. 16).

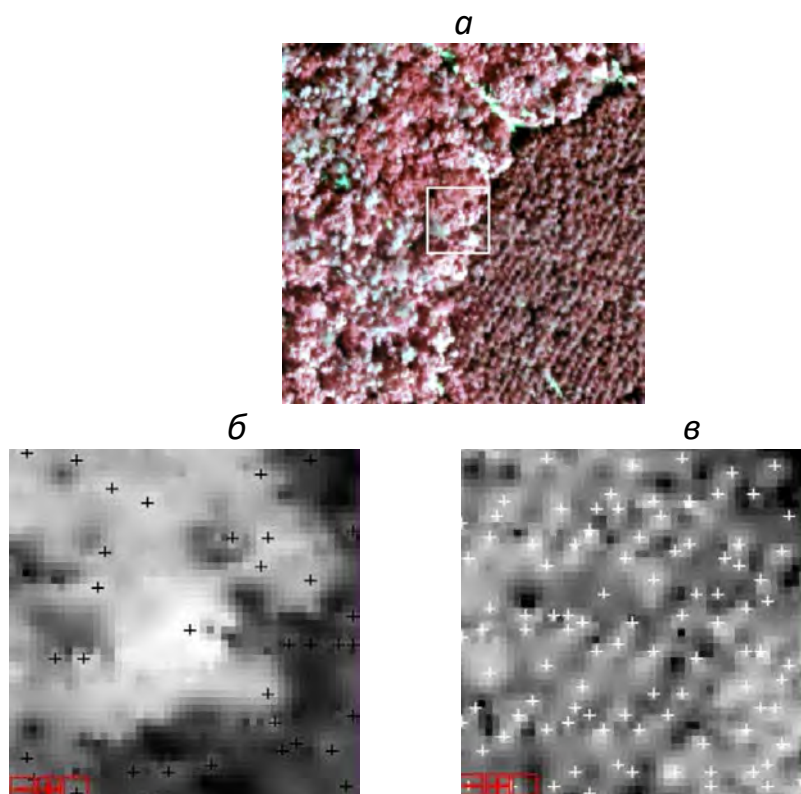


Рис. 16. Последовательность алгоритма расчета размера окна:
 а – ортоизображение участка; б – положение вершин деревьев в смешанном сосново-лиственном насаждении; в – то же в соседней сосновой плантации.
 Прямоугольник на ортоизображении показывает приблизительное местоположение на участке окна масштабирования (б), справа от которого находится окно (в)
 [Popescu, Wynne, Nelson, 2002]

С каждым пикселем связан определенный размер окна, но на рис. 17 показаны только те окна, которые идентифицировали вершины деревьев. После определения местоположения кроны каждого идентифицированного дерева производится измерение трехмерной поверхности кроны по лазерным высотам вблизи вершины дерева с целью определения его высоты. Общее количество локальных максимумов в пределах одного участка соответствует числу деревьев [Popescu, Wynne, Nelson, 2002].

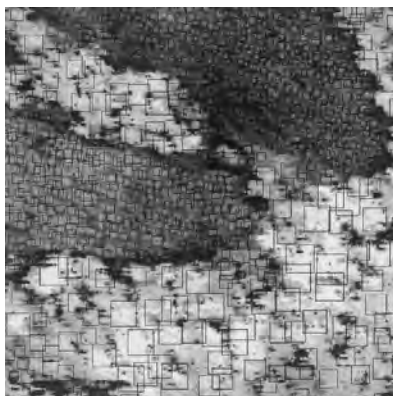


Рис. 17. Фрагмент модели высоты крон, полученной с помощью лидара, и изменяющиеся окна, которые идентифицируют вершины деревьев. Темные участки модели соответствуют густым сосновым плантациям с мелкими деревьями, в то время как более светлая область охватывает кроны лиственных пород с большими окнами [Popescu, Wynne, Nelson, 2002]

Линейная связь значений высот, оцененных с помощью лидара, с полевыми измерениями на круговых площадках оказалась недостаточно высокой: изменчивость высоты деревьев была объяснена лидарными переменными лишь на уровне 35 %. Эти результаты могут быть объяснены влиянием на расчет средней высоты промежуточных и угнетенных деревьев, измеренных в поле. Кроны таких деревьев частично или полностью расположены ниже общего уровня полога, они улавливают очень мало лазерных импульсов и оказывают очень незначительное влияние на лидарные параметры. Сказанное подтверждается высокими значениями R^2 (более 0,80) для оценки высоты доминирующих деревьев, в данном случае деревьев с диаметром ствола более 12,7 см. Верхний слой доминирующих деревьев перекрывает большую часть лазерных снимков, и таким образом оценки лучше коррелируют с их средней высотой. Господствующие и согосподствующие деревья, обладающие большим диаметром и высотой ствола, составляют основную часть объема древесины и наземной биомассы [Popescu, Wynne, Nelson, 2002].

Таким образом, установлено, что, используя данные бортового лазерного сканера, можно обнаруживать и определять параметры каждого отдельного дерева. Вероятность обнаружения дерева зависела от его относительной высоты и расстояния до ближайшего дерева и составила 71 %

от всех деревьев на пробных участках. Поскольку регистрировались самые крупные деревья, точность обнаружения объема ствола была существенно больше – 91 %. Погрешность лазерных измерений высоты деревьев (0,63 м) и диаметра кроны (0,61 м) сопоставима с погрешностью измерений, достигаемой при ручных полевых измерениях, но может быть выполнена гораздо более эффективно с точки зрения времени [Persson, Holmgren, Södermann, 2002].

Технология локального максимума с переменным размером окна учитывает фундаментальные биометрические взаимосвязи в насаждениях. Она дает более корректные результаты, по сравнению с применением статического фильтра локального максимума [Næsset, 1997a], когда произвольно подбираются только самые высокие значения в сетке с заданным размером окна. Проведенный анализ хотя и является весьма обнадеживающим, указывает на возможность улучшения результатов путем совершенствования техники сканирования в направлении полного учета всех деревьев в пологе. Последовательная блок-схема сегментации деревьев по растровой модели высоты полога показана на рис. 18 [Individual tree detection using UAV-lidar and UAV-SfM data: A tutorial for beginners, 2021].

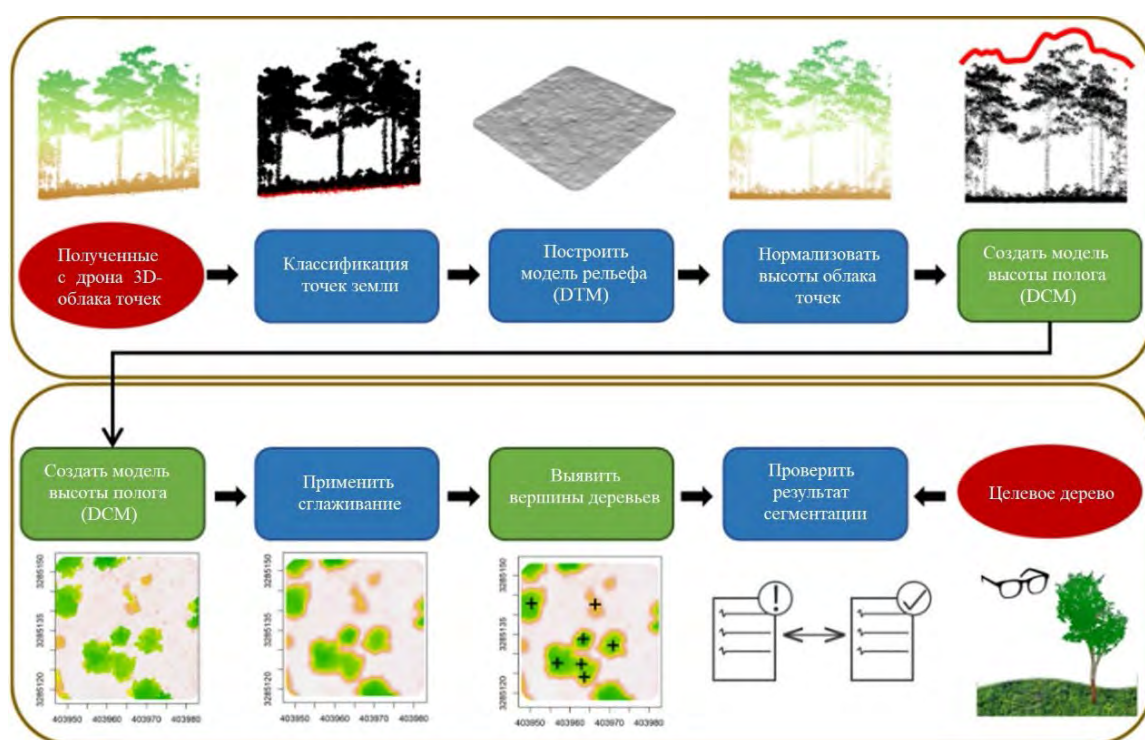


Рис. 18. Схема рабочего процесса, иллюстрирующая этапы распознавания деревьев и валидацию [Individual tree detection using UAV-lidar and UAV-SfM data: A tutorial for beginners, 2021]

Дальнейшие исследования по определению других параметров, таких как ширина кроны или сомкнутость крон, могут помочь в улучшении оценок объема и биомассы деревьев и древостоев [Popescu, Wynne, Nelson,

2002]. Благоприятные перспективы открываются в последние годы для использования беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в распознавании крон деревьев благодаря технологическим достижениям в различных областях, таких как управление «структурой из движения» (*Structure from Motion – SfM*)³, машинное обучение и робототехника.

2.1.2. Сегментация кроны по методу «растущей зоны»

При сегментации крон на основе модели поверхности полога (CSM) для идентификации отдельного дерева выполняются процедуры нахождения локальных максимумов и сегментов вокруг каждого локального максимума.

В связи с этим было выполнено исследование с постановкой следующих задач [A segmentation based method to retrieve stem volume estimates from 3-D tree height models produced by laser scanners, 2001]:

- 1) получение лазерных данных и данных полевой инвентаризации;
- 2) разработка и расчет трехмерной модели высоты деревьев с использованием лазерных данных;
- 3) автоматическое оконтуривание крон деревьев с использованием модели высоты деревьев;
- 4) получение атрибутов отдельных деревьев на основе информации, полученной с помощью лазерного сканера;
- 5) проверка разработанного метода на результатах полевой таксации древостоев.

Исследования были проведены на испытательном полигоне Калккинен на юге Финляндии, где видовой состав представлен елью европейской и сосной обыкновенной. Посредством традиционной наземной таксации древостоев на пробных площадях определены средняя высота древостоя, сумма площадей сечений и запас.

Лазерное сканирование, как известно, основано на измерении расстояния и точной ориентации этих измерений между датчиком, положение которого известно, и отражающим объектом, положение которого необходимо определить. Зная положение датчика, расстояние и угол падения при каждом измерении, можно рассчитать координаты отражающего объекта. Сканирующий механизм направляет лазерный луч вдоль линии полета, обеспечивая покрытие некоторой площади (рис. 19). Было использовано бортовое лазерное устройство *ToroSys-1*, обеспечивающее высокую частоту импульсов и большой угол сканирования от надира. Для регистрации положения несущей платформы использовались три приемника GPS: один на борту воз-

³ *Structure from Motion (SfM)* – «структура из движения» – построение 3D-структуры по набору двумерных стереоизображений.

душного судна и наземная опорная станция GPS. Зондирование выполнялось с высоты 400 м и обеспечивало плотность от 10 до 20 импульсов на 1 м. Ширина полосы сканирования составляла около 100 м. Использовались режимы первых и последних импульсов. В результате сканирования было получено облако точек с известными координатами, формирующее цифровые модели полога и рельефа. Разность между ними дала цифровую модель высоты деревьев, представляющую собой трехмерное изображение деревьев в пределах целевого лесного участка. Согласно принятой процедуре, сначала облако с координатами (X , Y , Z) преобразуется в сетку. При оценке крон отдельных деревьев требуемое разрешение составляет около 50 см, или около 10 лазерных фиксаций на 1 м. Сетка была рассчитана путем простого выбора лазерных импульсов, относящихся к определенной паре координат (X , Y). Простой, но эффективный механизм для запуска преобразований заключался в выборе максимального и минимального значений Z в каждом пикселе (X , Y), соответствующих максимальной и минимальной поверхностям. На рис. 20 показан перспективный вид полученной цифровой модели высоты деревьев на небольшом участке выборки [A segmentation based method to retrieve stem volume estimates from 3-D tree height models produced by laser scanners, 2001].

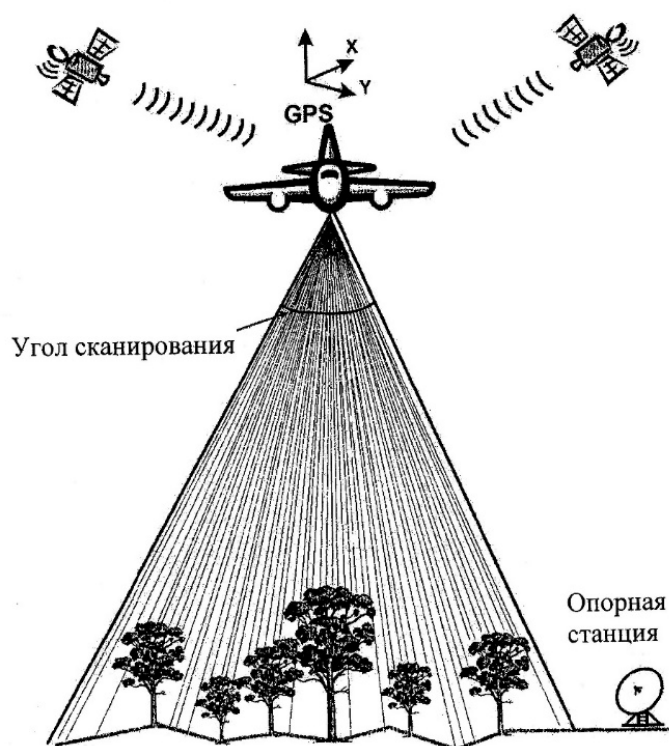


Рис. 19. Принципиальная схема лазерного сканирования лесного полога
[A segmentation based method to retrieve stem volume estimates from 3-D tree height models produced by laser scanners, 2001]

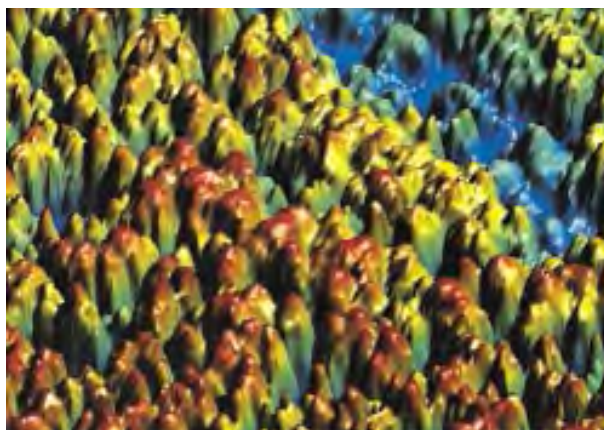


Рис. 20. Перспективный вид модели высоты деревьев, полученной с помощью лазера. Диапазон высот деревьев опосредуется псевдоцветовой гаммой: самые высокие деревья обозначены красным, а самые низкие – голубым цветом [A segmentation based method to retrieve stem volume estimates from 3-D tree height models produced by laser scanners, 2001]

Целью последующего процесса сегментации было выделение отдельных крон деревьев. Полная сегментация состояла из следующих этапов: 1) предварительная фильтрация; 2) выделение исходной точки (*seed point*); 3) расширение исходной зоны седа (*seeded region growing*). Модель высоты дерева, полученная с помощью лазерного сканера, была предварительно отфильтрована с использованием низкочастотной (диффузионной) фильтрации. Оптимальное значение масштаба рассеяния соответствовало ситуации, когда все локальные колебания интенсивности, вызванные шумом, подавляются и все ветви деревьев объединяются в область с одним максимумом, соответствующим апексу. Исходные точки соответствовали значимым локальным максимумам (рис. 21).

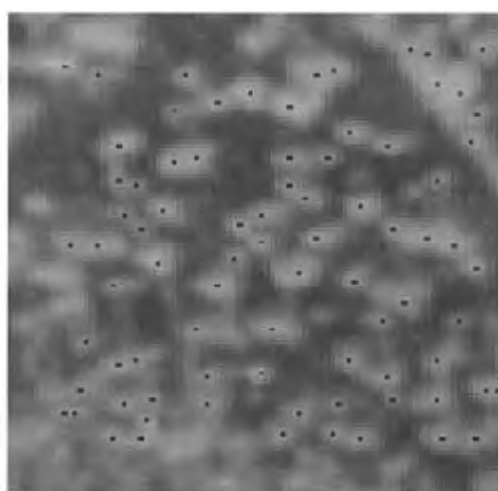


Рис. 21. Исходные точки (локальные максимумы), рассчитанные по предварительно отфильтрованному цифровому изображению [A segmentation based method to retrieve stem volume estimates from 3-D tree height models produced by laser scanners, 2001]

Очертания отдельных крон деревьев были смоделированы с помощью процесса маркировки изображений. Вначале единственными пикселями с известной меткой были исходные точки, каждая из которых имела уникальную метку – индекс исходной точки. Другие пиксельные метки были помечены как неизвестные, и сегментация представляла собой итеративный процесс фиксации меток, т. е. выделения пикселей после соответствующей исходной точки. Области одной и той же метки в модели соответствовали изображениям отдельных крон деревьев, по которым определялись высота дерева и диаметр кроны [A segmentation based method to retrieve stem volume estimates from 3-D tree height models produced by laser scanners, 2001]. По результатам сканирования 15 древостоев была оценена стандартная ошибка определения высоты деревьев, составившая $\pm 1,8$ м (9,9 %), а ошибка обычной наземной таксации составила $\pm 1,7$ м. При использовании ранее выведенной для насаждений Восточной Финляндии модели зависимости диаметра ствола на высоте груди от высоты дерева и диаметра кроны были рассчитаны сумма площадей сечений и запас как по лазерным, так и наземным замерам. Стандартные ошибки лазерной оценки суммы площадей сечений составили соответственно 2,0 и 3,4 м²/га, а ошибки оценки запаса соответственно 18,5 и 35,8 м³/га. Полученные показатели адекватности свидетельствовали о более высокой эффективности лазерных оценок по отношению к традиционным наземным. Однако из-за недостаточно корректной сегментации деревьев имеет место значительное систематическое завышение оценок высоты деревьев (0,9 м), суммы площадей сечений (3,9 м²/га) и запаса (48,3 м³/га). Названные завышенные оценки авторы объяснили тем фактом, что лазерный сканер обнаруживал в основном лидирующие деревья, т. е. лидаром оценивалась верхняя высота, а сравнивалась она со средней высотой, измеренной традиционным наземным способом. Стандартную ошибку высоты полога, равную 1,8 м, авторы связывают с ошибками наземной оценки высоты деревьев с помощью высотомера [A segmentation based method to retrieve stem volume estimates from 3-D tree height models produced by laser scanners, 2001].

При вышеописанной сегментации крон хвойных деревьев на юге Финляндии [A segmentation based method to retrieve stem volume estimates from 3-D tree height models produced by laser scanners, 2001] регистрации формы сегментов уделялось мало внимания, и предложенный алгоритм «растущей зоны» мог создавать сегменты неправильной формы. В связи с этим был предложен новый метод сегментации отдельных деревьев в насаждениях довольно неоднородной структуры, который, с одной стороны, имеет много общего с существующими методами, с другой, включает в себя новые алгоритмы для оценки высоты основания кроны, для остаточной коррекции модели поверхности полога и для управления формой сегментов кроны. Также предложен новый критерий успешности поиска деревьев, и показано, как

этот критерий может быть использован для оптимизации степени сглаживания модели поверхности полога [Solberg, Naesset, Bollandas, 2006].

Тестовый участок был представлен многоярусным насаждением ели европейской (*Picea abies* (L.) Karst.) в Норвегии. Сканирование было выполнено лазерной системой ALTM 1233 компании *Optech*, установленной на вертолете. Относительная высота каждого эхо-сигнала была рассчитана как разница между его высотой и высотой поверхности земли. Предложенный метод сегментации отдельных деревьев из облаков лазерных точек включает четыре основных этапа: 1) «чистка» (*thinning*) данных; 2) моделирование поверхности полога; 3) идентификация локальных максимумов; 4) вычленение сегментов вокруг каждого из максимумов. Как уже отмечалось, аналогичная последовательность основных этапов присутствует в большинстве ранее примененных методов. Однако в данном случае были предложены новые алгоритмы по оптимизации степени сглаживания модели высоты полога, по контролю формы сегментов и использованию остаточного анализа для окончательной коррекции модели [Solberg, Naesset, Bollandas, 2006].

В ходе первого этапа чистки данных отбрасывались эхо-сигналы, которые, скорее всего, исходили из-под поверхности кроны. Всякий раз, когда два эхо-сигнала находились рядом в направлениях X и Y , сохранялось только самое верхнее наблюдение. Использовано круглое горизонтальное окно поиска, которое было сосредоточено на каждой лазерной точке, и порог примыкания (*adjacency*) был установлен в зависимости от размера этого окна. Этот шаг содержит элемент сглаживания, т. е. чем больше окно, тем более гладкой будет модельная поверхность. Размер окна фильтра был одним из параметров, который подлежал оптимизации, и было применено четыре альтернативных значения для радиуса окна: 30, 50, 70 и 90 см [Solberg, Naesset, Bollandas, 2006].

Сохраненные лазерные точки были интерполированы в сетке размером 25×25 см. Был использован алгоритм «минимальной кривизны», который давал хорошие результаты при моделировании поверхности кроны в целом, причем с небольшими затратами времени. Поверхность была получена итеративно, начиная с плоской поверхности, оцененной с помощью линейной регрессии Z по отношению к X и Y . Затем эта плоскость итеративно сглаживалась все ближе и ближе к лазерным точкам, на каждом шаге добавляя интерполированные остатки к значению Z в каждом узле сетки, пока последовательные изменения оцененных значений Z в узлах сетки не составили менее 10 см. Модель минимальной кривизны не является точным методом в том смысле, что модель поверхности полога не проходит исключительно по лазерным точкам. Преимущество заключается в том, что она позволяет расширить поверхность до самых верхних точек на апексе дерева. В этой

сетке не было альтернативных настроек сглаживания [Solberg, Naesset, Bollandas, 2006].

Сетка минимальной кривизны в модели поверхности полого была сглажена с помощью гауссова фильтра нижних частот 3×3 , примененного ранее [A segmentation based method to retrieve stem volume estimates from 3-D tree height models produced by laser scanners, 2001; LIDAR-based geometric reconstruction of boreal type forest stands at single tree level for forest and wildland fire management, 2004]. Вес фильтра составлял $1/4$ для узла ядра, $1/8$ для соседних узлов в направлениях X и Y и $1/16$ для соседних узлов по диагонали. Повторная фильтрация повышает сглаживание, и количество запусков фильтра было вторым параметром сглаживания, подлежащим оптимизации. Было использовано четыре альтернативных числа проходов фильтра, соответственно 1, 3, 5 и 7 [Solberg, Naesset, Bollandas, 2006].

Полученная модель поверхности полого была использована для идентификации локальных максимумов и построения сегментов дерева. Локальные максимумы определены как узлы сетки, имеющие более высокие значения Z , чем их восемь соседей по сетке. Далее применен алгоритм «растущей зоны» с использованием локальных максимумов в качестве исходных точек, и был разработан алгоритм, позволяющий управлять формой сегмента. Сегменты были созданы путем последовательного расширения зоны вниз от локальных максимумов. Использовано восемь примыканий, т. е. каждый узел сетки был подключен к восьми соседним узлам. На каждом шаге новые узлы сетки добавлялись в сегмент, если выполнялись два условия. Во-первых, необходимо, чтобы соседний узел с самым крутым подъемом уже был включен в сегмент. Угол наклона был определен как ΔZ для соседей в направлениях X и Y и $\Delta Z/\sqrt{2}$ для соседей по диагонали. Во-вторых, на алгоритм наложено ограничение, чтобы получить сегменты с приемлемыми для дерева формами, т. е. допускающими только полигоны в форме звезды. Это полигоны, в которых отрезок прямой между любым узлом и локальным максимумом будет полностью находиться внутри многоугольника (рис. 22). В дополнение к получению приемлемых для дерева форм алгоритм имеет следующее преимущество: последовательность периферийных узлов может быть получена путем их сортировки по углу наклона от локального максимума, что и было использовано для ускорения процесса создания сегментного полигонального вектора [Solberg, Naesset, Bollandas, 2006].

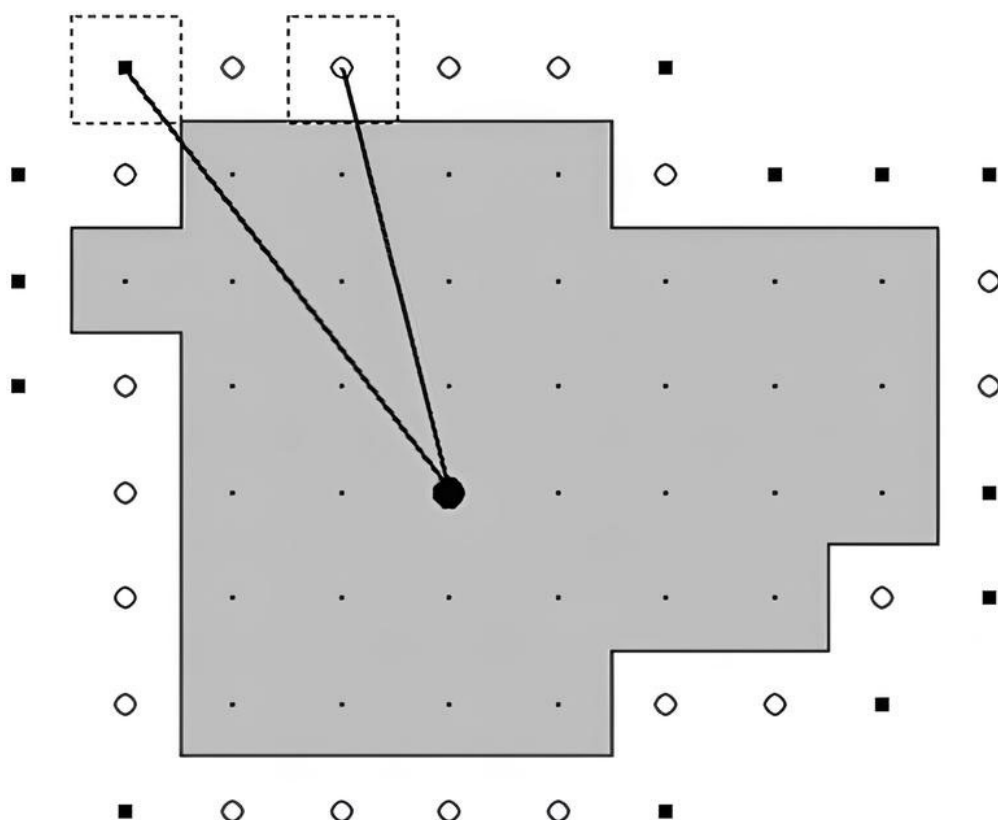


Рис. 22. Принцип ограничения сегмента в форме звезды, иллюстрируемый примером одного шага алгоритма «растущей зоны». На этом шаге сегмент (выделен серым фоном) содержит локальный максимум (●) и внутренние узлы.

Приемлемые кандидаты для следующего шага (○) имеют ту особенность, что прямая линия между ними и локальным максимумом будет полностью проходить внутри нового полигона. Включено дополнительное требование к узлам, находящимся на линии, расположенной непосредственно по горизонтали или вертикали от локального максимума: прежде чем их можно будет включить, они должны иметь все три соседних узла внутри сегмента до локального максимума внутри сегмента. Для соседних узлов, которые не являются приемлемыми кандидатами (■), эти критерии не могут быть выполнены. Это показано для двух узлов [Solberg, Naesset, Bollandsas, 2006]

После того, как сегменты были обработаны, вся модель поверхности полога была приподнята, чтобы компенсировать частичное проникновение лазерных импульсов внутрь крон [Gaveau, Hill, 2003], а также снижение модели вокруг верхушек деревьев, созданное процедурой сглаживания. Частота проникновений лазерного импульса зависит от плотности кроны и от вида деревьев. Поэтому идея заключалась в использовании фиксированного значения остаточного процентиля⁴, общего для всех участков, вместо фиксированного значения в метрах. Фактическое значение процентиля

⁴ *Процентиль* – это значение, которое заданная случайная величина не превышает с фиксированной вероятностью, заданной в процентах.

было рассчитано на основе различий между измеренными высотами деревьев и высотами их соответствующих локальных максимумов в модели высоты полога. Рассчитано среднее значение этих различий и найден соответствующий остаточный процентиль (рис. 23). Вместо средних использовались медианные значения, поскольку в некоторых случаях высокое дерево могло ассоциироваться с низким локальным максимумом, и наоборот. В подобных случаях предпочтительнее использовать медиану. Это среднее значение было применено в качестве корректировки, т. е. оно было добавлено к Z -значениям всей модели поверхности полога. Высоты локальных максимумов в этих моделях с остаточной корректировкой принимались за оценки высоты деревьев, полученные с помощью лазера [Solberg, Naeset, Bolland-sas, 2006].

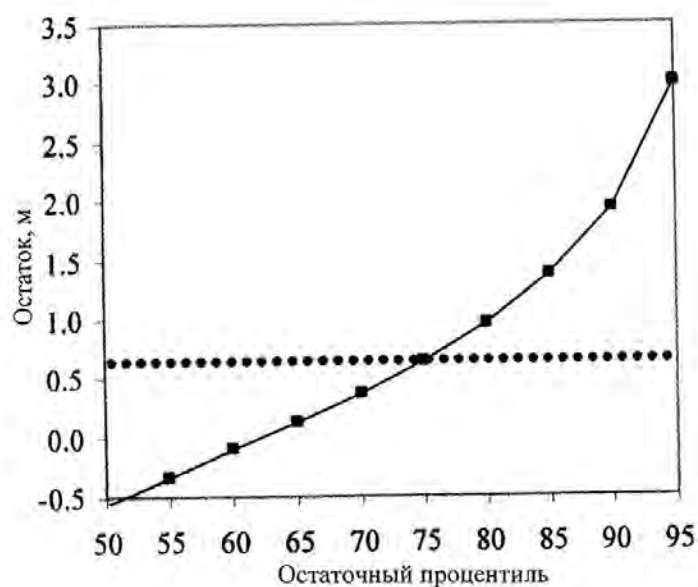


Рис. 23. Остаточные процентильные значения высоты деревьев. Горизонтальная линия представляет собой среднюю разницу между высотой деревьев в классах Крафта с 1 по 3 и высотой соответствующих локальных максимумов без учета остаточной корректировки. Эта медианная разница (62 см) соответствует 75-му процентилю остаточных значений [Solberg, Naeset, Bolland-sas, 2006]

Модель поверхности полога охватывала всю площадь и, следовательно, ряд узлов сетки в промежутках между кронами, т. е. на уровне земли или по крайней мере ниже высоты основания кроны. Далее представлен метод определения высоты основания крон для каждого сегмента с последующим удалением той части модели, которая находится ниже названной высоты. Высота основания кроны для конкретного дерева была рассчитана по облаку точек первых эхо-импульсов, которые были ограничены каждым сегментом. Для каждого из этих облаков лазерных точек рассчитаны децили распределения высот. Высота основания кроны была установлена на уровне

дециля, который имел наибольшее расстояние от нижнего соседнего дециля (пример на рис. 24). Как правило, от земли отражается много эхо-сигналов, поэтому часто несколько децилей плотно расположены вблизи земли. Вверх от них обычно мало эхо-сигналов, поэтому расстояние до следующего дециля велико, и на его уровне устанавливается высота основания кроны. Чтобы обеспечить четкое отделение отметок крон деревьев от отметок земли, минимальная высота основания кроны была определена как остаточное значение выше показанной корректировки +25 см, что в приведенных данных в совокупности составляет около 85 см [Solberg, Naeset, Bollandsas, 2006].

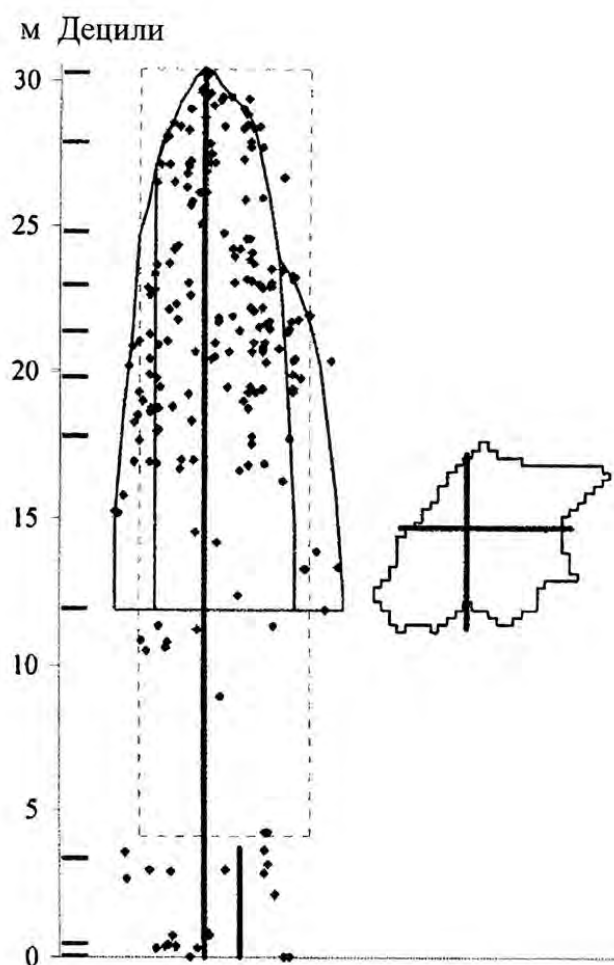


Рис. 24. Результат сегментации доминирующей ели. Слева: доминирующее дерево ели с лазерными эхо-отражениями и смоделированными очертаниями кроны, т. е. с моделью поверхности полого и высотой основания кроны. Названная модель представлена как в виде силуэта (внешний контур), так и в виде контура, проходящего через вертикальную плоскость ствола (внутренний контур). Последний соответствует алгоритму, используемому для оценки ширины кроны, полученной с помощью лазера. Пунктирной линией показаны очертания кроны, полученные по наземным замерам высоты дерева, высоты основания кроны и ширины кроны. Также показаны измеренные на земле оси основного и небольшого угнетенного дерева. Справа: вид сегмента дерева сверху с измеренными на земле радиусами кроны [Solberg, Naeset, Bollandsas, 2006]

Результат сегментации доминирующей ели (рис. 24) показал идеальное соответствие между высотой дерева, измеренной в полевых условиях, и высотой дерева, полученной с помощью лазера, а также довольно хорошее соответствие показателей по ширине кроны. Как можно видеть, смоделированная ширина кроны имеет два варианта: внутренний и внешний. Внутренний показывает ширину кроны непосредственно к северу и югу от локального максимума (т. е. от ствола), в то время как внешний показывает максимальную ширину кроны к северу и югу по облаку точек. Очевидно, что внешняя ширина кроны значительно больше внутренней, в то время как ширина кроны, измеренная вручную, находилась между ними. В целом, по совокупности деревьев смоделированная внутренняя ширина кроны дала наилучший результат, т. е. она показала наименьшее завышение и в то же время наилучшим образом соответствовала результату наземной (ручной) съемки.

Как видно из рис. 24, имеется большое расхождение между высотой основания кроны, измеренной в полевых условиях (4,1 м), и лазерной ее оценкой по модели (11,3 м). Объяснение этому расхождению может быть в том, что понятие высоты основания кроны довольно неопределенное [Chasmer, Hopkinson, Treitz, 2006; Ferrarese, Affleck, Seielstad, 2015; Modeling crown width–diameter relationship for Scots pine in the central Europe, 2017; Modelling individual tree height to crown base of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) and European beech (*Fagus sylvatica* L.), 2017]. У этого дерева было несколько живых ветвей, отходящих от ствола на высоте 4,1 м над землей, и они свисали вниз под углом около 45° . На этой высоте с левой стороны ствола можно увидеть четыре отраженных импульса. В соответствии с традиционным определением высоты основания кроны как расстояния до первой живой ветви она должна быть установлена на уровне 4,1 м. Но выше этих первых живых ветвей примерно до высоты 10 м был промежуток ствола без облиственных ветвей, и смоделированная высота основания кроны была близка к этой высоте. Метод использует для моделирования лишь первые возвращенные импульсы, в то время как для более точных оценок высоты основания кроны, особенно при плотной структуре крон, необходимо применение методов, использующих не одно, а несколько возвращенных импульсов [Solberg, Naesset, Bollandsas, 2006].

Необходимо отметить, что определение высоты основания кроны или высоты крепления кроны на стволе является проблематичным и при традиционной наземной таксации. Например, высоту основания живой кроны у деревьев ели европейской измеряли в самой нижней точке ствола, где формировалась непрерывная мутовка, состоящая по крайней мере из двух живых ветвей. Однако эта мутовка не рассматривалась в качестве основания кроны, если над ней было хотя бы три мертвых мутовки. Для бука европейского и других широколиственных пород высота основания кроны фикси-

ровалась в точке, где формировалась самая низкая непрерывная живая мутовка кроны. Однако мутовка не рассматривалась как основание живой кроны, когда на стволе под непрерывной живой мутовкой кроны, образованной ветвями, росла непрерывная мутовка из эпикормичных или придаточных побегов [Modelling crown width-diameter relationship for Scots pine in the central Europe, 2017; Modelling individual tree height to crown base of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) and European beech (*Fagus sylvatica* L.), 2017].

Диаметры кроны были рассчитаны по каждому сегменту модели поверхности полога с остаточной корректировкой после удаления ее частей ниже основания кроны. Расчет названных диаметров выполнен таким образом, чтобы они соответствовали наземным измерениям. Часто диаметр кроны определяют как диаметр круга, площадь которого соответствует горизонтальной площади сегмента кроны [A segmentation based method to retrieve stem volume estimates from 3-D tree height models produced by laser scanners, 2001; Persson, Holmgren, Södermann, 2002; LIDAR-based geometric reconstruction of boreal type forest stands at single tree level for forest and wildland fire management, 2004]. Здесь же использован алгоритм, согласно которому из локального максимума по сторонам света (рис. 24 (справа)) были взяты четыре радиуса кроны, которые были усреднены, удвоены, и таким образом получены значения диаметра кроны того или иного сегмента [Solberg, Naesset, Bollandsas, 2006].

В результате автоматической идентификации деревьев при размере окна фильтра 30×30 см и при трех проходах фильтрации было корректно обнаружено 66 % деревьев, а остальные 34 % деревьев были пропущены. В среднем по 1, 2, 3 и 4 классам Крафта доля корректно обнаруженных деревьев составила соответственно 93, 63, 38 и 19 %. При этом смещения оценок высоты дерева составили соответственно –0,6; –0,4; 0,6 и 6,4 м, а оценок высоты основания кроны соответственно 3,1; 3,8; 1,8 и 1,9 м. В целом, предложенный метод лазерной оценки занижает высоту лидирующих и завышает высоту подчиненных деревьев, завышает высоту основания кроны на 1,8–3,8 м и диаметр кроны – на 0,04–0,9 м. Среднее по классам Крафта с 1 по 3 соотношение высот деревьев, измеренных лазером и на земле, характеризуется коэффициентом детерминации 0,86 со стандартной ошибкой 1,4 м (рис. 25). Высота основания кроны не только оценивается лазерным методом с существенным завышением, но и слабо коррелирует с наземными замерами: на уровне деревьев с 1 по 3 классы Крафта названная связь имеет коэффициент детерминации R^2 , равный 0,012, но существенно выше на уровне средних значений по пробным площадям ($R^2 = 0,83$) (рис. 26). Связь значений диаметра крон, замеренных лазером и на земле, характеризуется коэффициентом R^2 , равным 0,27, со стандартной ошибкой 1,1 м (рис. 27) [Solberg, Naesset, Bollandsas, 2006].

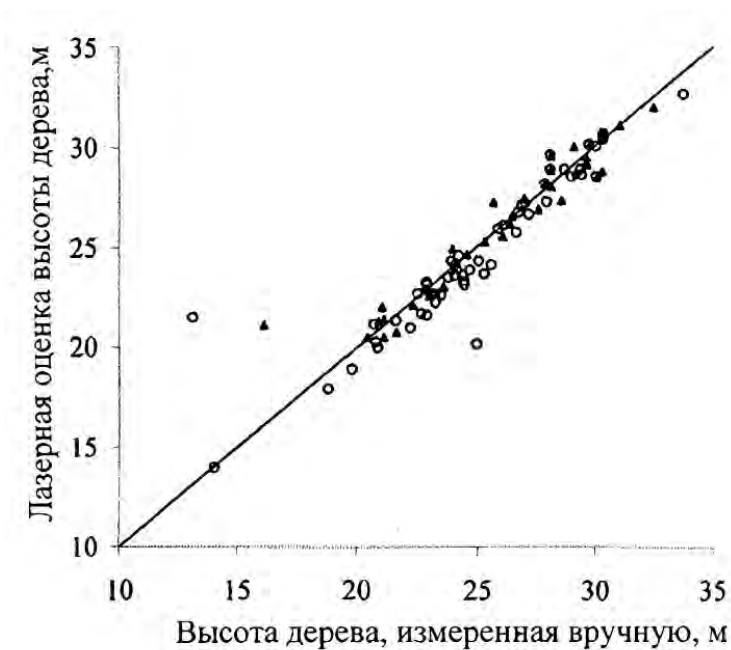


Рис. 25. Соотношение лазерной оценки высоты дерева с высотой деревьев, измеренной вручную для деревьев. Классы Крафта с 1 по 3. Здесь и далее показана линия 1:1 [Solberg, Naasset, Bollandsas, 2006]

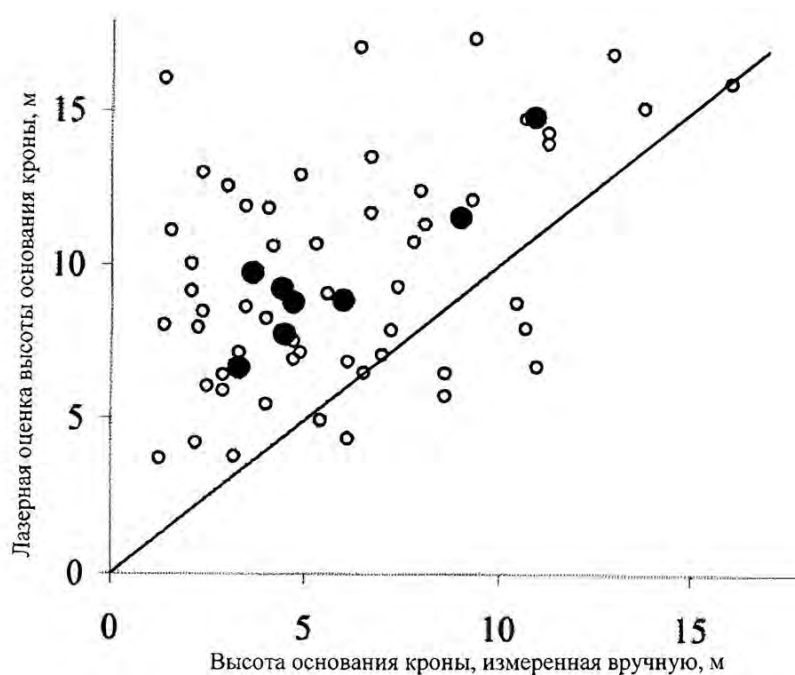


Рис. 26. Соотношение лазерной оценки высоты основания кроны с высотой основания кроны, измеренной вручную. Классы Крафта с 1 по 3. Заполненные кружки соответствуют средним значениям по пробным площадям; пустые кружки соответствуют значениям для отдельных деревьев [Solberg, Naasset, Bollandsas, 2006]

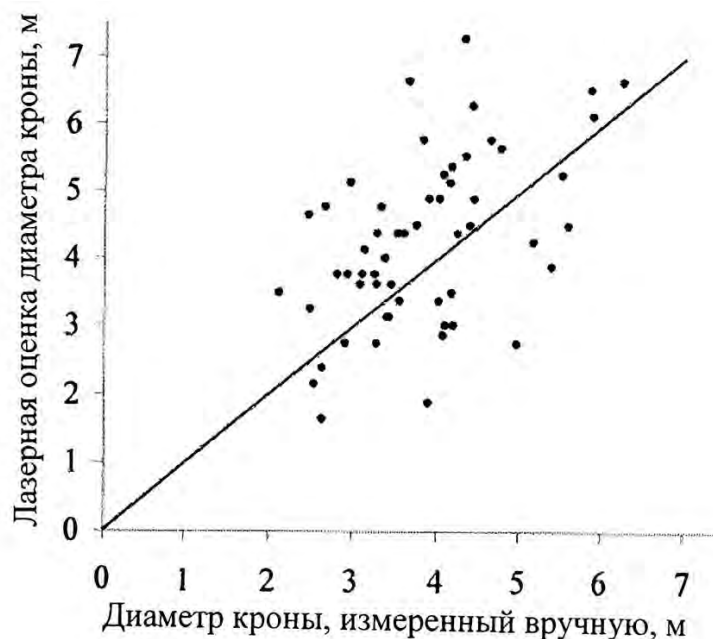


Рис. 27. Соотношение лазерной оценки диаметра кроны с диаметром кроны, измеренным вручную. Классы Крафта с 1 по 3 [Solberg, Naesset, Bollandsas, 2006]

Таким образом, при сегментации крон деревьев методом «растущей зоны» применение лазерных сканеров с высокой частотой импульсов дало возможность получить информацию на уровне деревьев и создавать точные трехмерные карты высоты деревьев, используемые для таксации насаждений. Преимуществом метода является возможность непосредственной регистрации размеров деревьев и использования полученной информации для расчета необходимых характеристик древостоя. Однако лазерные оценки дают существенные смещения по отношению к традиционным наземным оценкам, и требуется совершенствование технологии сегментации деревьев [A segmentation based method to retrieve stem volume estimates from 3-D tree height models produced by laser scanners, 2001].

Позднее был предложен продвинутый метод сегментации крон деревьев методом «растущей зоны». Его авторы [Solberg, Naesset, Bollandsas, 2006] представили новые алгоритмы для получения оценок высоты основания кроны и новые способы оптимизации степени сглаживания, управления формой сегментов дерева и использования остатков для коррекции модели поверхности полога. Облако точек использовалось для оценки высоты основания кроны и для остаточной корректировки модели, в то время как сама модель использовалась для оценки высоты дерева и ширины кроны. Однако предложенный метод лазерной оценки занижает высоту лидирующих и завышает высоту подчиненных деревьев, завышает высоту основания кроны в среднем на 3,0 м и диаметр кроны – на 0,8 м. При вполне приемлемой объяснительной способности лазерных оценок высоты дерева ($R^2 = 0,86$) объяс-

нительная способность лазерных оценок ширины кроны и высоты основания кроны существенно ниже и составила соответственно 0,27 и 0,01 [Solberg, Naesset, Bollandas, 2006].

2.1.3. Сегментация кроны по методу «морфологического водораздела»

В предыдущих параграфах было показано, что очертания отдельных деревьев в хвойных насаждениях могут быть обнаружены с помощью лазерных импульсов высокой плотности, и представлены хорошие результаты определения высоты деревьев с помощью лидарных данных в хвойных, что довольно проблематично в лиственных насаждениях [HIGH-SCAN: The first European-wide attempt to derive single tree information from laser scanner data, 2001; Solberg, Naesset, Bollandas, 2006]. В связи с этим была предпринята попытка разработки надежного алгоритма для распознавания и определения размеров крон и высот деревьев не только в хвойных, а также в лиственных и вертикально структурированных насаждениях смешанного состава умеренного пояса. Правильная сегментация крон является необходимым условием для оценки таких параметров дерева, как его положение, высота, диаметр или объем кроны. Поскольку в лесах умеренного пояса разграничение крон деревьев было по-прежнему проблематично, представленное исследование сосредоточено на улучшении разграничения крон деревьев в густых и многоярусных (сложных) древостоях с использованием алгоритма морфологического водораздела [Koch, Heyder, Weinacker, 2006].

В этом исследовании предпринята попытка использовать сегментацию отдельных деревьев по принципу морфологического водораздела, контролируемую маркерами. Сегментация по водоразделам, впервые предложенная Бьючером и Лантужулем [Beucher, Lantuejoul 1979], включает в себя преимущества других методов сегментации, в том числе метода «растущей зоны».

Понятие «морфологический водораздел» основано на представлении изображения как трехмерной поверхности, заданной двумя пространственными координатами и уровнем яркости в качестве высоты рельефа (рис. 28). В такой «топографической» интерпретации рассматриваются точки трех видов: 1) точки локального минимума; 2) точки, находящиеся на склоне, т. е. с которых вода скатывается в один и тот же локальный минимум; 3) точки, находящиеся на гребне или пике, т. е. с которых вода с равной вероятностью скатывается более чем в один такой минимум.

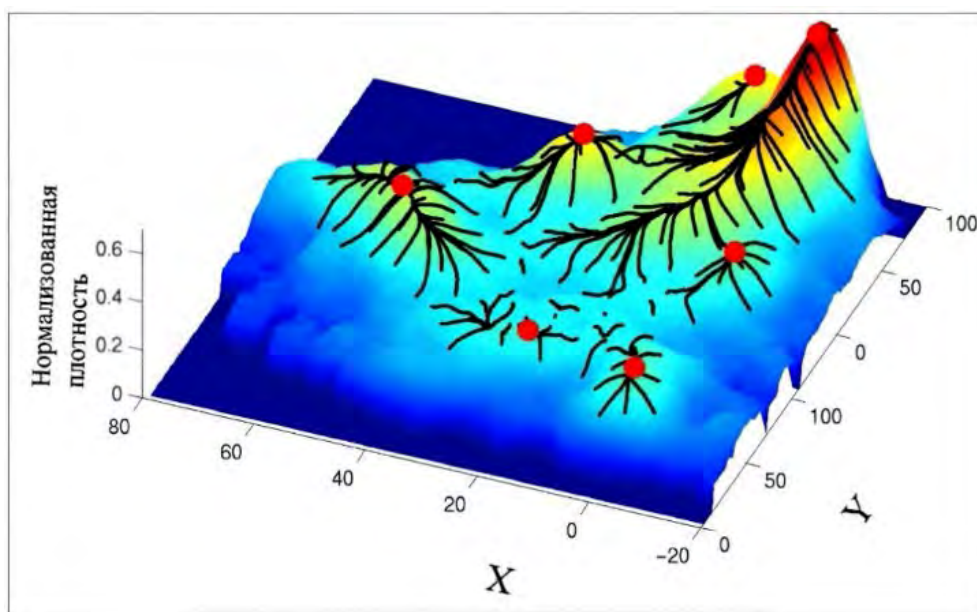


Рис. 28. Пример двумерного пространственного изображения. Максимумы соответствуют местам наибольшей концентрации пикселей [Comaniciu, Meer, 2002]

Алгоритм морфологического водораздела работает с изображением как с функцией от двух переменных $f = I(x, y)$, где x и y – координаты пикселя (рис. 29). Значением функции может быть интенсивность градиента. Если по оси $0z$ откладывать абсолютное значение градиента, то в местах перепада интенсивности образуются хребты, а в однородных областях – плоские поверхности. После нахождения минимумов функции f идет процесс заполнения «водой», который начинается с общего минимума. Как только уровень воды достигает значения очередного локального минимума, начинается его заполнение водой. Когда два региона начинают сливаться, строится перегородка, чтобы предотвратить объединение областей. Вода продолжит подниматься до тех пор, пока регионы не будут отделяться только искусственно построенными перегородками [Гонсалес, Вудс, 2005].

Чтобы избежать проблемы избыточной сегментации, была введена сегментация водораздела, управляемая маркерами [Meyer, Beucher, 1990]. Идея заключалась в том, чтобы выполнять сегментацию водораздела по указанным пользователем маркерам, а не по локальным максимумам на входном изображении. Изображение, указывающее расположение маркеров, называют *функцией маркера*, а изображение для создания водоразделов – *функцией сегментации*. Сегментация водораздела, управляемая маркером, хорошо подходит для оконтуривания деревьев. При наличии соответствующих функций маркера сегментация водораздела, управляемая маркером, может быть использована для определения границ отдельных крон. Это свойство метода определяет его преимущество, по сравнению с методами локальных трансект или профилирования [Popescu, Wynne,

Nelson, 2003], которые позволяют получить радиусы кроны только в ограниченных направлениях [Isolating individual trees in a savanna woodland using small footprint lidar data, 2006].

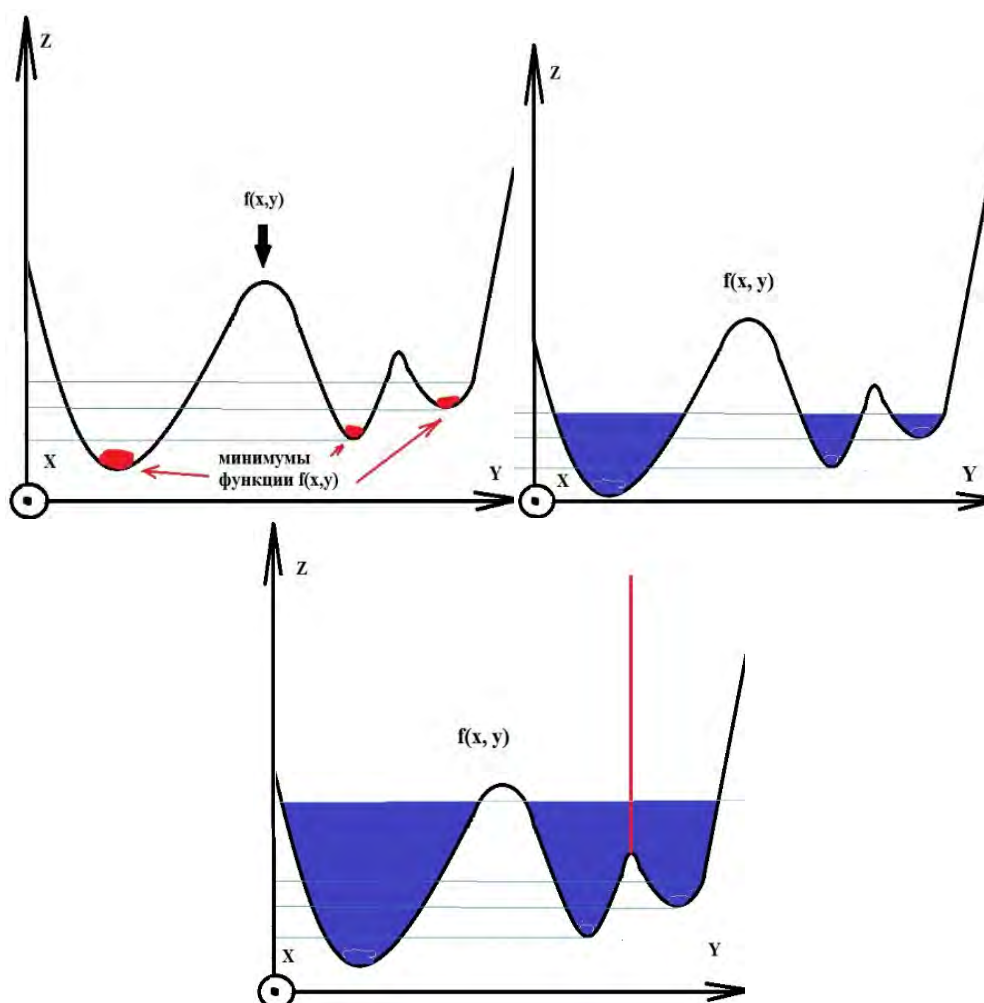


Рис. 29. Иллюстрация процесса заполнения водой (сегментация по морфологическим водоразделам)⁵ [Гонсалес, Вудс, 2005]

На юго-западе Германии были подобраны два тестовых участка таким образом, чтобы охватить как можно большее разнообразие таксационных характеристик лесных насаждений. Данные лазерного сканирования были получены с помощью системы *Falcon* [ToroSys, 2003] компании *ToroSys, Inc.* весной и летом 2002 г. В то время как данные весенних полетов без учета листьев на широколиственных деревьях были использованы для расчета точной цифровой модели рельефа, данные, собранные летом, были использованы для определения границ деревьев и оценки их высоты. Лидарный датчик системы *ToroSys* обеспечивает общую частоту импульсов

⁵ Обзор алгоритмов сегментации // Хабр : [сайт]. URL: <https://habr.com/ru/companies/intel/articles/266347/> (дата обращения: 02.12.2025).

83 кГц. Регистрируются первый и последний эхо-сигналы каждого импульса. Полеты выполнялись на высоте от 400 до 850 м с плотностью лазерных сигналов от 5 до 20 точек/м². По данным компании *TopoSys, Inc.*, относительная точность определения местоположения каждой лазерной точки по горизонтали составляет менее 0,5 м и по вертикали – менее 0,15 м [Koch, Heyder, Weinacker, 2006].

Для всех отраженных сигналов сохранялось положение точек отражающего объекта (X , Y и Z). Точки на поверхности земли и на поверхности лесного полога были определены с помощью алгоритма активной поверхности [Elmqvist, 2000], основанного на принципе минимизации энергии, формирующей поверхность, на которую воздействуют внутренние и внешние силы. Эта поверхность действует как магнитный объект, который будет притягиваться лазерными точками, которые также действуют как маленькие магниты. Кроме того, на поверхность воздействуют гравитационные силы. Наконец, в качестве внутренней силы вводится коэффициент упругости. При одновременной минимизации всех названных сил достигается баланс с помощью итеративного процесса минимизации. Конечным результатом этого процесса является цифровая модель поверхности на фоне регулярной сетки, где значения в оттенках серого представляют высоту. Разрешающая способность по высоте составила 1 см [Koch, Heyder, Weinacker, 2006].

В качестве контрольных данных были использованы координаты деревьев, диаметры на высоте груди и проекции крон 98 модельных деревьев (49 дугласий и 49 грабов), которые были измерены наземным способом на одном участке и стереоскопическим дешифрированием аэрофотоснимков – на другом. Компьютерный анализ был выполнен на языке C++ с использованием библиотек системы обработки изображений *HALCON* [HALCON, 2003]. В ходе предварительной обработки сначала вычисляется цифровая модель высоты крон путем вычитания отметок полога из отметок земли. Модель отображает неровную поверхность кроны, в частности крупные лиственные деревья имеют большие перепады высот в пределах одной кроны. У одной кроны может быть несколько вершин меньшего размера, что затрудняет обнаружение целевого дерева. Незначительные отклонения по высоте корректируются путем гауссова сглаживания, но при большом пороге сглаживания небольшие деревья могут быть потеряны [Koch, Heyder, Weinacker, 2006].

Для снятия названной проблемы интенсивность сглаживания поставлена в зависимость от высоты деревьев. С помощью порогового оператора цифровая модель высоты крон разделена на два класса высоты (деревья меньшие или равные 20 м, и деревья, превышающие 20 м). Для снижения краевого эффекта «окна» меньшего размера в пределах области одного класса высоты закрываются. Каждый класс высоты фильтруется отдельно с помощью функции Гаусса (при значениях 0,81 и 2,0 соответственно для мелких и высоких деревьев), а затем обе части соединяются (рис. 30). В ходе

предварительных тестов путем визуального анализа предварительных результатов сегментации были определены оптимальное количество классов высоты, пороговое значение высоты и интенсивность сглаживания [Heyder, 2003].

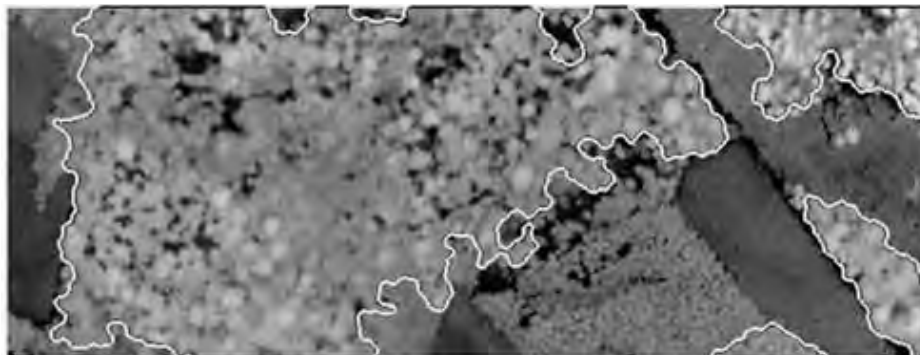


Рис. 30. Цифровая модель высоты крон разделена на два класса высоты и сглажена с регулируемой интенсивностью [Koch, Heyder, Weinacker, 2006]

В сглаженной цифровой модели вершины деревьев обнаруживаются с помощью фильтра локального максимума. Пиксель считается локальным максимумом, если все его соседи имеют меньшее значение высоты или если все соседи некоторых соединенных пикселей одинаковой высоты («плато») имеют меньшее ее значение. Начиная с этих локальных максимумов, области расширяются до тех пор, пока существуют соседние пиксели с меньшим или таким же значением высоты (алгоритм «заливки», реализованный в *HALCON*). Перекрывающиеся области в «долинах высот» в конечном итоге равномерно распределяются по всем задействованным деревьям. Данный алгоритм напоминает процесс полива горы водой, что делает его похожим на перевернутый классический алгоритм структурного водораздела [Soille, 1999]. Алгоритм «полива» дает первое приближение к реальной форме кроны дерева (рис. 31).

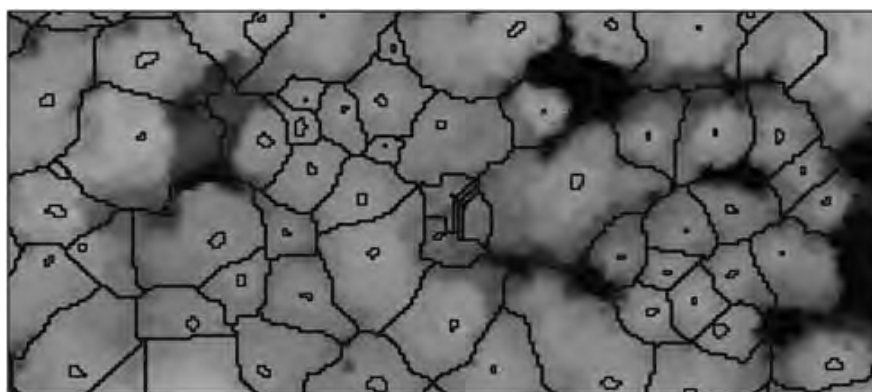


Рис. 31. Результат работы алгоритма «заливки». Начиная с локальных максимумов, области расширяются до тех пор, пока существуют более низкие значения серого.

Крошечные площадки внутри областей кроны – это максимумы или плато [Koch, Heyder, Weinacker, 2006]

Тем не менее еще существует множество явно «неправильных» сегментов. Некоторые области слишком малы, чтобы быть идентифицированы деревом, некоторые имеют форму, которая вряд ли может принадлежать дереву, некоторые имеют необычные пространственные соотношения, а некоторые области покрывают дерево вместе с соседним «окном» полога. Чтобы устранить подобные ошибки и улучшить результат сегментации, предпринимаются следующие шаги. Для настройки пороговых значений для последующих этапов в соответствии с высотой каждого дерева области кроны сначала разделяются на две группы в зависимости от высоты их верхушечного побега. Деревья высотой более 22 м отныне называются высокими, а высотой менее 22 м – низкими. Исходя из предположения (согласно инструкциям по таксации насаждений), что дерево имеет определенную минимальную площадь, зависящую от высоты, выбираются высокие деревья площадью менее 3 м² и низкие деревья площадью менее 1 м². Для каждой из этих областей выбирается соседняя область с самой длинной общей границей, которая соединяется с этой соседней областью (рис. 32). Верхняя точка обоих деревьев становится вершиной нового дерева [Koch, Heyder, Weinacker, 2006].

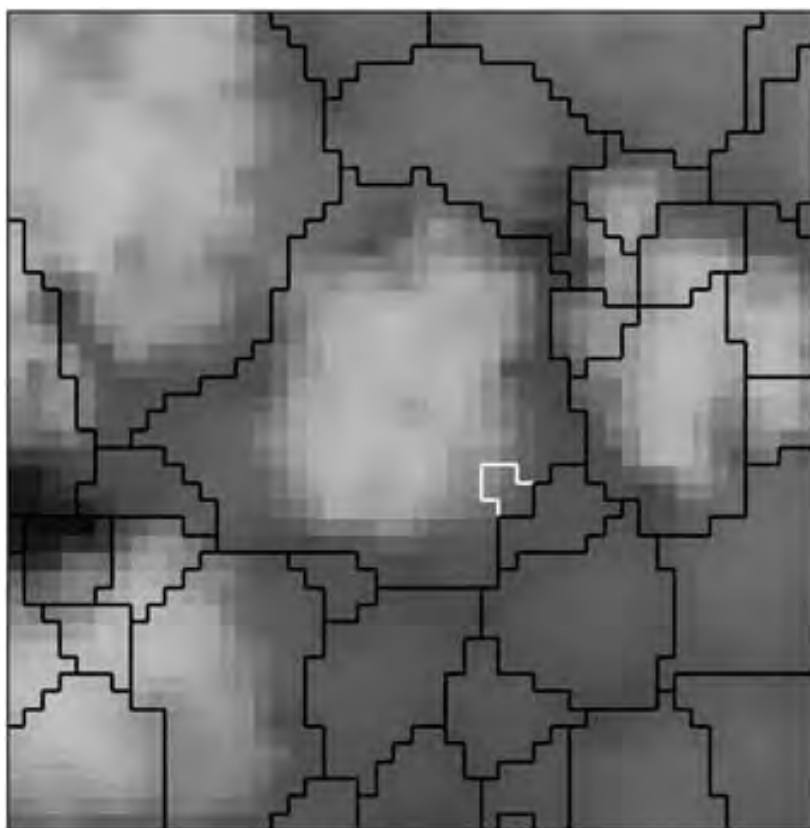


Рис. 32. Очень маленькое дерево (белое очертание) объединяется с соседней областью дерева с самой длинной общей границей. В результате получается новое дерево, состоящее из двух областей дерева, отмеченных черным очертанием. В качестве вершины нового дерева выбирается более высокое дерево из двух объединенных областей [Koch, Heyder, Weinacker, 2006]

Кроме того, предполагается, что вершины деревьев находятся на определенном минимальном расстоянии друг от друга, равном 1 м для низких деревьев и 2 м для высоких. Если вершины двух деревьев находятся на данном расстоянии, соответствующие сегменты кроны объединяются (рис. 33). Чтобы избежать проблем в молодняках с небольшими деревьями, на каждом шаге алгоритма сегментации только четыре исходных области могут быть объединены в одну новую.

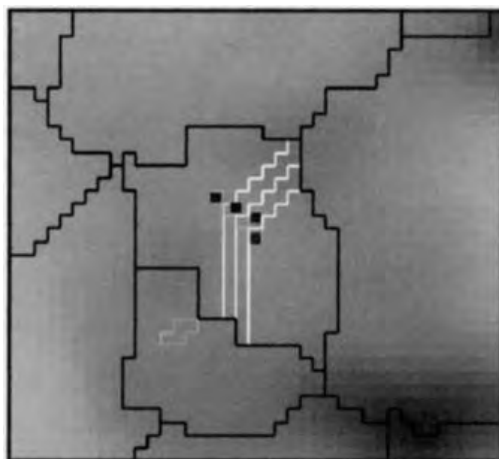


Рис. 33. Фрагмент сегментации. Показаны четыре области, которые ограничены темно-серой линией, а между ними – белыми линиями. Четыре очень маленьких черных пятна обозначают четыре вершины деревьев. Если локальные максимумы (черные точки) двух сегментов расположены близко друг к другу (менее 1 м для низких и 2 м для высоких деревьев), соответствующие области (белые) объединяются.

В данном случае четыре области объединяются в новую. В качестве вершины объединенного дерева выбирается самая высокая вершина дерева [Koch, Heyder, Weinacker, 2006]

После прохождения предыдущих этапов определения границ крон остаются группы деревьев, которые невозможно разделить. Это эллипсоидные группы, которые определяются с помощью комбинации минимальной площади и анизометрии области (отношение двух радиусов контурного эллипса). Если длина области как минимум в 2,5 раза превышает ее ширину, а площадь как минимум в три раза превышает соответствующую минимальную площадь для ее высотного класса, она помечается как группа. Эти конгрегации разделены аналогично подходу [Straub, Heipke, 2001], разработанному для групп деревьев внутри агрегации (рис. 34). Для каждой группы деревьев определяется самый большой внутренний круг и вычитается из этой области. Затем определяется и вычитается самый большой внутренний круг из оставшейся области и т. д., пока площадь круга не станет меньше удвоенной минимальной площади для данного класса высоты. Впоследствии круги расширяются до тех пор, пока разница в высоте между но-

вым и старым граничными пикселями не превысит 60 см, пока новые области не соприкоснутся друг с другом или пока не будет достигнута граница исходной группы.

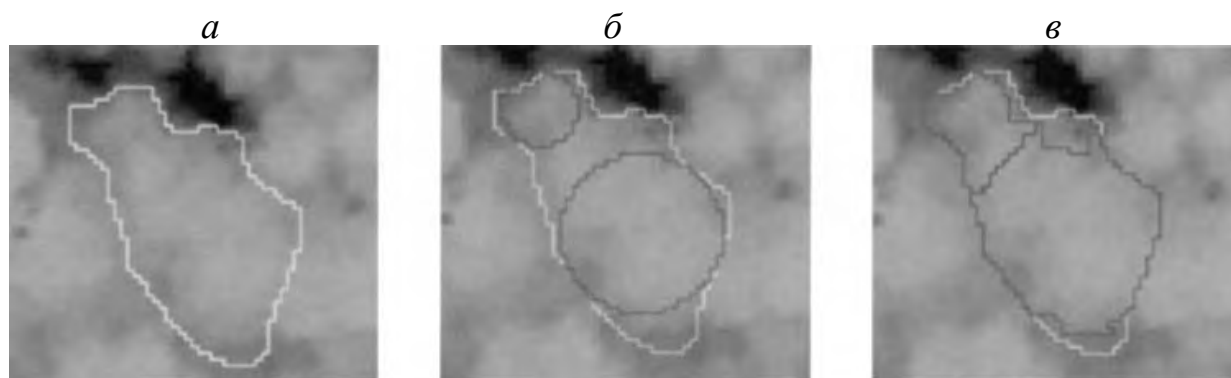


Рис. 34. Разделение групп деревьев: *а* – эллипсовидная группа деревьев разделяется путем: *б* – вычитания внутренних окружностей; *в* – последующего расширения полученных областей [Koch, Heyder, Weinacker, 2006]

Чтобы отделить дерево от соседних просветов в пологе или от соседних растений нижнего яруса, на последнем этапе алгоритма вычленения дерева определяется фактическая кромка (*edge*) кроны. Используется алгоритм, разработанный группой ученых из Университета Фрайбурга в рамках проекта *HighScan* [HIGH-SCAN: The first European-wide attempt to derive single tree information from laser scanner data, 2001; Friedländer, 2002], который позволяет обнаруживать кроны деревьев с помощью векторов поиска. В отличие от названного подхода, в данном случае алгоритм используется только для определения финальной кромки кроны на основе предыдущих результатов сегментации, что только уменьшает площадь дерева, но не увеличивает ее (рис. 35). Начиная с вершины дерева, вычисляется вектор, ведущий к каждой пограничной точке. Для каждого вектора с шагом в один пиксель уклон кроны дерева в каждой из этих точек измеряется как разница высот между двумя точками. Если этот перепад высот превышает 2,5 м на расстояние 0,5 м, вектор прерывается и создается новая граничная точка. Кромка кроны перемещается внутрь, а затем удаляются случайные отклонения [Koch, Heyder, Weinacker, 2006].

При оценке результата сегментации каждое автоматически обнаруженное дерево, расположенное на одном из участков, протаксированных с помощью наземных или фотограмметрических измерений, визуально классифицируется по одной из следующих категорий [Combined high-density lidar and multispectral imagery for individual tree crown analysis, 2003]:

- правильное разграничение;
- удовлетворительное разграничение (одно автоматически обнаруженное дерево соответствует одному эталонному дереву, но области обоих деревьев перекрываются менее чем на 60 %);

- объединенное дерево (в пределах автоматически выделенного дерева находится более одного эталонного дерева);
- разделенное дерево (в пределах одного ссылочного дерева находится более одного автоматически выделенного дерева);
- не найдено (существует эталонное дерево, но нет соответствующего автоматически выделенного дерева).

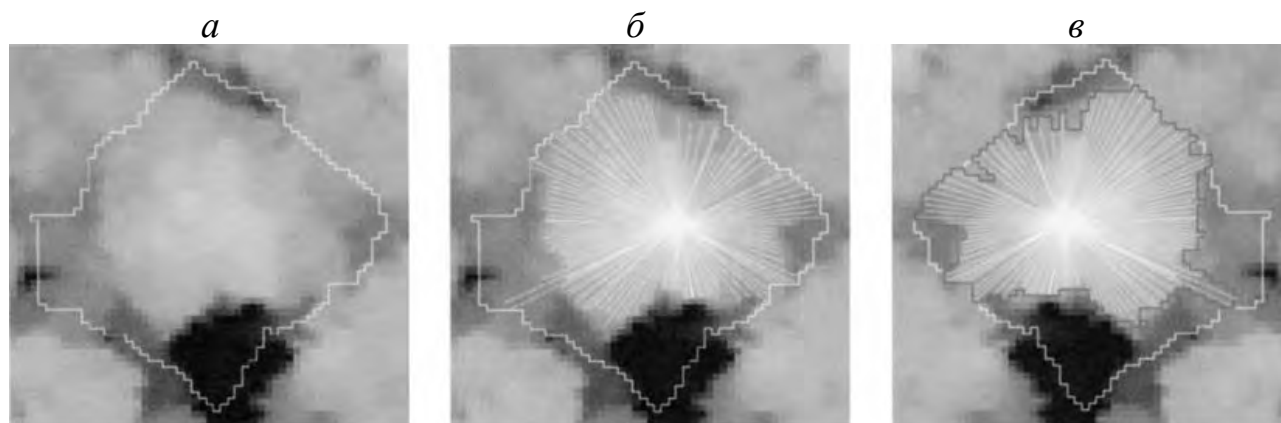


Рис. 35. Схема алгоритма обнаружения кроны дерева: *а* – отделение дерева от просвета в пологе; *б* – построение векторов от вершины дерева к каждой пограничной точке; *в* – создание новой пограничной точки, если разница высот между двумя точкам и на этом векторе превышает фиксированный порог [Koch, Heyder, Weinacker, 2006]

Каждое из автоматически обнаруженных деревьев учитывается только один раз. Деревья, сегментированные на основе цифровой базы данных о насаждениях, относятся к одному из трех классов: хвойным, молодым и спелым лиственными деревьям [Koch, Heyder, Weinacker, 2006].

Сравнение результатов сегментации с эталонными (исходными, измеренными вручную или фотограмметрически) показало, что из 49 измеренных вручную дугласий автоматически обнаружено 47 деревьев. Из них около 87 % идентифицированы правильно или по крайней мере удовлетворительно (рис. 36). Основная ошибка заключается в том, что некоторые деревья очень маленького размера не обнаружены. Площадь крон завышена: средняя площадь крон эталонных деревьев составляет 8,2 м², по сравнению с площадью, равной 11 м² у сегментированных деревьев.

Из 49 эталонных широколиственных деревьев автоматически выделенных оказалось только 30. Из них 50 % имеют хорошие или удовлетворительные очертания, а около 43 % включают несколько объединенных эталонных деревьев. В объединенные деревья включены в основном согосподствующие деревья. Частично доминантные деревья, которые образуют плотный сомкнутый однородный полог, разделить невозможно (рис. 37). По сравнению с кронами эталонных деревьев, измеренными фотограмметрически, около 62 % деревьев классифицированы как правильно и удовлетворительно сегментированные, 26 % сегментированных деревьев объединяют

два или более эталонных дерева, а около 4 % – неправомерно разделены; не было обнаружено 39 эталонных деревьев (около 8 %) [Koch, Heyder, Weinacker, 2006].

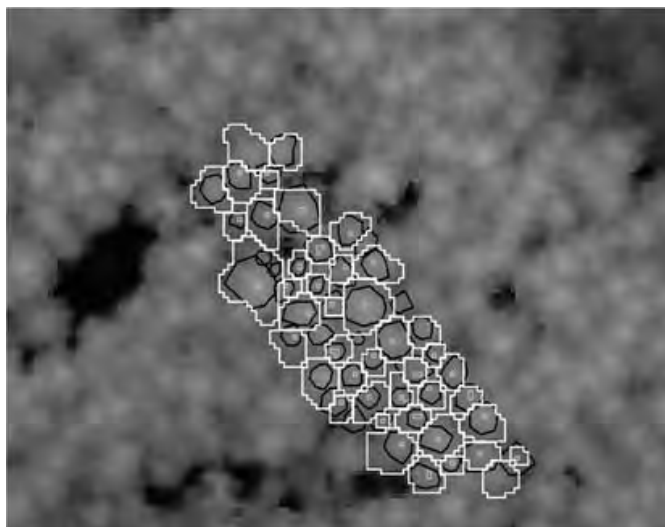


Рис. 36. Наземные измерения проекций крон дугласии (черные очертания) с соответствующими результатами сегментации (белые очертания) [Koch, Heyder, Weinacker, 2006]

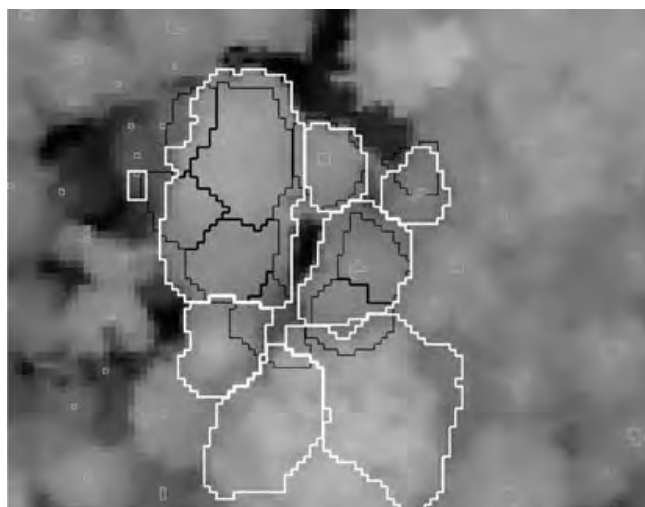


Рис. 37. Проекции крон лиственных деревьев (черные очертания) с соответствующими результатами сегментации (белые очертания) [Koch, Heyder, Weinacker, 2006]

Результаты сегментации оказались очень обнадеживающими для хвойных видов. Найдены почти все доминирующие деревья, а очертания кроны очень близки к проекциям крон, измеренным вручную. По сравнению с формой кроны, измеренной вручную, очертания сегментированной кроны иногда оказывались даже более точными, хотя площадь кроны завышена. Для лиственных пород результат автоматической сегментации значительно занижает количество деревьев, и многие эталонные деревья сливаются в одно

сегментированное. Отчасти это связано с тем, что не найдены соподчиненные деревья, а также объединяются кроны некоторых доминантных деревьев. Очень плотно растущие доминантные деревья граба с одинаковой высотой разделить не удалось. Однако, если кроны доминирующих лиственных деревьев не расположены плотно друг к другу, результат сегментации значительно улучшается. Возможно, результаты сегментации могут быть улучшены путем введения более совершенной адаптации интенсивности фильтрации к характеристикам полога [Koch, Heyder, Weinacker, 2006].

В другом исследовании, посвященном сегментации крон дуба синего (*Quercus douglasii* H.&A.) в Калифорнии по методу морфологического водораздела, было учтено, что формы маркеров и функции сегментации играют ключевую роль в разделении изображения на значимые объекты при управляемой маркерами сегментации. Была выдвинута гипотеза, что отдельные деревья лиственных пород могут быть выделены только в том случае, если соответствующие функции маркеров и сегментации генерируются на основе лидарных данных [Isolating individual trees in a savanna woodland using small footprint lidar data, 2006]. Исходя из этого, целью исследования было представление методов генерации маркеров вершин деревьев и функций сегментации на основе лидарных данных и тестирование их применения для выделения деревьев. Исследование организовано следующим образом: сначала обсуждаются методы обнаружения вершин деревьев с переменными размерами окон, и предлагается новый метод создания функций маркеров и сегментации; затем оценивается эффективность этих функций маркеров и сегментации и анализируются соответствующие ошибки [Isolating individual trees in a savanna woodland using small footprint lidar data, 2006].

Выделение деревьев из лидарных данных обычно основано на модели высоты крон, которая представляет собой разницу между высотой поверхности полога и цифровой моделью рельефа земной поверхности [HIGH-SCAN: The first European-wide attempt to derive single tree information from laser scanner data, 2001; Persson, Holmgren, Södermann, 2002; Detection and analysis of individual leaf-off tree crowns in small footprint, high sampling density lidar data from the eastern deciduous forest in North America, 2003]. Для создания модели высоты полога или цифровой модели земли использован ранее опубликованный метод [Popescu, Wynne, 2004]: сначала создается сетка, в каждой ячейке которой регистрировалась высота наибольшего первого лазерного импульса; затем высоты внутри этих ячеек были интерполированы в модель высоты полога с помощью кригинга (*kriging*). Размер ячейки сетки является важным параметром при построении модели высоты крон. Большой размер ячейки уменьшит колебания высоты кроны и затруднит обнаружение «пиков» и «впадин» в интерполированной модели высоты

полога. При очень малом размере ячейки значительно увеличивается необходимый объем памяти. Если количество импульсов на 1 м^2 (λ) не меняется в исследуемой области, среднее расстояние между импульсами составляет:

$$d = \sqrt{1/\lambda}, \quad (2)$$

а размер ячейки можно задать равным d . На практике плотность импульсов меняется из-за наличия боковых перекрытий между полосами (*swaths*), и для этого набора данных плотность импульсов выше по краям полосы. Поэтому при большой локальной плотности импульсов использованы ячейки небольшого размера. Была исследована изменчивость первых возвращенных импульсов путем наложения сетки с размером ячеек $1 \times 1 \text{ м}$. Результаты показали, что количество возвратов λ варьировало от 0 до 115 на м^2 . Большое значение λ было выбрано путем вычисления p -го квантиля λ . В этом исследовании p было установлено равным 0,99, а его соответствующее значение λ составило 44. В соответствии с уравнением (2) размер ячейки был установлен равным 0,2 м [Isolating individual trees in a savanna woodland using small footprint lidar data, 2006].

Вершины деревьев выявляются путем нахождения обычных локальных максимумов [HIGH-SCAN: The first European-wide attempt to derive single tree information from laser scanner data, 2001; Persson, Holmgren, Södermann, 2002] или локальных максимумов в пределах фиксированных или переменных размеров окон в модели высоты полога [Dralle, Rudemo, 1996]. Основная проблема, с которой приходится сталкиваться при использовании локальных максимумов для определения вершин деревьев, – это большие ошибки завышения, когда локальные максимумы, не относящиеся к вершинам деревьев, неправильно классифицируются как вершины деревьев. Вершины деревьев были обнаружены на оптических изображениях с высоким пространственным разрешением путем поиска локальных максимумов в пределах окон разного размера. Размеры окон были адаптивно рассчитаны на основе диапазона полувариаций или локальных перепадов в наклоне. На имеющемся наборе данных был протестирован метод Попеску и Уинна [Popescu, Wynne, 2004], согласно которому выведены переменные размеры окон на основе предполагаемой взаимосвязи между высотой дерева и размером кроны с последующим использованием их для идентификации вершин деревьев по данным лидара [Isolating individual trees in a savanna woodland using small footprint lidar data, 2006].

Для получения зависимости между высотой дерева и диаметром кроны названные показатели были измерены вручную с помощью модели высоты полога. Высота дерева – это максимальная высота в пределах выявленной вручную кроны. Деревья отбирались систематически по всей исследуемой территории с 53-метровыми интервалами по горизонтали и вертикали. Если в местах отбора проб не было деревьев, выбиралось ближайшее дерево.

Окончательный объем выборки составил 196 деревьев [Isolating individual trees in a savanna woodland using small footprint lidar data, 2006].

Существует несколько причин для измерения высоты деревьев и размеров крон с помощью модели высоты полога, а не в полевых условиях. Во-первых, из-за высокой плотности импульсов используемого лидарного набора данных отдельные деревья легко идентифицируются вручную с помощью названной модели. Во-вторых, при отборе деревьев в модели значительно снижается трудоемкость, и нет проблем с возможной их недоступностью в полевых условиях. Для оценки точности были случайным образом выбраны еще 26 деревьев, высота и размер кроны которых были измерены как по модели, так и в полевых условиях. В последнем случае высота каждого дерева измерялась гипсометром в восьмикратной повторности, и результаты измерений усреднялись. Диаметр кроны измеряли в двух перпендикулярных направлениях и использовали среднее значение. Средние абсолютные различия между модельными данными и полевыми измерениями составили по высоте деревьев и диаметру кроны соответственно 0,37 м и 0,58 м, что авторами [Isolating individual trees in a savanna woodland using small footprint lidar data, 2006] считалось приемлемой точностью при отборе проб деревьев по модели высоты крон. Было обнаружено, что при увеличении высоты дерева изменчивость диаметра кроны увеличивалась во все большей степени (рис. 38), что означает отсутствие гомоскедастичности при использовании линейной связи названных двух показателей. Поэтому была рассчитана аллометрическая модель [Isolating individual trees in a savanna woodland using small footprint lidar data, 2006].

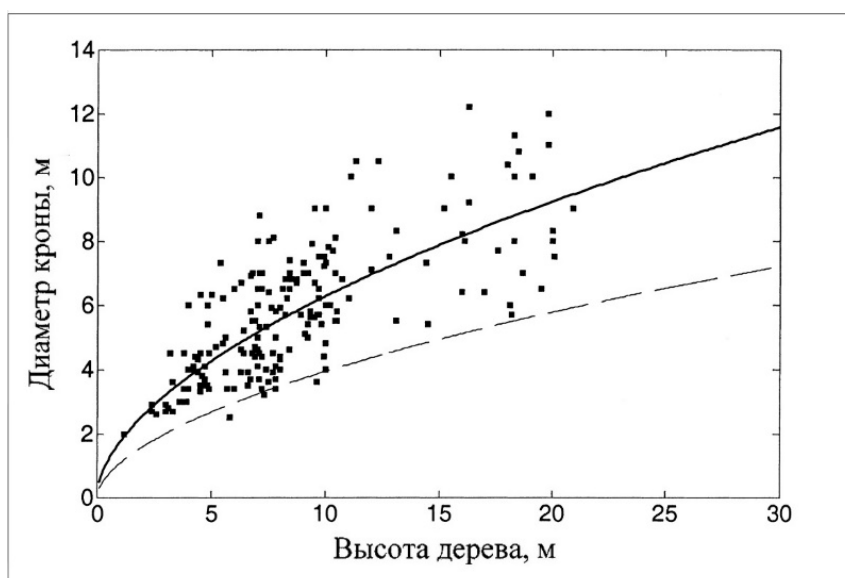


Рис. 38. Зависимость между диаметром кроны и высотой дерева, описанная моделью: $D_{cr} = 1,7425 H^{0,5566}$; $R^2 = 0,587$. Сплошная линия представляет собой регрессионную кривую, а пунктирная линия – нижний предел интервалов прогнозирования [Isolating individual trees in a savanna woodland using small footprint lidar data, 2006]

При использовании рассчитанной модели (рис. 38) снижается ошибка «избыточной» оценки, поскольку при этом выполняется поиск локальных максимумов в пределах окон большего размера для более высоких деревьев. Однако это приведет к большей ошибке «пропуска». По статистике, у половины деревьев некоторой высоты размеры крон меньше, чем расчетное значение при этой высоте (рис. 38). Возможно, вершины этих деревьев будут пропущены, если размер окна будет равен расчетному значению. В данном исследовании размеры окна были определены с помощью другой кривой, которая является нижним пределом $(1-\alpha)$ одностороннего интервала прогнозирования регрессионной модели (рис. 38). Когда α равно 0,5, нижний предел точно совпадает с кривой регрессии. При использовании этой кривой для определения размеров окон при обнаружении вершин деревьев ошибки пропуска могут быть уменьшены за счет использования небольшого значения α . Однако меньшее значение α приведет к большим ошибкам «избыточной» оценки (рис. 39, б, в). Лишь в том случае, когда размер окна меньше, чем размер кроны дерева, существует риск включения нерелевантных локальных максимумов в качестве вершин деревьев [Isolating individual trees in a savanna woodland using small footprint lidar data, 2006].

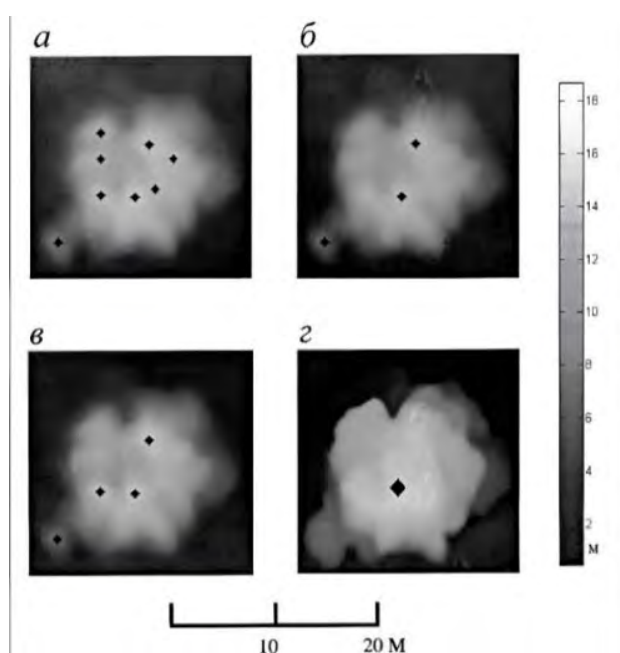


Рис. 39. Вершины деревьев, обнаруженные с использованием различных методов и параметров: а – вершины деревьев, обнаруженные с помощью модели высоты полога путем поиска локальных региональных максимумов; б – вершины деревьев, обнаруженные с помощью названной модели с использованием окна переменного размера, когда α равно 0,5; в – вершины деревьев, обнаруженные с помощью названной модели с использованием окна переменного размера, когда α равно 0,1; г – вершины деревьев, обнаруженные с помощью модели максимумов полога с использованием окна переменного размера, когда α равно 0,1 [Isolating individual trees in a savanna woodland using small footprint lidar data, 2006]

Предыдущий анализ показал, что при использовании модели высоты полога ошибки «избыточной оценки» и «ошибки пропуска» не могут быть уменьшены одновременно путем корректировки α . Эта проблема может быть решена при обнаружении вершин деревьев с помощью модели максимумов полога, которая представляет собой обычную сетку, в чьей каждой ячейке регистрируется максимальная высота лазерного излучения в пределах ближайшего окружения. По сравнению с моделью высоты полога, в модели максимумов полога можно удалить многие ложные локальные максимумы (рис. 39, з). В качестве маркеров вершин деревьев при создании модели максимумов полога используются окна различных размеров. Чтобы предотвратить заполнение «впадин» между кронами, размер окна должен быть меньше размера кроны самого низкого дерева на данной высоте. Это можно оценить статистически, получив нижний предел интервала одностороннего прогнозирования с очень малым значением α . Согласно предыдущему исследованию, максимальная густота деревьев на пологих склонах составляет около 200 деревьев на 1 га [Kiang, 2002]. Соответственно, на исследуемой площади размером 800 на 800 м произрастает максимум около 12 800 деревьев. Исходя из этого, значение α установлено равным 0,0001 [Isolating individual trees in a savanna woodland using small footprint lidar data, 2006].

В модели максимумов полога могут быть удалены не все локальные максимумы, не относящиеся к вершинам деревьев, поскольку размер окна ближайшего окружения, используемый для создания названной модели, обычно меньше размера кроны, особенно для деревьев с большими кронами при определенной высоте. Типичной процедурой для подавления нерелевантных локальных максимумов при обнаружении вершин деревьев является гауссова фильтрация [Dralle, Rudemo, 1996; HIGH-SCAN: The first European-wide attempt to derive single tree information from laser scanner data, 2001; Persson, Holmgren, Södermann, 2002; Wang, Gong, Biging, 2004]. Ранее было показано, что стандартное отклонение гауссова фильтра не столь важно [Dralle, Rudemo, 1996]. Этот вывод был подтвержден в данном исследовании, и значение параметра было установлено равным 2. Однако размер фильтра оказывает существенное влияние на сглаженную модель максимумов полога.

В данном исследовании использовались критерии, согласно которым размер фильтра не должен превышать размер кроны самого малого (в отношении кроны) дерева на исследуемой территории. Определение наименьшего размера кроны было основано на размерах крон деревьев, отобранных в модели высоты полога. Наименьший размер кроны может быть приблизительно определен на основе выборки путем вычисления нижнего предела односторонних интервалов прогнозирования для k наблюдений на уровне достоверности $(1-\alpha)$. При проверке распределения размеров крон в выборке

было обнаружено смещение вправо. Тест Жарке – Бера на соответствие нормальному распределению показал, что значение p составило 0,0016, что значительно отличалось от нормального распределения на 5 %-м уровне. При преобразовании в логарифмическую шкалу (по основанию e) значение p составило 0,2224. После преобразования к исходному масштабу было получено значение 1,0 м для минимального размера кроны, использованное далее в качестве размера гауссова фильтра. В сглаженной модели максимумов полого ложные локальные максимумы, отличные от вершин деревьев, были значительно сокращены (рис. 39, в, г). Применяя стратегию, подобную «разделяй и властвуй», можно уменьшить количество ошибок при обнаружении вершин деревьев. После того как вершины деревьев были обнаружены, они использовались для сегментации отдельных крон [Isolating individual trees in a savanna woodland using small footprint lidar data, 2006].

Процесс сегментации структурного водораздела проиллюстрирован путем моделирования наводнения [Soille, 2003]. На рис. 40, а представлена модель максимумов полого. Чтобы смоделировать процесс затопления, сначала рассчитали дополнение (*complement*) к названной модели (рис. 40, б), которое напоминает два водосборных бассейна. Предполагается, что в каждом бассейне пробито отверстие на минимальном уровне. Затем при постепенном погружении в воду водосборные бассейны будут затоплены. Можно предположить, что этот алгоритм автоматически возводит «дамбы» вдоль разделительной линии, чтобы предотвратить слияние двух соседних водосборных бассейнов (рис. 40, в). Построенные «дамбы» представляют линии водораздела и используются для разделения деревьев [Isolating individual trees in a savanna woodland using small footprint lidar data, 2006].

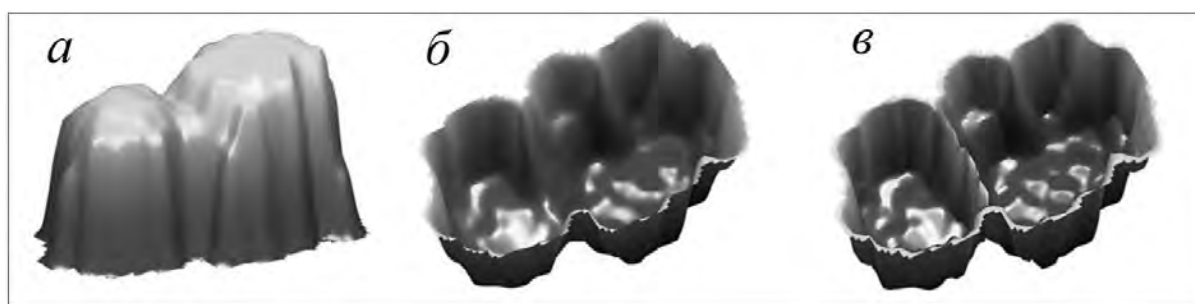


Рис. 40. Иллюстрация алгоритма сегментации водораздела: а – модель максимумов полого; б – дополнение к модели максимумов полого; в – «дамбы», построенные на разделительной линии [Isolating individual trees in a savanna woodland using small footprint lidar data, 2006]

При контролируемой маркерами сегментации водораздела дополнение к модели максимумов полого фильтруется путем наложения минимумов перед расчетом ее водоразделов, чтобы все минимумы, не относящиеся к вершинам деревьев, были удалены. Наложение минимумов позволяет рекон-

струировать дополнение к модели таким образом, что остаются только минимумы, соответствующие отмеченным вершинам деревьев. Подчеркивается важность нахождения правильной функции маркера вершин деревьев при применении метода сегментации водораздела [Isolating individual trees in a savanna woodland using small footprint lidar data, 2006].

Лиственные деревья обычно имеют относительно округлую поверхность кроны, что затрудняет обнаружение их вершин с помощью модели максимумов полого или модели высоты полого (рис. 41, а). Поскольку вершины деревьев обычно располагаются в центре кроны, это было использовано для их обнаружения. Сначала было создано двоичное изображение, где полог имел значения, равные единице, в то время как линии водораздела и фон имели значения, равные нулю (рис. 41, б). Затем для бинарного изображения было выполнено преобразование расстояний (*distance transform*), чтобы вычислить расстояние от каждого ненулевого до ближайшего нулевого пикселя (рис. 41, в). На дистанционно преобразованном изображении центр кроны имел большие значения. Как и в модели максимумов полого, для сегментации было использовано дополнение к дистанционно преобразованному изображению. В последнем вершины деревьев были обнаружены с использованием преобразования функции минимумов, подавляющей все значения, меньшие заданного порога. Локальные минимумы расстояния были отмечены как вершины деревьев. С помощью этих маркеров вершин деревьев и функции сегментации дистанционно преобразованного изображения для оконтуривания сегментов кроны деревьев была использована управляемая маркером сегментация водораздела (рис. 41, г) [Isolating individual trees in a savanna woodland using small footprint lidar data, 2006].

Поскольку в разных исследованиях используются разные методы оценки точности, сравнить точность предложенного метода с результатами других исследований довольно трудно. На юге Швеции были оконтурены сегменты крон хвойных видов, таких как ель обыкновенная, сосна обыкновенная и береза обыкновенная, и они были связаны с сегментами измеренных в поле деревьев путем поиска по всем сегментам в пределах двух пикселей ($\frac{2}{3}$ метра) вокруг полевого дерева. В итоге был корректно обнаружен 71 % деревьев [Persson, Holmgren, Södermann, 2002]. Для количественной оценки точности результатов сегментации было применено понятие нечеткости⁶ (*fuzzy concept*) и предложен индекс, значение которого равно 1, если многоугольник сегмента идеально совпадал с многоугольником, полученным в поле [Detection and analysis of individual leaf-off tree crowns in small footprint, high sampling density lidar data from the eastern deciduous forest in North America, 2003]. Значение индекса варьировало от 0,21 до 0,35 на площади в 1 га, занятой дубами, кленами и тополями. Совпадение считалось

⁶ Нечеткое понятие – это понятие, границы которого не являются четкими, а степень принадлежности к нему может варьировать.

«идеальным», когда имелось взаимно однозначное соответствие между наземными эталонными полигонами и оконтуренными лидарными сегментами, а степень их перекрытия была более 50 %. В частности, для хвойного насаждения было получено 59 %-е «идеальное» соответствие [Combined high-density lidar and multispectral imagery for individual tree crown analysis, 2003]. Авторы [Isolating individual trees in a savanna woodland using small footprint lidar data, 2006] полагают, что предложенный ими метод имеет критерии оценки точности намного более строгие, по сравнению с предыдущими исследованиями, и на основании этого считают метод перспективным.

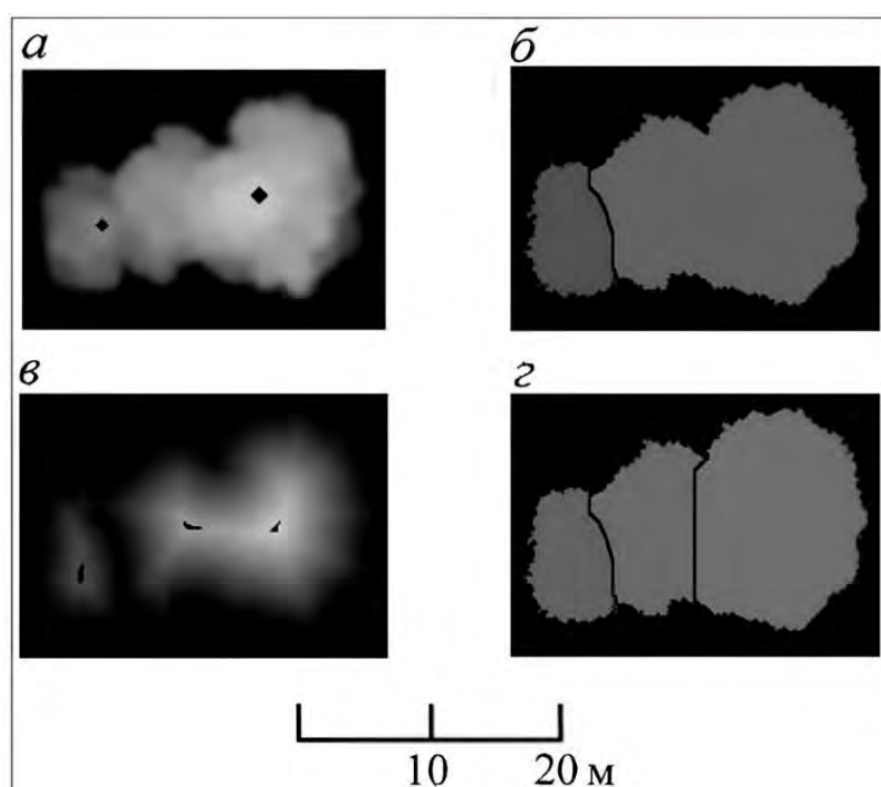


Рис. 41. Дистанционно преобразованное изображение для обнаружения вершин деревьев; *а* – вершины деревьев, найденные по модели максимумов полога; *б* – результаты сегментации с использованием вершин деревьев, найденных по модели максимумов полога; *в* – дистанционно преобразованное изображение и верхушки деревьев, обнаруженные с использованием преобразования с задаваемым порогом; *г* – результаты сегментации, основанные на дистанционно преобразованном изображении [Isolating individual trees in a savanna woodland using small footprint lidar data, 2006]

Предложенный метод обнаружения вершин деревьев был сопоставлен с тремя другими методами обнаружения деревьев, в основе которых была управляемая маркерами сегментация водораздела: согласно методу 1, вершины деревьев выявляли путем поиска локальных максимумов в пределах окон различных размеров в модели высоты полога [Popescu, Wynne, 2004],

в методе 2 вершины деревьев были обнаружены с помощью модели максимумов полого, при этом переменные размеры окон были определены с помощью нижнего предела интервала прогнозирования кривой регрессии, но дистанционно преобразованное изображение для обнаружения вершин деревьев не использовалось, и в методе 3 вершины деревьев были обнаружены путем нахождения локальных максимумов в модели высоты полого. Для названных трех методов функцией сегментации является модель высоты полого. Для сравнения методов использован индекс точности выделения дерева АТІ (*accuracy for tree isolation*) как отношение ($N_{l,l} : N_r$), где $N_{l,l}$ – количество вершин, которые имеют взаимно однозначную связь с полигоном полевых деревьев, а N_r – количество выделенных в поле вершин деревьев [Isolating individual trees in a savanna woodland using small footprint lidar data, 2006].

Значения АТІ для названных трех методов составили соответственно 37,0, 54,4 и 48,6 % (рис. 42). Метод 1 имел самую низкую точность, что было ожидаемо, поскольку предыдущий анализ показал, что потенциально около половины деревьев было бы пропущено, если бы размеры окон определялись с помощью подогнанной кривой регрессии. При методе 2 точность была намного выше, чем в методе 1, когда вершины деревьев определялись с помощью модели максимумов полого, а размеры окон определялись по нижнему пределу интервала прогнозирования. По сравнению с методом 2, метод, который дополнительно обнаруживает вершины деревьев на дистанционно преобразованном изображении, может повысить точность примерно на 10 %. Точность метода 3 также выше, чем метода 1. Это связано с тем, что количество ошибок пропуска в этом методе невелико. Точность определения границ деревьев по предлагаемому 4 методу оценивалась с помощью пятикратной перекрестной проверки. Было показано, что абсолютная точность выделения деревьев составила 64,1 %, что было намного выше точности метода 1 (37,0 %), согласно которому вершины деревьев выявляли путем поиска локальных максимумов в пределах окон различных размеров [Isolating individual trees in a savanna woodland using small footprint lidar data, 2006].

В изложенных выше методах как диапазон масштабирования, так и уровни масштабирования, обычно устанавливаются вручную или определяются в ходе исследования. Когда эти методы используются для опознания многомасштабных крон деревьев в лиственных или смешанных лесах с закрытым пологом, они, несмотря на их успешность, приводят к заметным ошибкам, связанным с пропуском или избыточной регистрацией деревьев [Comparative testing of single-tree detection algorithms under different types of forest, 2011].

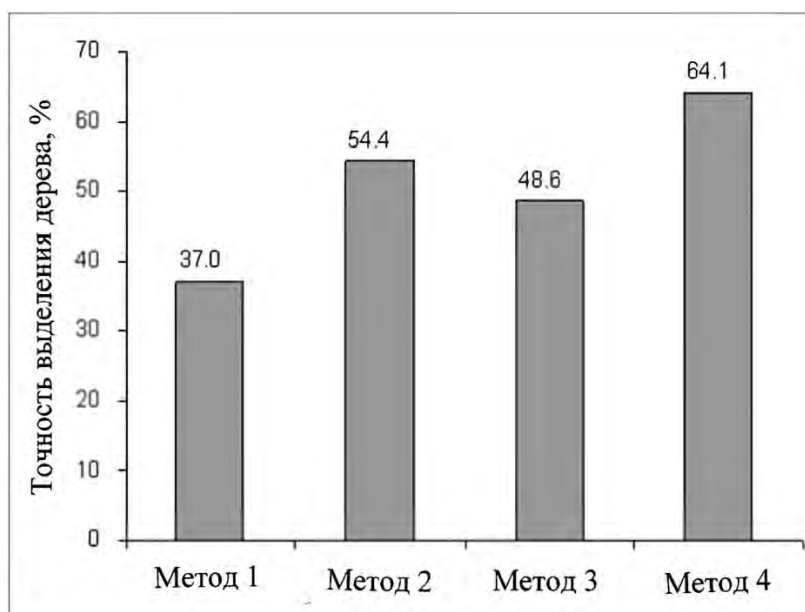


Рис. 42. Сравнение точности выделения деревьев с помощью различных методов обнаружения вершин деревьев. Метод 1: выделение вершин деревьев с помощью модели высоты полога и размеров окон на основе подогнанной кривой регрессии; метод 2: выделение вершущек деревьев с помощью модели максимумов полога и размеров окон на основе нижнего предела интервала прогнозирования кривой регрессии; метод 3: вершины деревьев являются локальными максимумами в пределах модели высоты полога; метод 4: выделение вершин деревьев на дистанционно преобразованном изображении (в дополнение к методу 3) [Isolating individual trees in a savanna woodland using small footprint lidar data, 2006]

Несмотря на успешные результаты определения границ крон деревьев по данным лидара, некоторые проблемы с выделением границ в естественных смешанных насаждениях остаются нерешенными из-за их сложной структуры. В лесу ветви, кроны деревьев и их скопления обычно имеют схожие и перекрывающиеся формы. Из-за такой многомасштабной структуры большинство современных методов определения крон отдельных деревьев, которые успешно применяются в хвойных лесах, менее эффективно работают в лиственных или смешанных лесах с закрытым пологом [Development of filtering, segmentation and modelling modules for LIDAR and multispectral data as a fundamental of an automatic forest inventory system, 2004; Koch, Heyder, Weinacker, 2006]. В современных методах определения крон деревьев вершины деревьев часто локализуются в первую очередь и используются в качестве ориентиров для оконтуривания крон. Относительно легко обнаружить вершины хвойных деревьев, но трудно их определить у лиственных. В первую очередь это объясняется тем, что кроны лиственных деревьев имеют широкий диапазон размеров, а их крупные ветви и нижние части крон напоминают небольшие деревья. Кроме того, когда кроны лиственных деревьев расположены близко друг к другу, промежутки между кронами мо-

гут быть настолько незначительными, что отдельные ветви могут быть ошибочно приняты за отдельные кроны деревьев [Automated delineation of individual tree crowns from lidar data by multi-scale analysis and segmentation, 2012; An individual tree crown delineation method based on multi-scale segmentation of imagery, 2012].

Чтобы выделить отдельные кроны деревьев разного размера, модель высоты полога сглаживается для подавления ложных вершин деревьев, обусловленных наличием выступающих ветвей, и тогда вершины деревьев проявляются как локальные максимумы [HIGH-SCAN: The first European-wide attempt to derive single tree information from laser scanner data, 2001; Persson, Holmgren, Södermann, 2002]. Однако трудно определить оптимальный размер фильтра для варьирующих крон деревьев в лесу. При увеличении размера фильтра все меньше вершин ветвей будет ошибочно приниматься за вершины деревьев, а кроны деревьев меньшего размера будут пропущены. При уменьшении размера фильтра происходит обратное. Необходимый компромисс между ошибками пропуска (*omission*) и ошибками завышения (*commission*) обусловлен различиями в размерах крон деревьев. Чтобы эффективно обнаруживать вершины деревьев, некоторые исследователи предлагают настроить размер окна для локальной максимальной фильтрации таким образом, чтобы он изменялся в зависимости от высоты дерева [Popescu, Wynne, Nelson, 2002; Popescu, Wynne, 2004; Isolating individual trees in a savanna woodland using small footprint lidar data, 2006]. Однако аллометрические зависимости между высотой дерева и шириной кроны доступны не всегда, а иногда они настолько слабы, что ширину кроны невозможно точно оценить по высоте дерева [Automated estimation of individual conifer tree height and crown diameter via two-dimensional spatial wavelet analysis of lidar data, 2006].

Чтобы преодолеть проблемы, связанные с кронами деревьев разного размера, разрабатываются различные методы определения границ крон деревьев на основе многомасштабного анализа. Например, в методе фильтрации с учетом высоты дерева [Adaptive methods for individual tree detection on airborne laser based canopy height model, 2004] для создания разных слоев в модели высоты полога применялось несколько гауссовых фильтров с разными размерами и значениями стандартного отклонения, и в пределах каждого отфильтрованного слоя выявлялись локальные максимумы, которые принимались в качестве местоположений деревьев. В другом случае [Adaptive methods for individual tree detection on airborne laser based canopy height model, 2004] к модели высоты полога применяется несколько фильтров Лапласа с разными размерами и значениями стандартного отклонения, результирующие изображения Лапласа нормализуются и объединяются, а локальные минимумы в объединенном изображении берутся в качестве положения деревьев. Еще в одном случае [Automated estimation of individual

conifer tree height and crown diameter via two-dimensional spatial wavelet analysis of lidar data, 2006] для фильтрации модели высоты полого используется серия двумерных вейвлет-сигналов «мексиканской шляпы» различных размеров, и на основе отфильтрованных моделей высоты полого определяется местоположение разновеликих крон деревьев. В работе Вольфа и Хайпке [Wolf, Heipke, 2007] цифровая модель поверхности (*digital surface model*) отфильтрована по Гауссу в нескольких масштабах; лапласианская версия каждой отфильтрованной цифровой модели поверхности затем сегментируется с использованием метода морфологического водораздела, управляемого маркерами [Beucher, Lantuejoul, 1979; Meyer, Beucher, 1990; Vincent, Soille, 1991]; и, наконец, сегменты кроны выбираются из множества полученных карт сегментации и уточняются. Была также использована серия 3D-моделей крон [Pollock, 1996] с похожими формами и различными размерами для определения крон деревьев на основе корреляции между моделью высоты полого и эмпирическими моделями [Prediction of stem attributes by combining airborne laser scanning and measurements from harvesters, 2012]. В приведенных выше методах неявно предполагалось, что серия гауссовых фильтров, вейвлетов «мексиканской шляпы» или 3D-моделей крон напоминают 3D-геометрические формы разновеликих крон деревьев [Automated estimation of individual conifer tree height and crown diameter via two-dimensional spatial wavelet analysis of lidar data, 2006], а свертка или корреляция между моделью высоты полого и каждым фильтром или эмпирической моделью позволяет выявить кроны деревьев, похожие по форме и размеру на фильтр или модель.

Чтобы точно определить размеры крон деревьев в густом насаждении, было предложено решение двух основных проблем [Automated delineation of individual tree crowns from lidar data by multi-scale analysis and segmentation, 2012]. Как упоминалось выше, уровни масштаба, используемые в существующих методах, обычно устанавливаются эмпирически, например в степени 2. Альтернативным и, возможно, более эффективным подходом был бы анализ существующих уровней масштаба для определения, какой из них использовать для разграничения крон деревьев. В данном исследовании впервые была применена серия операций морфологического раскрытия [Soille, 1999] к модели высоты полого данного насаждения для определения диапазона и доминирующих размеров крон, что послужило основой для разработки гауссовых фильтров для представления этого насаждения в разных масштабах (в соответствии с доминирующими размерами крон). Кроме того, решающее значение для успеха метода многомасштабного разграничения крон деревьев имеет то, как эффективно интегрировать информацию, полученную в разных масштабах, для создания окончательной карты крон деревьев. Несмотря на то, что взаимосвязь объектов изображения между масштабами использовалась в нескольких исследованиях, направленных на сегментацию и классификацию изображений [Hay, Marceau, 2004], при

определении крон деревьев она не использовалась в полной мере [Automated delineation of individual tree crowns from lidar data by multi-scale analysis and segmentation, 2012].

Было проведено исследование, в котором использовалась взаимосвязь между ветвями, кронами деревьев и лесными насаждениями на трех разных масштабных уровнях. Разработан инновационный метод эффективного определения разновеликих крон деревьев по данным лидара, основанный на многомасштабном анализе и сегментации (MSAS). Метод MSAS был протестирован с использованием лидарных данных в трех естественных лесных насаждениях в Онтарио, Канада, и результаты были сопоставлены с результатами полевых исследований [Automated delineation of individual tree crowns from lidar data by multi-scale analysis and segmentation, 2012].

Метод MSAS, разработанный в этом исследовании, состоит из трех этапов: 1) масштабный анализ для определения доминирующих размеров крон целевых деревьев в модели высоты полога с использованием операций морфологического раскрытия; 2) многомасштабная фильтрация и сегментация изображения для создания многомасштабного представления модели высоты полога с использованием нескольких гауссовых фильтров и создание карт сегментации в нескольких масштабах с использованием метода морфологического водораздела, управляемого маркерами; 3) создание окончательной карты крон деревьев путем интеграции полученных многомасштабных карт сегментации. Модель высоты полога на участке 1 показана на рис. 43.

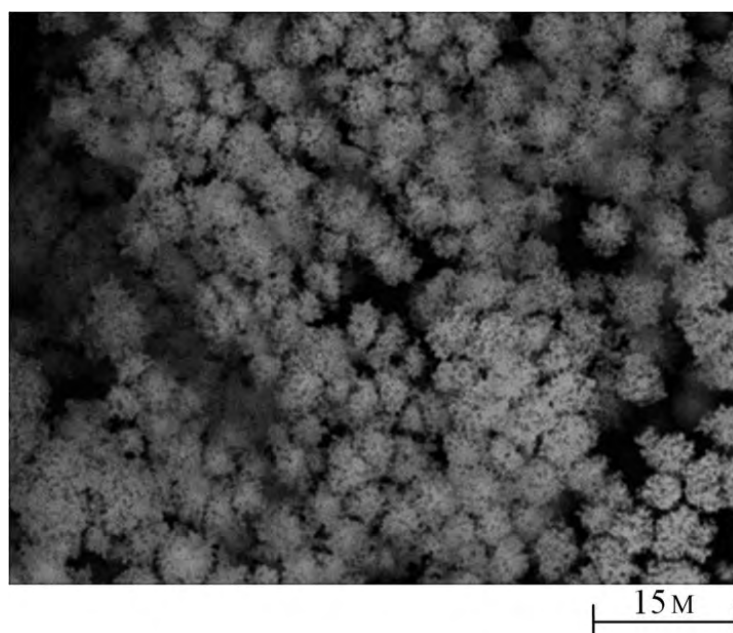


Рис. 43. Модель высоты полога для участка 1 [Automated delineation of individual tree crowns from lidar data by multi-scale analysis and segmentation, 2012]

Известно, что операции морфологического раскрытия с использованием структурирующих элементов (*structuring elements* – SE) соответствующего размера и формы [Serra, 1982; Soille, 1999] позволяют разделять объекты разного размера на изображениях в оттенках серого. Структурирующие элементы представлены матрицей, состоящей только из 0 и 1, которая может иметь любую произвольную форму и размер. В результирующем раскрытом изображении объекты, которые могли бы полностью содержать структурирующий элемент, сохраняются, в то время как другие отсеиваются. Когда к модели высоты полога лесного насаждения применяются операции раскрытия с дискообразными структурирующими элементами (*disk structuring elements*) различных размеров, можно разделить кроны деревьев разного размера. Чтобы проиллюстрировать это, в качестве примера использована модель высоты полога двух крон с соответствующими диаметрами в 13 и 5 пикселей, показанная на рис. 44, а. Чтобы разделить эти две кроны, можно использовать дискообразный структурирующий элемент диаметром от 5 до 13 или, например, 7 пикселей (рис. 44, б). Полученная открытая модель высоты полога (рис. 44, в) содержит только большую крону. Изображение, отличающее исходную версию от открытой, содержит объекты меньшего размера, чем структурирующий элемент, в том числе некоторые ветви большой и малой крон (рис. 44, г). Таким образом, две кроны разного размера разделены с помощью одного дискообразного структурирующего элемента. Кроме того, в насаждении можно разделить кроны деревьев разных размеров путем операции морфологического раскрытия с помощью ряда дискообразных секций различного диаметра [Automated delineation of individual tree crowns from lidar data by multi-scale analysis and segmentation, 2012].

В этом исследовании в операции морфологического раскрытия модели высоты полога была использована серия дискообразных структурирующих элементов диаметром от 3 до 61 пикселя с шагом в 2 пикселя и была сгенерирована серия открытых моделей высоты полога. Для каждой пары последовательно открытых моделей – O_i и O_{i+2} , – где нижние индексы использовались для обозначения соответствующих диаметров структурирующих элементов, было рассчитано их разностное изображение (от O_{i+2} до O_i) и получено его среднее значение. Серия открытых моделей высоты полога привела к получению серии изображения различий и серии средних значений. Средние значения разностных изображений для модели высоты полога на рис. 43 показаны на рис. 45, где есть несколько локальных минимумов. Локальный минимум возникает всякий раз, когда существуют значительные различия в размерах объектов между двумя последовательно открытыми моделями высоты полога. Таким образом, эти средние значения показывают преобладающие размеры объектов и диапазон их размеров, зафиксированный в модели высоты полога.

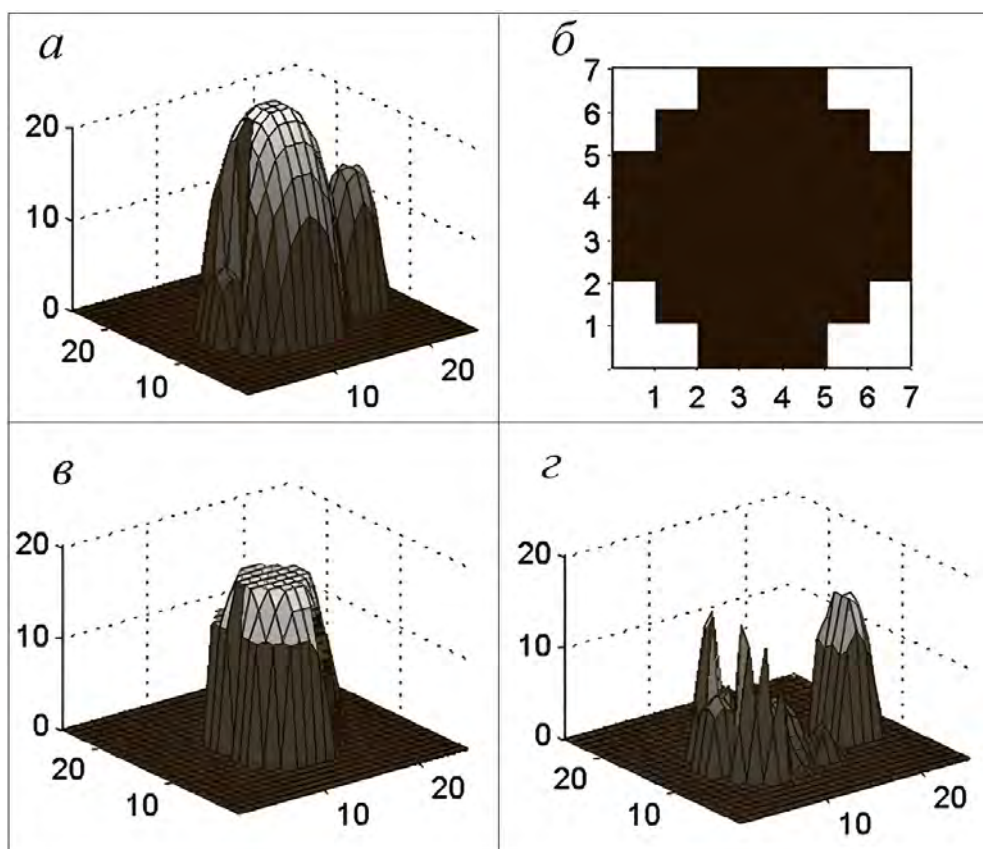


Рис. 44. Морфологическое раскрытие с дискообразным структурирующим элементом: *а* – модель высоты полога для двух крон деревьев; *б* – структурирующий элемент, в котором темные пиксели представлены 1, а белые пиксели представлены нулем; *в* – открытая модель высоты полога; *г* – изображение разницы между оригинальной и открытой моделями высоты полога [Automated delineation of individual tree crowns from lidar data by multi-scale analysis and segmentation, 2012]

Как видно на рис. 45, распределение размеров или масштабный диапазон круговых объектов в модели высоты полога является довольно широким, и существует несколько доминирующих групп круговых объектов по размерам, в том числе от 3 до 5 (от 0,45 до 0,75 м), от 9 до 13 (от 1,35 до 1,95 м), от 17 до 19 (2,55 до 2,85 м), от 23 до 27 (от 3,45 до 4,05 м) и от 31 до 33 (от 4,65 до 4,95 м) пикселей. Первую группу можно интерпретировать как размеры ветвей, а четыре другие группы – как размеры крон соответственно малых, средних и больших деревьев и их скоплений. Минимальное значение в каждой группе размеров крон деревьев было использовано в качестве репрезентативной шкалы, так были определены три дискретных уровня масштаба в 9, 17 и 23 пикселя, которые были наиболее подходящими для использования в качестве уровней крон соответственно малых, средних и больших деревьев [Automated delineation of individual tree crowns from lidar data by multi-scale analysis and segmentation, 2012].

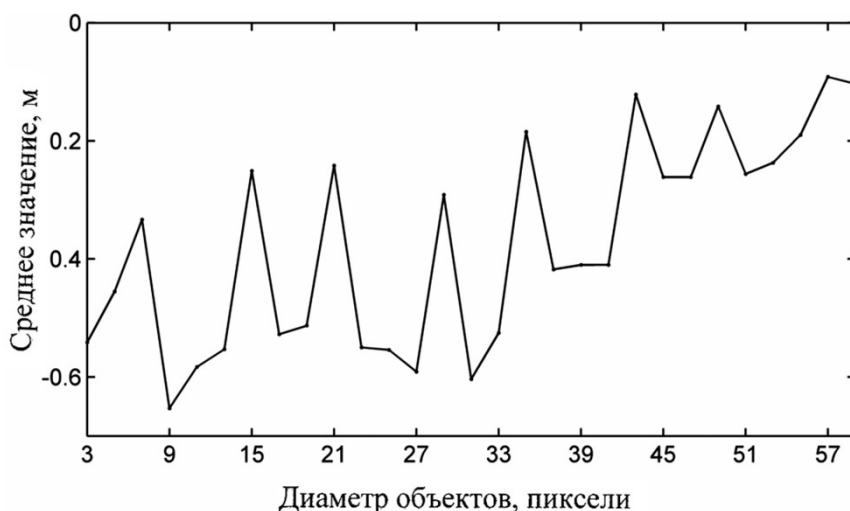


Рис. 45. Средние значения серии разностных изображений для модели высоты полога, показанной на рис. 43 [Automated delineation of individual tree crowns from lidar data by multi-scale analysis and segmentation, 2012]

На основе нескольких уровней крон деревьев, определенных с помощью масштабного анализа, была разработана серия гауссовых фильтров, используемых в методе MSAS. В частности, размер окна гауссова фильтра на уровне масштабирования в k пикселей был установлен равным k пикселей на k пикселей, тогда как значение сигмы (стандартного отклонения) фильтра составляло часть уровня масштабирования. В этом исследовании использовалось значение сигмы в $0,3k$ пикселей, которое было определено экспериментально [Automated delineation of individual tree crowns from lidar data by multi-scale analysis and segmentation, 2012].

Был разработан гауссов фильтр на каждом уровне масштабирования для имитации трехмерных геометрических форм крон деревьев как 3D-модели крон [Pollock, 1996; Gong, Sheng, Biging, 2002] и 2D-вейвлет «мексиканской шляпы» [Automated estimation of individual conifer tree height and crown diameter via two-dimensional spatial wavelet analysis of lidar data, 2006], используемых для определения границ крон деревьев. Когда фильтр был применен к модели высоты полога, кроны деревьев с формами и размерами, аналогичными фильтру, были увеличены, в то время как объекты меньшего размера были удалены. Поскольку уровень крон деревьев был минимальным значением в группе их размеров, объекты большего размера в группе были сохранены. Три ранее определенных уровня крон деревьев обусловили три гауссовых фильтра и таким образом три отфильтрованных модели высоты полога (рис. 46), каждая из которых содержит объекты одинаковых размеров и форм [Automated delineation of individual tree crowns from lidar data by multi-scale analysis and segmentation, 2012].

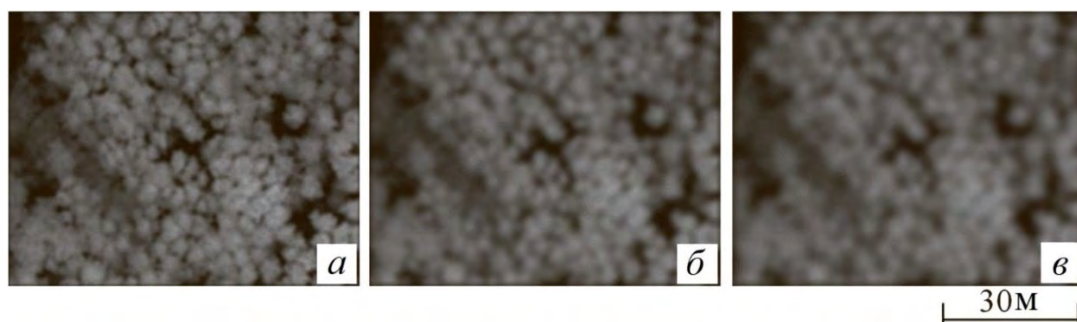


Рис. 46. Отфильтрованные модели высоты полога на уровнях крон деревьев на участке 1: *а* – малых; *б* – средних; *в* – больших [Automated delineation of individual tree crowns from lidar data by multi-scale analysis and segmentation, 2012]

Широко применяемый подход к сегментации морфологических водоразделов с использованием маркеров [Beucher, Lantuejoul, 1979; Meyer, Beucher, 1990; Vincent, Soille, 1991] был использован в этом исследовании для сегментации моделей высоты полога по отдельности в разных масштабах. Подход, основанный на использовании водораздела, имитирует погружение по маркерам для определения затопленных бассейнов. Ключевым этапом сегментации водораздела с использованием маркеров является определение маркеров. В этом исследовании в качестве маркеров использовались локальные максимумы в модели высоты полога на каждом заданном масштабном уровне. Были определены локальные максимумы в каждой из отфильтрованных моделей высоты полога (рис. 46), которые показаны на рис. 47. На уровнях крон малых, средних и больших деревьев было обнаружено 510, 233 и 170 локальных максимумов. Как и ожидалось: по мере того, как уровень кроны деревьев повышался с малого до среднего, а затем и до большого, количество обнаруженных локальных максимумов уменьшалось [Automated delineation of individual tree crowns from lidar data by multi-scale analysis and segmentation, 2012].

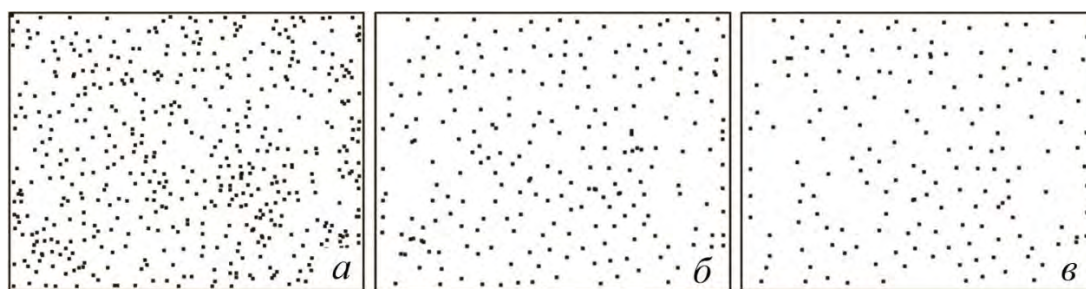


Рис. 47. Вершины деревьев на уровнях крон деревьев в модели высоты полога на участке 1: *а* – малых; *б* – средних; *в* – больших [Automated delineation of individual tree crowns from lidar data by multi-scale analysis and segmentation, 2012]

Поскольку обнаруженные локальные максимумы в модели высоты полога на каждом заданном масштабе служили маркерами, к названной мо-

дели был применен метод сегментации управляемого маркерами морфологического водораздела, реализованный с использованием функций программного обеспечения *Matlab* (версия R2008a). После удаления кустарников, трав и пустырей, которые ранее были оконтурены на модели высоты полога методом морфологического водораздела, были составлены карты сегментации на нескольких масштабных уровнях (рис. 48). Показано, что каждая карта состоит из нескольких сегментов одинакового размера, и каждая крона дерева может иметь различную форму, например, в виде объединенных сегментов, отдельного сегмента или части сегмента. Сегменты крон деревьев на картах сегментации на разных масштабных уровнях необходимо далее объединить и сформировать полную карту крон [Automated delineation of individual tree crowns from lidar data by multi-scale analysis and segmentation, 2012].

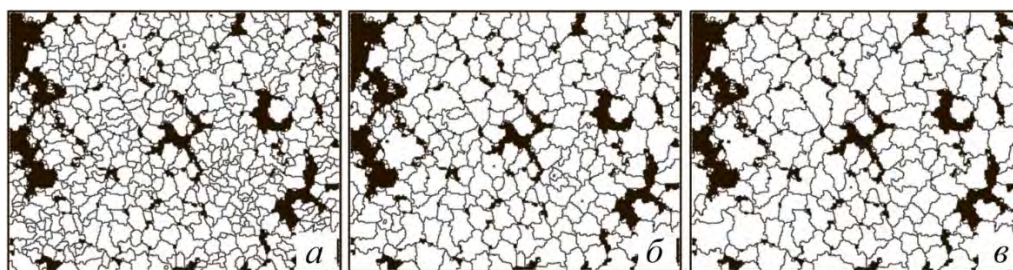


Рис. 48. Карты сегментации на уровнях крон деревьев согласно модели высоты полога на участке 1: *а* – малых; *б* – средних; *в* – больших [Automated delineation of individual tree crowns from lidar data by multi-scale analysis and segmentation, 2012]

Сравнивая рис. 48, *б*, *в*, можно видеть, что сегмент крупного масштаба (на уровне кроны большого дерева) может накладываться на более чем один сегмент мелкого масштаба (на уровне кроны среднего дерева). Чтобы интегрировать эти сегменты на разных уровнях, необходимо знать, является ли сегмент крупного масштаба деревом или кластером деревьев. Крона дерева в модели высоты полога обычно выглядит круглой, в то время как кластер деревьев, представляющий собой комбинацию нескольких крон, имеет меньшую округлость, или «круговидность» (*circularity*). Основываясь на таких наблюдениях, сегмент крупного масштаба можно сравнить с соответствующими сегментами мелкого масштаба с точки зрения округлости. Округлость (*C*) сегмента [Wolf, Heipke, 2007] рассчитана следующим образом:

$$C = A / (\pi r^2), \quad (3)$$

где *A* – площадь сегмента; *r* – наибольшее расстояние между центром тяжести и границей сегмента. Когда показатель округлости приближается к 1, сегмент все более приобретает форму окружности.

Сегмент крупного масштаба и соответствующие сегменты мелкого масштаба интегрируются вместе по методу MSAS в два этапа:

1) обрезка сегментов мелкого масштаба с целью удалить все пиксели, не охваченные сегментом крупного масштаба, чтобы первые могли аккуратно вписаться во вторые;

2) если сегмент крупного масштаба имеет округлость меньше порогового значения, которое в данном исследовании было установлено равным 0,85, то он рассматривается как кластер деревьев, который затем заменяется мелкомасштабными сегментами [Automated delineation of individual tree crowns from lidar data by multi-scale analysis and segmentation, 2012].

Используя описанную выше процедуру, сегменты на уровне кроны большого дерева были сначала объединены с сегментами на уровне кроны среднего дерева, а затем полученные интегрированные сегменты были объединены с сегментами на уровне крон малого дерева. В результате этой процедуры интеграции была получена карта, состоящая из нескольких сегментов разного размера. После того, как были удалены небольшие сегменты и заполнены промежутки в сегментах, была получена окончательная карта крон дерева [Automated delineation of individual tree crowns from lidar data by multi-scale analysis and segmentation, 2012].

Модели высоты полого на участках с 1 по 3 были обработаны с использованием метода MSAS, и были созданы три карты крон деревьев (рис. 49, б, г, е). Очевидно, что в моделях высоты полого границы большинства сегментов хорошо совпадают с границами промежутков между кронами [Automated delineation of individual tree crowns from lidar data by multi-scale analysis and segmentation, 2012].

Одновременно с лидарной была проведена наземная съемка двух площадок размером 20×20 м в пределах участка 1. В пределах двух площадок с помощью GPS-приемника и тахеометра было установлено местоположение 51 дерева, были зафиксированы видовой состав, диаметры стволов и крон. На рис. 49, б положение деревьев показано крестиками. Из общего числа 51 измеренного на земле ствола было правильно околонтурено 31 дерево, а 20 были объединены в процессе обработки данных по MSAS, в итоге около 61 % измеренных стволов деревьев были околонтурены методом MSAS правильно [Automated delineation of individual tree crowns from lidar data by multi-scale analysis and segmentation, 2012].

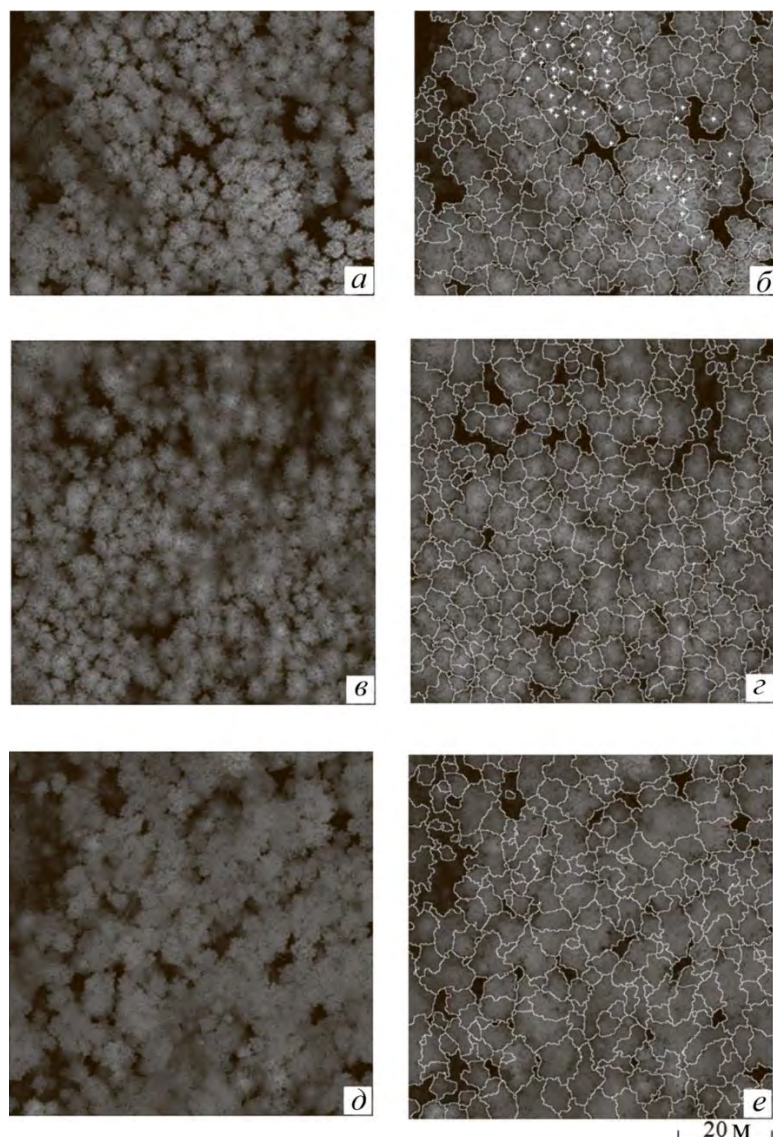


Рис. 49. Модели высоты полога на участках с 1 по 3 и карты крон деревьев на них:
 а – участок 1; б – карта крон на участке 1; в – участок 2; г – карта крон на участке 2;
 д – участок 3; е – карта крон на участке 3 [Automated delineation of individual tree crowns
 from lidar data by multi-scale analysis and segmentation, 2012]

Для дальнейшей оценки автоматически составленных карт крон исходные модели высоты полога были вручную сегментированы независимым опытным исследователем на полученных одновременно цифровых аэрофотоснимках исследуемой территории с разрешением 0,15 м. Автоматически очерченные карты и карты, очерченные вручную, названы соответственно целевыми и контрольными. Визуальное сравнение показало, что каждая целевая карта и соответствующая ей эталонная были согласованы для большинства крон деревьев, в то время как некоторые из эталонных крон на целевой карте были пропущены, объединены или разделены. Чтобы количественно оценить точность каждой целевой карты, контрольные кроны

для каждого участка были разделены на следующие пять категорий в соответствии с их пространственными соотношениями с целевыми сегментами:

1) соответствие: если совпадения контрольной кроны и целевого сегмента превышали 50 %, контрольная крона считалась соответствующей целевому сегменту [Combined high-density lidar and multispectral imagery for individual tree crown analysis, 2003];

2) почти совпадение: если перекрытие контрольной кроны и целевого сегмента превышало 50 % только в одном сегменте, контрольная крона считалась почти совпадающей с целевым сегментом;

3) пропуски: если контрольная крона перекрывала какой-либо целевой сегмент менее чем на 50 % и покрывала более половины площади целевых сегментов, то при автоматическом оконтуривании она рассматривалась как пропущенная крона;

4) объединение: если более половины площади нескольких контрольных крон было покрыто одним целевым сегментом, при автоматическом оконтуривании несколько контрольных крон считались объединенными;

5) разделение: если более половины площади нескольких целевых сегментов было покрыто одной контрольной кроной, при автоматическом определении границ последняя рассматривалась как разделенная [Automated delineation of individual tree crowns from lidar data by multi-scale analysis and segmentation, 2012].

Согласно полученным статистическим данным о точности карт крон, сгенерированных по методу MSAS, примерно 73 % крон деревьев смешанного породного состава на участке 1, 69 % хвойных деревьев на участке 2 и 65 % лиственных деревьев на участке 3 были оконтурены правильно. Получается, что метод MSAS позволяет создавать карту крон отдельных деревьев различного размера даже для лиственных лесов с закрытым пологом с точностью, сравнимой с ручной интерпретацией. Дальнейший анализ целевой и контрольной карт сегментации показал, что пропущенные при автоматическом выделении кроны относились к мелким деревьям; большинство объединенных крон принадлежало к скоплениям деревьев, не содержащим различимых впадин между кронами; были и ошибочно разделенные кроны при наличии впадин в пределах одной кроны [Automated delineation of individual tree crowns from lidar data by multi-scale analysis and segmentation, 2012].

Для сравнения с использованием функций программного обеспечения *Matlab* (версия R2008a) были реализованы и применены к исследуемому объекту два широко используемых подхода. Согласно первому из них (GW), модель высоты полога сначала сглаживается с помощью гауссова фильтра, а затем сегментируется с использованием метода сегментации водораздела. Размер фильтра был установлен на уровне средней кроны дерева в модели, что дало наиболее приемлемые результаты. Согласно второму подходу

(HW), верхушки деревьев разной высоты обнаруживаются с помощью метода фильтрации, основанного на связи с высотой дерева [Adaptive methods for individual tree detection on airborne laser based canopy height model, 2004], а затем используются в модели высоты полога в качестве маркеров при последующей сегментации водораздела. Примеры с результатами сегментаций, полученных на участке 3 названными двумя методами, показаны на рис. 50, *а*, *б* [Automated delineation of individual tree crowns from lidar data by multi-scale analysis and segmentation, 2012].

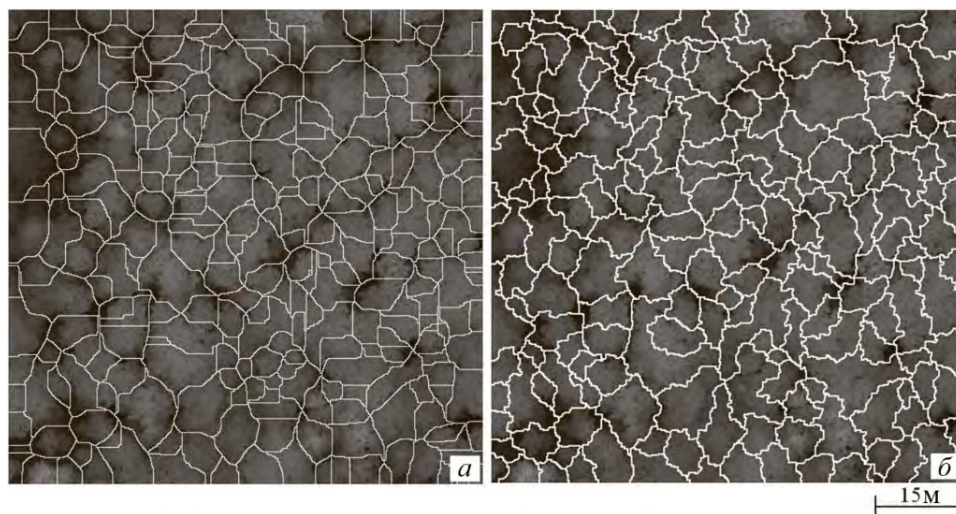


Рис. 50. Карты крон на участке 3, сгенерированные по методам: *а* – GW; *б* – HW [Automated delineation of individual tree crowns from lidar data by multi-scale analysis and segmentation, 2012]

Метод MSAS, предложенный в этом исследовании, состоит из трех этапов: 1) определить доминирующие уровни масштаба крон целевых деревьев, используя масштабный анализ модели высоты полога, и спроектировать несколько гауссовых фильтров для оценки соответствия трехмерным геометрическим формам крон деревьев; 2) на каждом масштабном уровне сгладить модель высоты полога с помощью соответствующего гауссова фильтра, принять локальные максимумы в сглаженной модели в качестве вершин деревьев и сегментировать исходную модель высоты полога, используя метод морфологического водораздела с верхушками деревьев в качестве маркеров; 3) на полученных многомасштабных картах сегментации выявить сегменты крон деревьев и интегрировать их в виде карты крон деревьев. Первый и последний этапы были квалифицированы авторами [Automated delineation of individual tree crowns from lidar data by multi-scale analysis and segmentation, 2012] как вновь разработанные подходы, в то время как подход к сегментации водораздела с использованием маркеров ранее широко использовался. Было показано, что масштабный анализ (этап 1) позволил выявить как диапазон масштабов, так и доминирующие уровни масштабирования крон деревьев на данном объекте исследования.

Для лучшего понимания масштабного анализа крону дерева рекомендовано рассматривать как полуэллипсоид [Wolf, Heipke, 2007] с прикрепленными к ней крайними ветвями. Полуэллипсоид представляет грубую структуру кроны, а ветви – тонкую. При наличии дискообразных структурирующих элементов с диаметром равным размерам эллипсоида и ветвей, когда крона дерева морфологически раскрывается, самые внешние ветви удаляются, а эллипсоид сохраняется [Automated delineation of individual tree crowns from lidar data by multi-scale analysis and segmentation, 2012].

Таким образом, данные лидарного зондирования играют важную роль при проведении таксации насаждений, особенно для определения размеров деревьев и запаса древостоя. Предложенная автоматическая сегментация крон деревьев по методу морфологического водораздела хорошо работает как в хвойных, так и в низкополнотных широколиственных насаждениях. При этом площадь крон немного завышается, но количество и расположение большинства деревьев сегментируются правильно. Проблемы возникают только при обнаружении очень мелких и угнетенных деревьев. В густых лиственных лесах с плотно сомкнутым однородным пологом отделить кроны деревьев довольно трудно, и тем самым количество зарегистрированных деревьев занижается. Сегментация крон в таких насаждениях может быть улучшена с помощью передовых лидарных систем с полным спектром сигналов в сочетании с мультиспектральной камерой, например *IGI Litemapper 5600* [Hug, Ullrich, Grimm, 2004]. Объем информации, поступающей из таких систем, огромен, и изымать из них соответствующую информацию будет непросто [Koch, Heyder, Weinacker, 2006].

В другом исследовании по сегментации крон методом морфологического водораздела [Isolating individual trees in a savanna woodland using small footprint lidar data, 2006] были пересмотрены предыдущие методы определения вершин деревьев путем поиска локальных максимумов в пределах переменных размеров окон, и было обнаружено, что использование подогнанной регрессионной кривой для определения размеров окон может привести к большим ошибкам пропуска. Предложен способ, ориентированный на снижение ошибок пропуска и избытка по трем этапам: 1) создание модели максимумов полога для сокращения числа ложных локальных максимумов; 2) обнаружение вершин деревьев по модели максимумов полога с использованием переменных размеров окон, которые были основаны на нижнем пределе интервалов прогнозирования; 3) обнаружение вершин деревьев с использованием дистанционно преобразованного изображения на основе предположения, что вершины деревьев расположены вблизи центра крон. Цель состояла в том, чтобы уменьшить количество ошибок избытка, а остальные два – в том, чтобы уменьшить количество ошибок пропуска. Было установлено, что метод «разделяй и властвуй» позволяет достичь гораздо более высокой точности по отношению к традиционным методам. Кроме того, приме-

нение дистанционно преобразованного изображения для обнаружения вершин деревьев значительно повышает точность выделения деревьев. Однако, по сравнению с предыдущими, этот метод требует полевых данных для определения необходимых исходных показателей. В целом, точность предложенного метода обнадеживает, особенно учитывая строгие критерии, использованные при оценке точности. Результаты показали, что контролируемая маркерами сегментация водораздела может быть использована для выделения отдельных деревьев лиственных пород. Результаты выделения деревьев могут быть применены для определения других параметров насаждений, таких как высота деревьев, размер кроны, биомасса и индекс листовой поверхности [Isolating individual trees in a savanna woodland using small footprint lidar data, 2006].

Был сделан вывод [Automated delineation of individual tree crowns from lidar data by multi-scale analysis and segmentation, 2012], что предложенная стратегия интеграции карт сегментации на разных уровнях масштабирования кроны деревьев, основанная на измерении формы сегментов, является эффективной. Несмотря на то, что правила различения кроны деревьев и их скоплений являются эффективными, некоторые пороговые значения в методе необходимо устанавливать вручную, а связанные с ними морфологические вычисления являются относительно сложными, подлежащими усовершенствованию в будущих исследованиях. Эффективность предложенного метода MSAS была подтверждена на примере трех различных типов естественных сомкнутых насаждений: хвойных, лиственных и смешанных. Для каждого типа насаждения метод позволил получить удовлетворительную карту кроны деревьев, по сравнению с ручной интерпретацией. Для полной проверки предложенного метода требуются дополнительные исследования, чтобы оценить, являются ли созданные карты кроны деревьев достаточно точными для целей коммерческой инвентаризации лесов [Automated delineation of individual tree crowns from lidar data by multi-scale analysis and segmentation, 2012].

2.2. Сегментация деревьев непосредственно по лазерному облаку точек

Сегментация деревьев непосредственно по лазерному облаку точек зависит от алгоритма, используемого при оцифровке данных зондирования профиля деревьев. Наиболее распространенными на сегодня являются два алгоритма: нисходящий (*top-to-bottom*) и восходящий (*bottom-to-top*).

2.2.1. Нисходящий (*top-to-bottom*) метод сегментации профиля деревьев

Общим для алгоритмов сегментации, изложенных в предыдущем разделе, является то, что они сегментируют отдельные деревья, используя полученную с помощью лидара модель высоты кроны (СНМ), которая представляет собой растровое изображение, интерполированное из лидарных точек, изображающих верхнюю часть лесного полога. Метод неидеален, т. к. может содержать ошибки и неопределенности. Например, пространственная ошибка может быть внесена в процессе интерполяции облака точек в решетчатой модели (*gridded model*) высоты полога [Effects of topographic variability and lidar sampling density on several DEM interpolation methods, 2010], что может снизить точность сегментации деревьев и соответствующих измерений. Для сегментации отдельных деревьев из облака точек был использован также алгоритм кластеризации k -среднего значения, но его точность зависела от исходных точек, выделенных из локальных максимумов растрованной цифровой модели поверхности, таким образом, этот метод напрямую не связан с лидарным облаком точек [Clustering in airborne laser scanning raw data for segmentation of single trees, 2003]. Кроме того, на примере сосновых насаждений разработан адаптивный подход кластеризации при сегментации отдельных деревьев на основе необработанных лидарных 3D-точечных данных; этот метод аналогичен концепции сегментации по морфологическим водоразделам, но для контролируемого обучения требует необходимого количества обучающих данных; его эффективность в сложных насаждениях не проверялась [Adaptive clustering of airborne LiDAR data to segment individual tree crowns in managed pine forests, 2010].

Однако в сложных смешанных насаждениях точность обнаружения и разграничения отдельных деревьев с использованием лидарных данных относительно низка [Persson, Holmgren, Södermann, 2002]. В некоторых исследованиях только от 40 до 80 % деревьев были обнаружены с помощью лидарных данных [Detecting and measuring individual trees with laser scanning in mixed mountain forest of central Europe using an algorithm developed for Swedish boreal forest conditions, 2004; Tiede, Hochleitner, Blaschke, 2005; Isolating individual trees in a savanna woodland using small footprint lidar data, 2006; Single-tree forest inventory using lidar and aerial images for 3D treetop positioning, species recognition, height and crown width estimation, 2007; Alexander, 2009]. Так, были обнаружены около 70 % деревьев в елово-сосновых насаждениях [Persson, Holmgren, Södermann, 2002], от 60 до 80 % в хвойных и лиственных лесах [Detection of individual trees and estimation of tree height using LiDAR data, 2007] и лишь 69 % деревьев в бореальном лесном массиве [Predicting individual tree attributes from airborne laser point clouds based on the random forests technique, 2011].

В связи с вышеизложенным была предпринята попытка разработки нового алгоритма для сегментации отдельных деревьев непосредственно

из лидарного облака точек [A new method for segmenting individual trees from the lidar point cloud, 2012]. Предложенный алгоритм является новым в том смысле, что он работает напрямую с необработанным лидарным облаком точек. Большинство других алгоритмов построения отдельных деревьев используют преобразование облака точек с привязкой к сетке (когда данные, привязанные к сетке, состоят из значений, полученных в регулярно расположенных точках, которые образуют прямолинейную сетку – *gridded transformation*), в частности это модель высоты полого [Isolating individual trees in a savanna woodland using small footprint lidar data, 2006]. У последних названных методов есть две проблемы. Во-первых, неопределенность, вносимая методом интерполяции, может повлиять на точность как сегментации, так и измерений деревьев [Effects of topographic variability and lidar sampling density on several DEM interpolation methods, 2010]. Во-вторых, эти методы не используют преимущества полной трехмерной структуры, присущей лидарному облаку точек. Как только деревья будут правильно сегментированы, с помощью предложенного метода можно напрямую по облаку точек измерить высоту дерева, размер кроны и другие важные параметры дерева. Преимущество очевидно: на сегментацию деревьев и последующие измерения не влияет неопределенность интерполяции, а важные параметры трехмерной структуры насаждения могут быть извлечены непосредственно из данных лидара по каждому дереву [A new method for segmenting individual trees from the lidar point cloud, 2012].

Исследование было проведено в смешанных хвойных насаждениях США на 20 круговых площадках радиусом 12,62 м с использованием инструментария *Trimble GeoXH GPS* и *TruPulse™ 360* для определения местоположения центров площадок и отдельных деревьев внутри них. Деревья с географической привязкой были измерены вручную и результаты сопоставлены с облаком точек лидара с помощью 3D-визуализации в программном обеспечении *Esri ArcScene®*. Всего было получено 380 замеров эталонных (исходных) деревьев (*reference trees*), и их количество на каждом участке варьировало от 9 до 35 [A new method for segmenting individual trees from the lidar point cloud, 2012].

Для классификации необработанных лидарных данных по наземным и надземным точкам использовалось программное обеспечение *TerraScan* от *TerraSolid*. Для интерполяции наземных точек и создания цифровой модели рельефа с разрешением 1 м использовался обычный кригинг (регрессия на основе гауссовских процессов) [Effects of topographic variability and lidar sampling density on several DEM interpolation methods, 2010]. Значения облака точек растительности были нормализованы путем вычитания наземных точек из лидарного облака точек [Adaptive clustering of airborne LiDAR data to segment individual tree crowns in managed pine forests, 2010]. После нормализации значение высоты точки показывает высоту дерева (рис. 51).

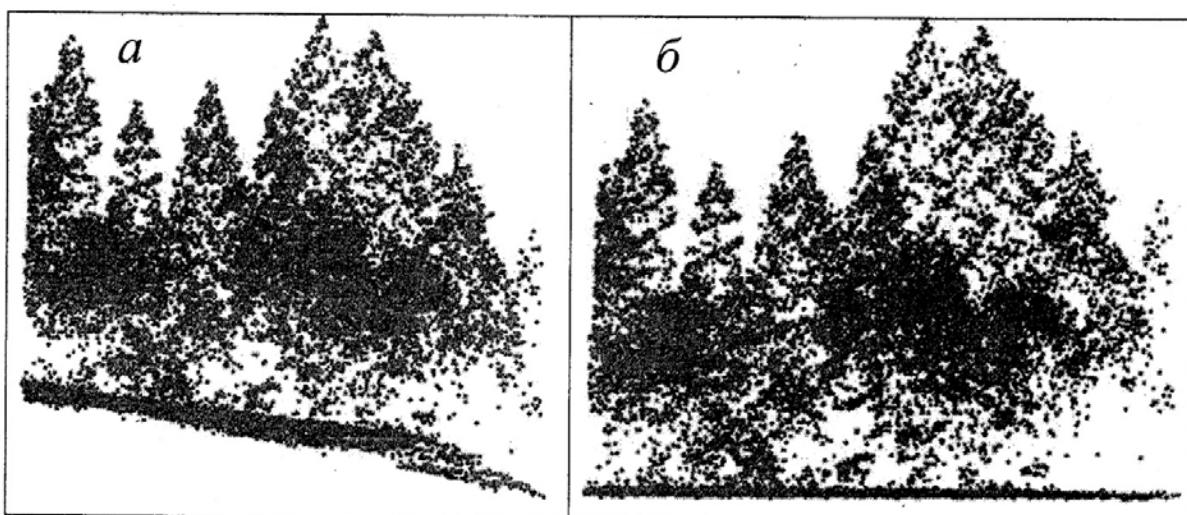


Рис. 51. Лидарное облако точек: *а* – до нормализации; *б* – после нормализации
[A new method for segmenting individual trees from the lidar point cloud, 2012]

Согласно предложенному нисходящему (*top-to-bottom*) методу [A new method for segmenting individual trees from the lidar point cloud, 2012], выполняется последовательная сегментация отдельных деревьев из облака точек при использовании относительного расстояния между деревьями (рис. 52). Как правило, между деревьями существует горизонтальное расстояние, и расстояние в верхней части дерева больше, чем в нижней, как показано на рис. 52, *а*. Хотя деревья могут перекрывать друг друга в густых насаждениях, на более высоком уровне между ними все равно остается расстояние, как показано на рис. 52, *б*. Следовательно, начиная с вершины дерева, мы можем идентифицировать и «вырастить» целевое дерево (*target tree*), включив близлежащие точки и исключив точки других деревьев на основе их относительного расстояния. Классифицировать точки на более низком уровне становится все труднее, особенно для перекрывающихся деревьев. Чтобы решить эту проблему, точки классифицируются последовательно – от самой высокой к самой низкой. Точки, расстояние между которыми превышает заданный порог, исключаются из целевого дерева; точки, расстояние между которыми меньше порогового значения, классифицируются на основе правила минимального расстояния. Например, на рис. 53 точка *А* является самой высокой, и, следовательно, считается вершиной дерева № 1 (целевого). Начиная с начальной точки *А*, мы последовательно классифицируем другие нижние точки. Во-первых, точка *В* классифицируется как дерево № 2, потому что расстояние между ними превышает заданный порог (например, 2 м). Затем мы рассмотрим точку *С*, расстояние между которой d_{AC} меньше порогового значения. По сравнению с точками *А* и *В*, точка *С* классифицируется как дерево № 1, поскольку d_{AC} меньше, чем d_{BC} . Последовательно точка *Д* классифицируется как дерево № 2, по сравнению с точками *В* и *С*, а точка *Е* классифицируется как дерево № 2, по сравнению с точками *С* и *Д*.

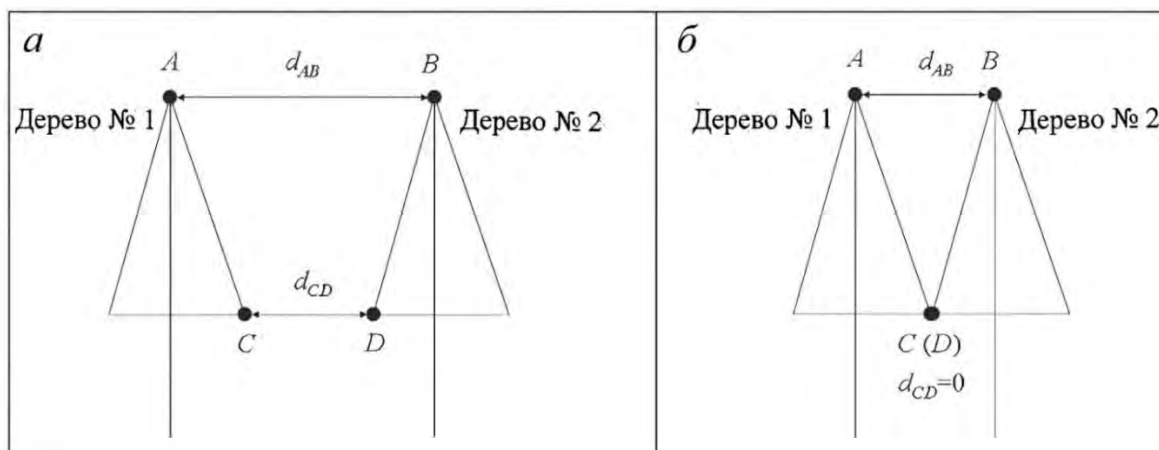


Рис. 52. Расстояние между деревьями на верхнем (d_{AB}) и нижнем (d_{CD}) уровнях:
 а – два отдельных дерева; б – два перекрывающихся дерева [A new method for segmenting individual trees from the lidar point cloud, 2012]

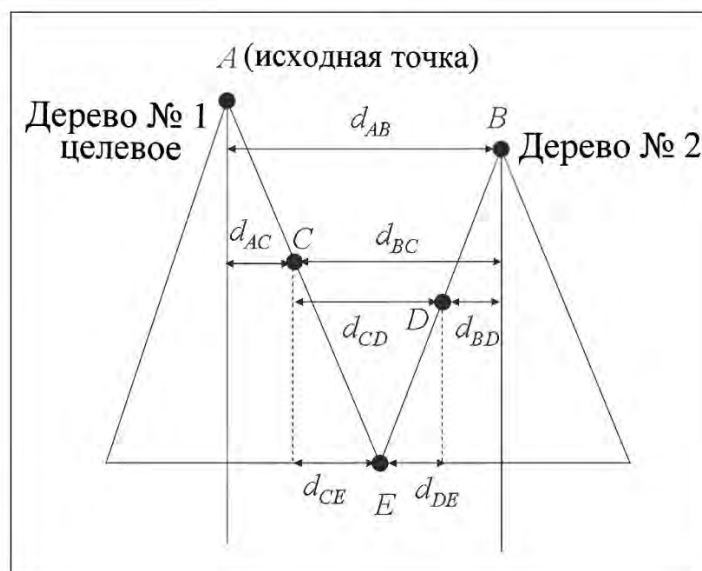


Рис. 53. Расстояние между точками двух деревьев [A new method for segmenting individual trees from the lidar point cloud, 2012]

Определив соответствующее пороговое расстояние, можно корректно распределить большинство точек по соответствующим кластерам деревьев. Порог должен быть приблизительно равен радиусу кроны. Если пороговое значение слишком мало, деревья с удлиненными ветвями могут быть чрезмерно сегментированы (*over-segmentation*); если пороговое значение слишком велико, близлежащие деревья могут быть пропущены. В качестве примера показан рис. 54. Если используется пороговое значение d_{AB} , точка B правильно назначается дереву № 1. Затем точка C будет сравнена с точкой B и ошибочно отнесена к дереву № 1, поскольку интервал d_{BC} меньше порогового значения d_{AB} , в результате чего дерево № 2 не будет сегментировано (*under-segmentation*). Напротив, если используется пороговое значение d_{BC} ,

точка B ошибочно исключается из дерева № 1. В то же время точка C корректно исключается из дерева № 1, следовательно, дерево № 2 может быть обнаружено и сегментировано позже. Для решения этой проблемы предложено использовать адаптивный порог, предполагая, что более высокие деревья имеют больший диаметр кроны [Popescu, Wynne, 2004; Isolating individual trees in a savanna woodland using small footprint lidar data, 2006].

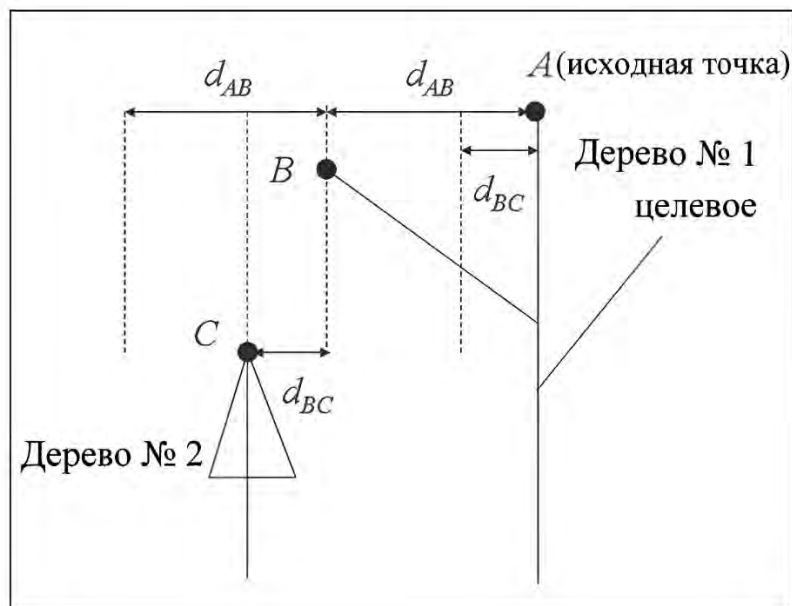


Рис. 54. Недостаточная сегментация с большим пороговым значением d_{AB} и чрезмерная сегментация с малым пороговым значением d_{BC} [A new method for segmenting individual trees from the lidar point cloud, 2012]

Кроме того, для повышения точности сегментации рекомендовано введение дополнительных правил классификации [A new method for segmenting individual trees from the lidar point cloud, 2012]. На рис. 55 точка A обозначена как вершина дерева № 1 (целевая), а следующая точка, подлежащая классификации, – это точка B . Расстояние между точками больше определенного порогового значения, и B может быть вершиной вытянутой ветви дерева № 1 (рис. 55, а) или вершиной дерева № 2 (рис. 55, б). Если точки, приближенные к B , спроецировать в двумерное евклидово пространство, проекция этих точек будет более вытянутой для ветви (рис. 55, а) и более компактной для отдельного дерева (рис. 55, б). Форма проекции может быть обозначена индексом формы (SI):

$$SI = P/(4 \times \sqrt{A}), \quad (4)$$

где P – периметр; A – площадь проекции [A new method for segmenting individual trees from the lidar point cloud, 2012].

В качестве альтернативы предлагается использовать относительный индекс формы, который устраняет проблему с размером при обычном соотношении периметра и площади [An object-based classification approach in mapping tree mortality using high spatial resolution imagery, 2007]. Более высокое значение индекса формы указывает на более вытянутую форму. Поэтому для различения ветви и дерева может быть использовано пороговое значение индекса формы [A new method for segmenting individual trees from the lidar point cloud, 2012].

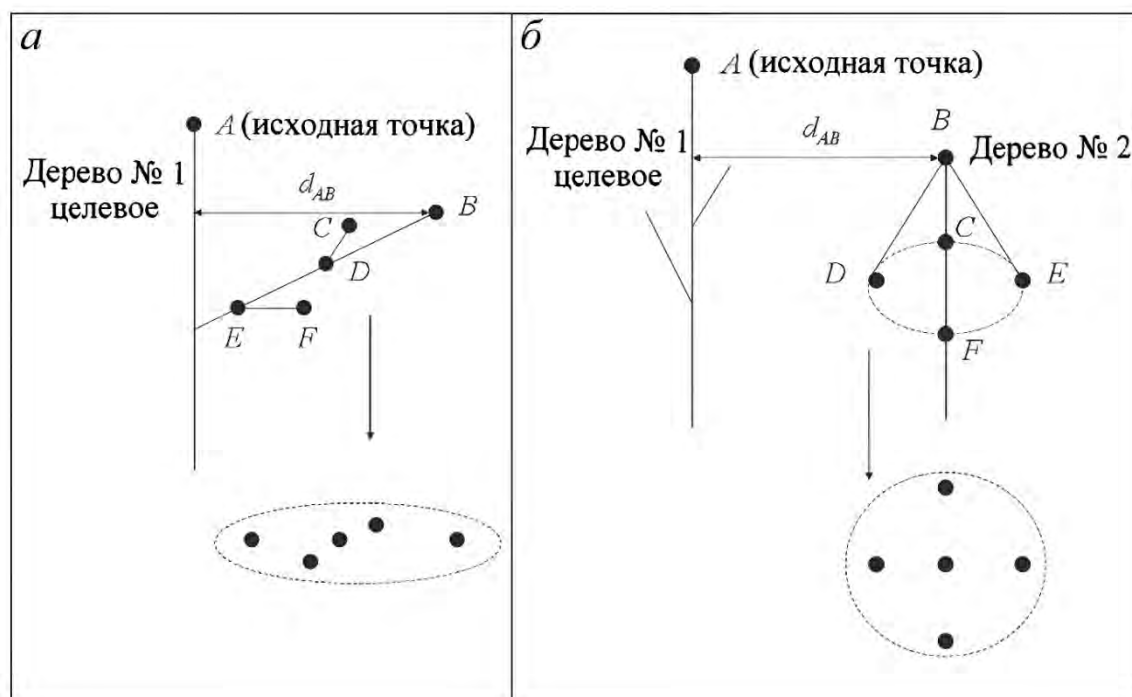


Рис. 55. Различные формы проекций точек: *а* – для вытянутой ветви; *б* – для отдельного дерева [A new method for segmenting individual trees from the lidar point cloud, 2012]

При регистрации ветви возможны два варианта: она принадлежит либо целевому, либо соседнему дереву в зависимости от распределения точек. На рис. 56 точка *С* является вершиной вытянутой ветви, а точки *Д*, *Е* и *Ф* приближены к точке *С* в пределах радиуса поиска. При проецировании в двумерное евклидово пространство большинство точек попадает в левый сектор, если ветвь принадлежит дереву № 1 (рис. 56, *а*). И, напротив, большинство точек попадает в правый сектор, если ветвь принадлежит дереву № 2 (рис. 56, *б*) [A new method for segmenting individual trees from the lidar point cloud, 2012].

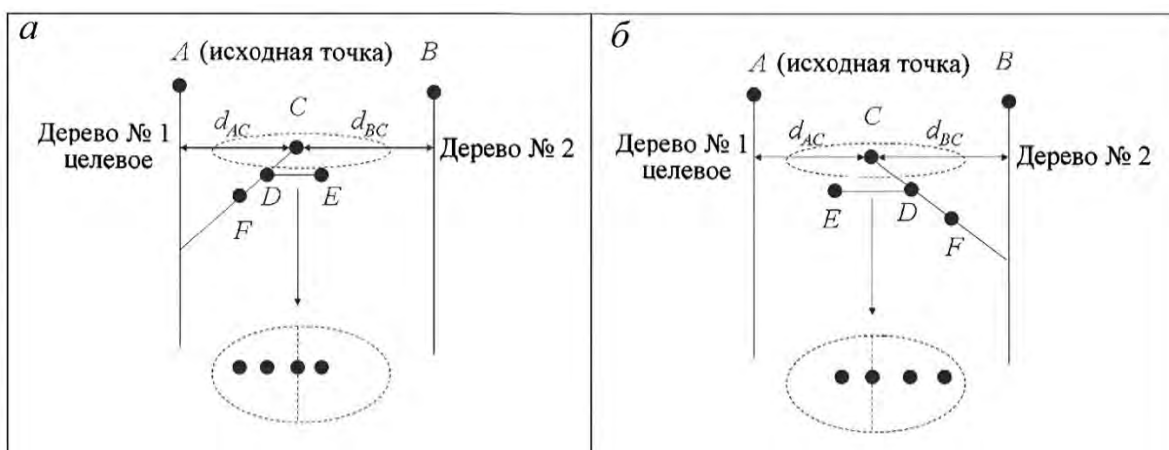


Рис. 56. Различные распределения точек в двумерном пространстве для ветви:
 а – ветвь принадлежит дереву № 1; б – ветвь принадлежит дереву № 2
 [A new method for segmenting individual trees from the lidar point cloud, 2012]

Таким образом, деревья сегментируются на основе порогового значения расстояния (фиксированного или адаптивного), правила минимального расстояния и горизонтальной проекции формы кроны. Недостаточная сегментация может быть уменьшена с помощью относительно небольшого порога, а чрезмерная сегментация может быть уменьшена в зависимости от формы и распределения точек. Алгоритм является довольно гибким, а правила классификации – объектно-ориентированными, могут быть изменены или расширены в зависимости от характеристик сегментируемых деревьев [A new method for segmenting individual trees from the lidar point cloud, 2012].

После запуска алгоритма сегментации дерева на 20 тестовых участках было выполнено сравнение сегментированных деревьев с эталонными (исходными). Получены три типа сегментации дерева (рис. 57): если дерево сегментировано корректно, результат относится к истинно положительным (TP); если дерево не сегментировано, а сливается с соседним деревом, результат относится к ложноотрицательным (FN) и идентифицируется ошибкой пропуска (*omission error*); если дерево не существует, но сегментировано из облака точек, результат относится к ложноположительным (FP) и идентифицируется ошибкой дополнения (*commission error*). Обозначения TP, FN и FP указывают соответственно на идеальную, недостаточную и чрезмерную сегментацию. Для оценки адекватности результата рассчитываются [Goutte, Gaussier, 2005; Sokolova, Japkowicz, Szpakowicz, 2006]:

– «полнота» (*recall*) как доля объектов положительного класса, которые модель правильно идентифицировала среди всех объектов положительного класса в тестовой выборке:

$$recall = TP / (TP + FN); \quad (5)$$

– «точность» (*precision*) как доля объектов, действительно принадлежащих к положительному классу среди всех объектов, которые модель отнесла к положительному классу:

$$precision = TP / (TP + FP); \quad (6)$$

– «F-оценка» (*F-score*) объединяет *precision* и *recall* через формулу гармонического среднего:

$$F=2 \times (precision \times recall) / (precision + recall). \quad (7)$$

F-score выступает стандартом оценки моделей классификации, особенно в условиях несбалансированных данных. Когда ни *precision*, ни *recall* по отдельности не дают полной картины, *F-score* объединяет их в единый показатель, позволяющий принимать взвешенные решения. В отличие от простой точности (*accuracy*), *F-score* учитывает как ложноположительные, так и ложноотрицательные результаты, что делает ее особенно ценной для несбалансированных наборов данных. Если одна из метрик близка к нулю, *F-score* также будет стремиться к нулю, несмотря на высокое значение другой метрики. Значения *recall*, *precision* и *F-score* варьируют от 0 до 1. Если все деревья сегментированы правильно (идеальная сегментация), значения *recall* и *precision* равны единице, в результате чего *F-score* также равно единице. Значение *recall* обратно пропорционально ошибке пропуска, а *precision* обратно пропорционально ошибке дополнения [A new method for segmenting individual trees from the lidar point cloud, 2012].

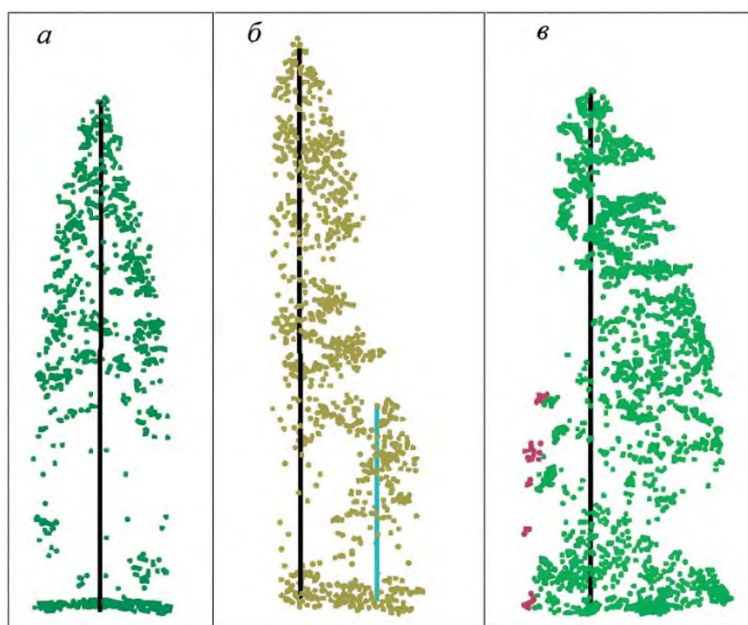


Рис. 57. Три типа сегментации деревьев: *а* – правильно обнаруженное дерево, или истинно положительное, TP; *б* – пропущенное дерево, или ложноотрицательный результат, FN; *в* – ложно обнаруженное дерево, или ложноположительный результат, FP. Столбики обозначают истинные деревья; цвет точек указывает на сегменты отдельных деревьев [A new method for segmenting individual trees from the lidar point cloud, 2012]

На рис. 58, *а, б* показано сравнение исходного и сегментированного облаков точек для участка размером 50×50 м. Видно, что большинство деревьев сегментированы правильно. На рис. 58 *в, г* показаны результаты сегментации для двух типичных пробных площадей. В густом древостое (рис. 58, *в*) расстояние между деревьями невелико, и некоторые деревья пропущены и несегментированы; в редком древостое (рис. 58, *г*) расстояние между деревьями велико, и большинство деревьев обнаружены и сегментированы корректно.

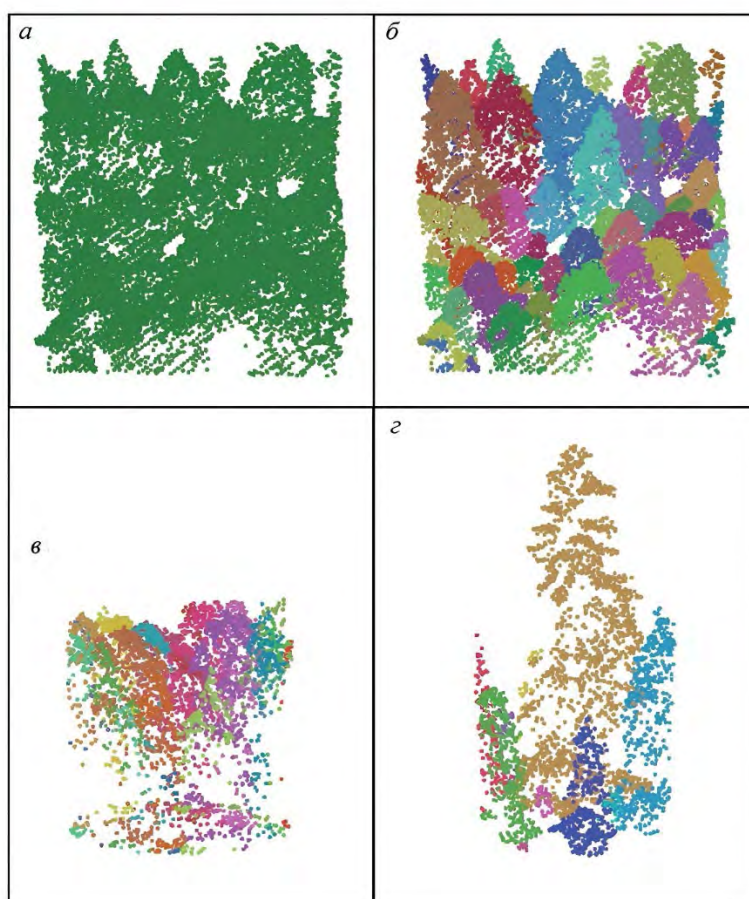


Рис. 58. Облако точек: *а* – исходное лидарное; *б* – сегментированное на площади 50×50 м. Сегментированные деревья показаны в древостоях: *в* – густом; *г* – редком.

Цвет точек указывает на отдельные сегментированные деревья [A new method for segmenting individual trees from the lidar point cloud, 2012]

Оценка точности регистрации деревьев на 20 тестовых участках показала, что значение *recall* варьирует от 0,71 до 1, в среднем 0,86; значение *precision* варьирует от 0,8 до 1, в среднем 0,94. В густых древостоях деревья не все сегментированы, и значение *recall* относительно низкое. Например, 8 из 31 дерева на участке № 10 и 10 деревьев из 35 на участке № 15 не были обнаружены алгоритмом. Соответствующие значения *recall* составили всего 0,74 и 0,71 соответственно. Однако значения *precision* на этих двух участках равны 1, без учета ошибок дополнения (ложно сегментированные деревья). В отличие от этого, значение *recall* в разреженном древостое относительно

высокое, но значение *precision* – ниже. Например, на участке № 8 все 16 деревьев сегментированы правильно, но есть 4 ложно обнаруженных дерева. Следовательно, значение *recall* равно 1, но значение *precision* равно только 0,8. Коэффициент *F*, который учитывает оба названных фактора, варьирует от 0,83 до 0,95, при этом среднее значение по всем участкам равно 0,90 [A new method for segmenting individual trees from the lidar point cloud, 2012].

Взаимосвязь между количествами исходных и сегментированных деревьев на участках показана на рис. 59. Коэффициент корреляции равен 0,91. В целом, количество деревьев согласно предложенному методу занижается. Всего на тестовых участках 380 деревьев, но сегментированы только 347 деревьев. Алгоритм пропустил 53 дерева и ошибочно обнаружил 20 деревьев, при этом недостаточная сегментация превысила избыточную [A new method for segmenting individual trees from the lidar point cloud, 2012].

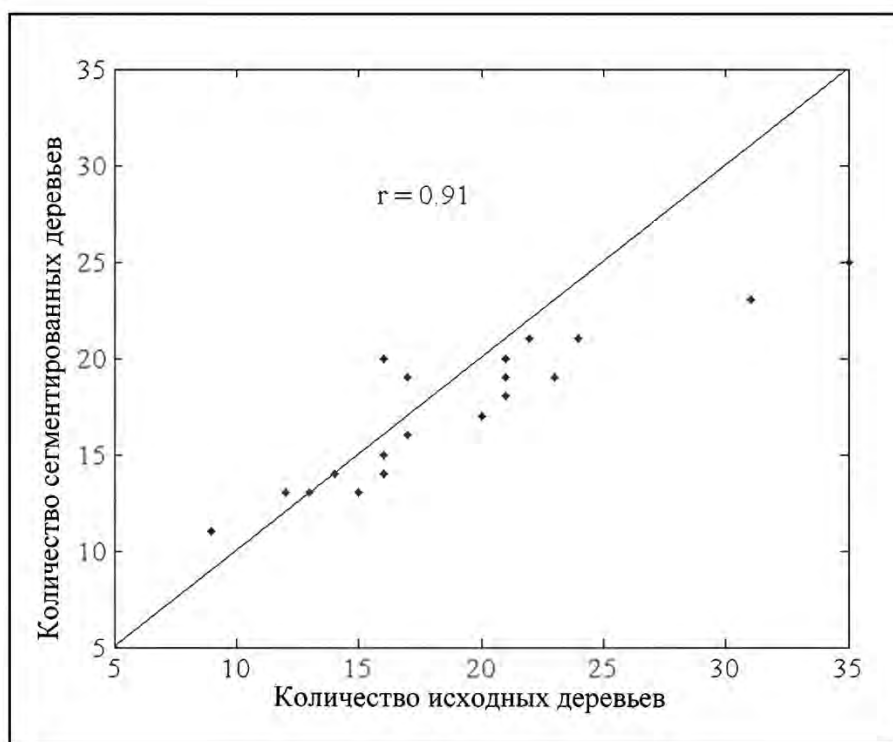


Рис. 59. Взаимосвязь между количествами исходных и сегментированных деревьев на тестовых участках, характеризуемая коэффициентом детерминации 0,828 [A new method for segmenting individual trees from the lidar point cloud, 2012]

В предложенном алгоритме использовано нетрансформированное необработанное облако точек, что обеспечило точность обнаружения отдельных деревьев. В целом, с помощью алгоритма около 86 % деревьев на тестовых участках были обнаружены и 94 % деревьев были корректно сегментированы. Алгоритм демонстрирует хорошие возможности для выделения отдельных деревьев в смешанных и сложных хвойных лесах. Однако необходимо оценить его эффективность в других типах лесов, в частности

в лиственных насаждениях [A new method for segmenting individual trees from the lidar point cloud, 2012].

В предложенном алгоритме использована трехмерная структура, присутствующая облаку точек лидара. Оценивается форма лесных деревьев с использованием относительной разницы в расстоянии между верхушками деревьев и их основаниями. Это новая количественная оценка формы дерева, определяемая горизонтальным профилем кроны. Неправильная регистрация может иметь место в тех случаях, когда лазерные импульсы занижают высоту верхушечного побега кроны, но эту проблему можно решить, увеличив плотность точек лидара. В данном исследовании средняя плотность точек лидара превышает 6 точек/м² и на лесопокрытых площадях может быть увеличена до 20 точек/м², что достаточно для получения трехмерной структуры отдельных деревьев [A new method for segmenting individual trees from the lidar point cloud, 2012].

Как и при других методах сегментации деревьев, определение верхушек деревьев является наиболее важным этапом сегментации, поскольку оно существенно влияет на точность результата. В прошлом для определения местоположения верхушек деревьев использовались методы локальной максимальной фильтрации, но при этом сложно определить размер окна поиска [Popescu, Wynne, 2004; Isolating individual trees in a savanna woodland using small footprint lidar data, 2006], особенно в густом и неравномерно сомкнутом лесном пологом. Предложенный алгоритм позволяет избежать этой распространенной проблемы, находя глобальный максимум, сегментируя целевое дерево с помощью правил классификации, а затем вычлняя полученное дерево из облака точек. Впоследствии самая высокая точка в оставшемся облаке точек может быть использована в качестве вершины второго по высоте дерева и т. д. Таким образом, деревья сегментируются индивидуально и последовательно – от самого высокого к самому низкому. Этот подход также способствует повышению точности, по сравнению с предыдущими разработками [A new method for segmenting individual trees from the lidar point cloud, 2012].

В предложенном алгоритме неопределенность при сегментации деревьев в основном определяется величиной порогового расстояния между деревьями. В разреженных древостоях, где расстояние между деревьями велико, для сегментации деревьев можно использовать относительно большое пороговое значение. Однако в густых насаждениях трудно определить подходящее пороговое значение. Более высокий порог может привести к недостаточной сегментации, в то время как меньший порог может дать чрезмерную сегментацию. Избыточную и недостаточную сегментацию можно уменьшить, используя адаптивный порог, предполагая, что более высокие деревья имеют больший диаметр кроны и, следовательно, большее расстояние между ними на верхнем уровне. Адаптивный пороговый подход достаточен для хвойных лесов, и необходимы дополнительные исследования его

применимости в лиственных насаждениях. Стоит отметить, что алгоритм требует больших вычислительных затрат, поскольку точки одна за другой распределяются по соответствующим кластерам дерева. Добавление дополнительных правил значительно увеличивает время вычислений [A new method for segmenting individual trees from the lidar point cloud, 2012].

Таким образом, разработан новый алгоритм для сегментации отдельных деревьев из лидарного облака точек. В новом алгоритме используется нисходящий подход «растущей зоны», который сегментирует деревья по отдельности и последовательно – от самых высоких к самым низким. Алгоритм хорошо зарекомендовал себя при выделении деревьев из лидарного облака точек в сложных смешанных хвойных лесах на пересеченной местности. Полученные критерии точности относительно высоки, что указывает на то, что новый алгоритм имеет хороший потенциал для использования в других лесных районах [A new method for segmenting individual trees from the lidar point cloud, 2012].

2.2.2. Восходящий (*bottom-to-top*) метод сегментации профиля деревьев

Наряду с нисходящим методом сегментации деревьев непосредственно на основе лидарных облаков точек использовали алгоритм *RANSAC* и метод нормализованного сечения (*normalized cut method*), но доля обнаруженных деревьев составила менее 70 % [3D segmentation of single trees exploiting full waveform LIDAR data, 2009]. Разработанные методы сегментации деревьев с использованием лидарных данных не являются идеальными применительно к густым и сложным насаждениям. В некоторых исследованиях точность алгоритма составляла от 40 до 80 %, что недостаточно для корректного моделирования насаждений. В предыдущем параграфе обсуждался алгоритм сегментации деревьев в хвойных лесах на основе нисходящего метода «растущей зоны». Хотя точность этого метода достигала 90 % на некоторых исследуемых участках, когда он применялся к широколиственным лесам, производительность алгоритма была неидеальной [A new method for segmenting individual trees from the lidar point cloud, 2012].

Как уже отмечалось, методы определения крон деревьев, эффективные в хвойных насаждениях, менее эффективны в лиственных [Development of filtering, segmentation and modelling modules for LIDAR and multispectral data as a fundamental of an automatic forest inventory system, 2004; Koch, Heyder, Weinacker, 2006; An individual tree crown delineation method based on multi-scale segmentation of imagery, 2012]. Например, с помощью некоторых из них трудно определить местоположение верхушечного побега, поскольку кроны лиственных деревьев имеют широкий диапазон размеров,

а их ветви переплетаются друг с другом. Это приводит к ложному обнаружению и разделению больших деревьев на несколько небольших. Один из методов, использованных для решения этой проблемы в лиственных лесах, заключался в том, чтобы сначала обнаружить ствол каждого дерева. После определения положения ствола каждого дерева не будет ложно идентифицированных деревьев, состоящих из переплетающихся ветвей больших деревьев [A bottom-up approach to segment individual deciduous trees using leaf-off lidar point cloud data, 2014].

Количество энергии, отраженной от объекта к датчику, называют *интенсивностью сканирования* [A bottom-up approach to segment individual deciduous trees using leaf-off lidar point cloud data, 2014]. Это зависит от многих переменных, таких как мощность лазера, угол падения, расстояние между датчиком и мишенью, поглощение воздухом и текстурные свойства поверхности мишени [Coren, Sterzai, 2006], и на количество энергии влияет главным образом коэффициент отражения от объекта [Assessing the possibility of land-cover classification using lidar intensity data, 2002]. Было показано, что коэффициент отражения полезен при идентификации видов деревьев [Remote sensing of species mixtures in conifer plantations using LiDAR height and intensity data, 2007], коррекции контурного смещения [Vosselman, 2002] и прогнозирования надземной биомассы [Estimating biomass carbon stocks for a Mediterranean forest in central Spain using LiDAR height and intensity data, 2010].

В связи с этим предложен восходящий (*bottom-to-top*) метод выделения стволов деревьев, основанный на информации об интенсивности сканирования, полученной из облака точек лидара, и на сегментации деревьев в зависимости от относительного расстояния между точками облака [A bottom-up approach to segment individual deciduous trees using leaf-off lidar point cloud data, 2014]. Исследования были проведены в дубово-березовых насаждениях США. Лидарные данные получены с помощью системы *Optech Gemini ALTM 06SEN/CON195* и цифрового преобразователя *08DIG017*, установленных на хвостовой части самолета *Cessna 337* Национального центра лазерного воздушного картографирования. В процессе сканирования средняя высота полета составляла 600 м, а средняя скорость полета – 60 м/с. Частота сканирования, угол сканирования и ширина полосы составляли соответственно 55 Гц, $\pm 15^\circ$ и 277 м. Плотность точек в собранных данных составляла 10,28 пикселей на м^2 [A bottom-up approach to segment individual deciduous trees using leaf-off lidar point cloud data, 2014].

Было подобрано 23 тестовых участка размером 40×40 м, из которых три участка имели низкую густоту с целью продемонстрировать метод, основанный на интенсивности сканирования, а остальные 20 участков были использованы для оценки точности алгоритма. Поскольку в густом насаждении трудно получить хороший сигнал и, следовательно, сопоставить наземные данные с облаком точек лидара, для создания проверочных данных была

применена ручная разметка. Все деревья на 23 квадратных участках были выделены вручную из трехмерного облака точек, зарегистрированного с помощью ресурса *EsriArcScene* [A bottom-up approach to segment individual deciduous trees using leaf-off lidar point cloud data, 2014]. Путем интерполяции наземных точек с использованием обычного кригинга [Effects of topographic variability and lidar sampling density on several DEM interpolation methods, 2010] была сгенерирована цифровая модель рельефа, и путем ее вычитания из облака точек оно было нормализовано [Adaptive clustering of airborne LiDAR data to segment individual tree crowns in managed pine forests, 2010], после чего высотный уровень каждой точки стал истинным расстоянием по вертикали между точкой и поверхностью земли (см. также рис. 1 и рис. 51).

В основу метода положено два свойства лидарного облака точек: интенсивность каждой точки и топологическая взаимосвязь между точками. Сначала выделяются и помечаются точки для стволов деревьев, основываясь на общей разнице в интенсивности между точками для ствола дерева и точками для тонких ветвей (сканировались деревья в безлистном состоянии). Затем точки распределяются по соответствующему стволу дерева на основе топологической зависимости, т. е. расстояния между точками [A bottom-up approach to segment individual deciduous trees using leaf-off lidar point cloud data, 2014]. Интенсивность возвратного сигнала определяется коэффициентом отражения поверхности, который зависит от ее текстуры и шероховатости [Nayar, Ikeuchi, Kanade, 1991]. Поскольку интенсивность точек на стволах деревьев выше, чем на мелких ветвях, из 3D-облака точек лидара у каждого дерева был выделен весь ствол. Методом проб и ошибок установлен порог интенсивности, равный 35, и выделены точки, интенсивность которых превышала пороговое значение. Точки, выделенные в ходе названного процесса, отображают ствол каждого дерева (рис. 60).

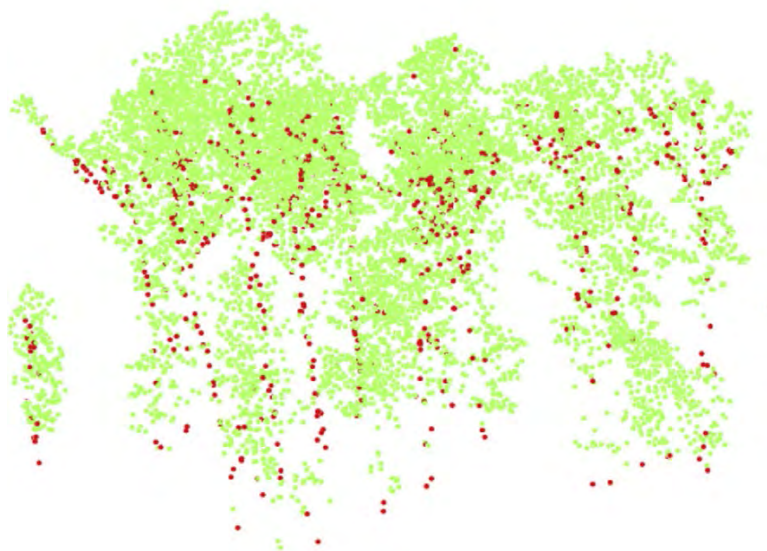


Рис. 60. Извлечение точек ствола дерева путем установки порога интенсивности. Для красных точек интенсивность ≥ 35 , для зеленых интенсивность < 35 [A bottom-up approach to segment individual deciduous trees using leaf-off lidar point cloud data, 2014]

После того как точки для ствола выделены, для сегментирования отдельных стволов использовано расстояние между точками. Как показано на рис. 61, *а*, нижние горизонтальные расстояния $d1$ и $d2$ больше, чем верхние $d3$ и $d4$. В густом насаждении, где большинство деревьев перекрывает друг друга, классифицировать точки на более высоких уровнях становится все труднее. Чтобы решить эту проблему, точки идентифицируются последовательно снизу вверх. Исходной служит самая низкая точка в облаке. Каждый ствол дерева идентифицируется и «выстраивается», или «выращивается», начиная с исходной точки, путем включения близлежащих точек того же ствола дерева и исключения точек других стволов в соответствии с их относительным расстоянием. Точки с расстояниями по горизонтали, превышающими определенный порог, исключаются из целевого ствола, а точки с расстояниями по горизонтали, меньшими, чем заданное пороговое значение, распределяются вдоль по стволу целевого дерева. Для густых насаждений, где среднее расстояние между деревьями составляет менее 1 м, пороговое значение расстояния по горизонтали может быть установлено на уровне 0,9 м или меньше. В данном случае эмпирическим путем установлен порог горизонтального расстояния, равный 1,5 м [A bottom-up approach to segment individual deciduous trees using leaf-off lidar point cloud data, 2014].

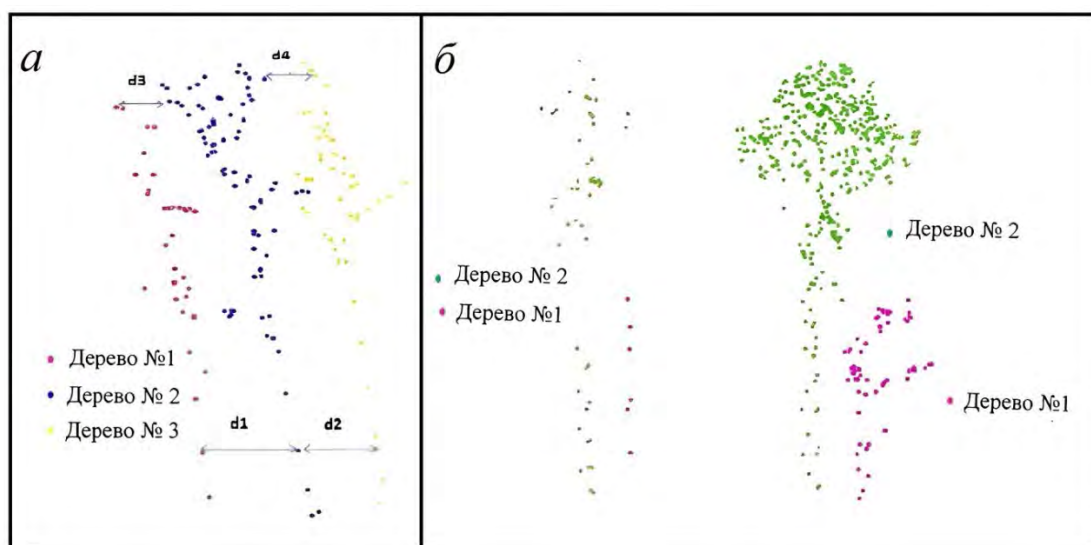


Рис. 61. Расстояние по горизонтали между стволами: *а* – внизу больше, чемверху; *б* – дерево № 1 перекрывается деревом № 2 [A bottom-up approach to segment individual deciduous trees using leaf-off lidar point cloud data, 2014]

По мере увеличения высоты лидирующие деревья могут закрывать более мелкие, как показано на рис. 61, *б*. Ветви с более высоких деревьев могут быть распределены между деревьями меньшего размера, если единственным критерием сравнения является расстояние по горизонтали. Чтобы правильно распределить точки на верхних уровнях, в процесс сегментации добавляется трехмерное сравнение расстояний.

Как только высота по вертикали превысит определенный порог, помимо введения порога отсечения по горизонтали (например, 1,5 м), сравнивается трехмерное расстояние между целевой точкой и всеми остальными точками на стволах деревьев. В частности, если двумерное расстояние между целевой точкой и точкой на стволе определенного дерева меньше горизонтального порога, а трехмерное расстояние между ними является наименьшим, по сравнению с другими точками, целевая точка будет отнесена к целевому дереву. Как показано на рис. 62, без трехмерного сравнения расстояний некоторые точки на дереве № 2 по вертикали будут ошибочно отнесены к дереву № 1. Вертикальный порог зависит от высоты нижнего уровня кроны, и в данном исследовании принят равным 15 м. После завершения процесса сегментации для конкретного ствола дерева точки, которые не были отнесены ни к одному стволу, отсортировываются в последовательности высот, и назначается новая исходная точка.

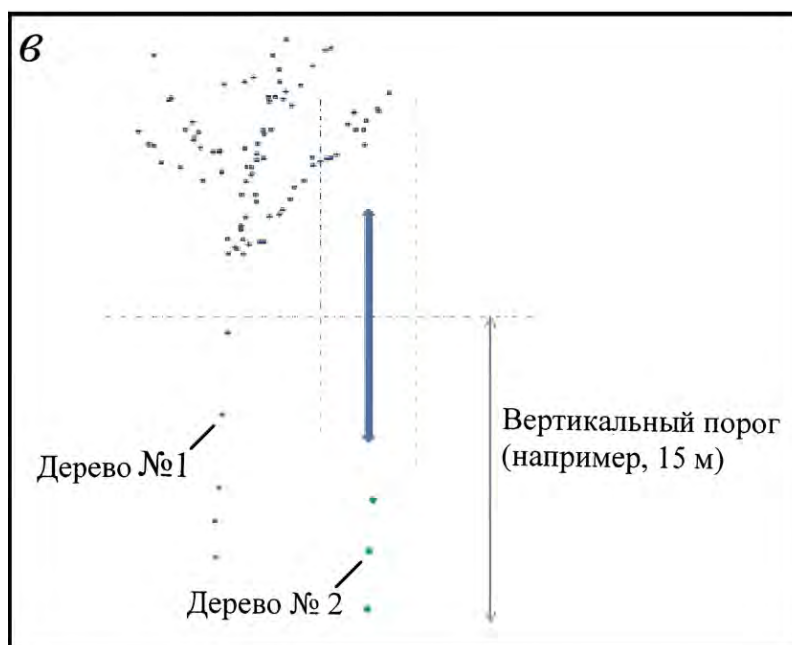


Рис. 62. Без введения вертикального порога часть ветви дерева № 2 будет отнесена к дереву № 1 [A bottom-up approach to segment individual deciduous trees using leaf-off lidar point cloud data, 2014]

Как показано на рис. 63, *a*, точка *A* является низшей частью дерева 2 (целевого). При этом точка *B* не относится к дереву 2, поскольку расстояние между точками d_{AB} по горизонтали превышает горизонтальный порог (например, 1,5 м). Точка *D* отнесена к дереву 2, поскольку расстояние по горизонтали между ней и точкой *C*, принадлежащей дереву 2, меньше порогового значения по горизонтали, а трехмерное расстояние d_{CD} является наименьшим. Что касается точки *G*, то хотя двумерное расстояние между ней и точкой *E* меньше горизонтального порога, трехмерное расстояние (по сравнению с d_{FG}) между ними не является наименьшим, поэтому точка *G* не относится к дереву 2.

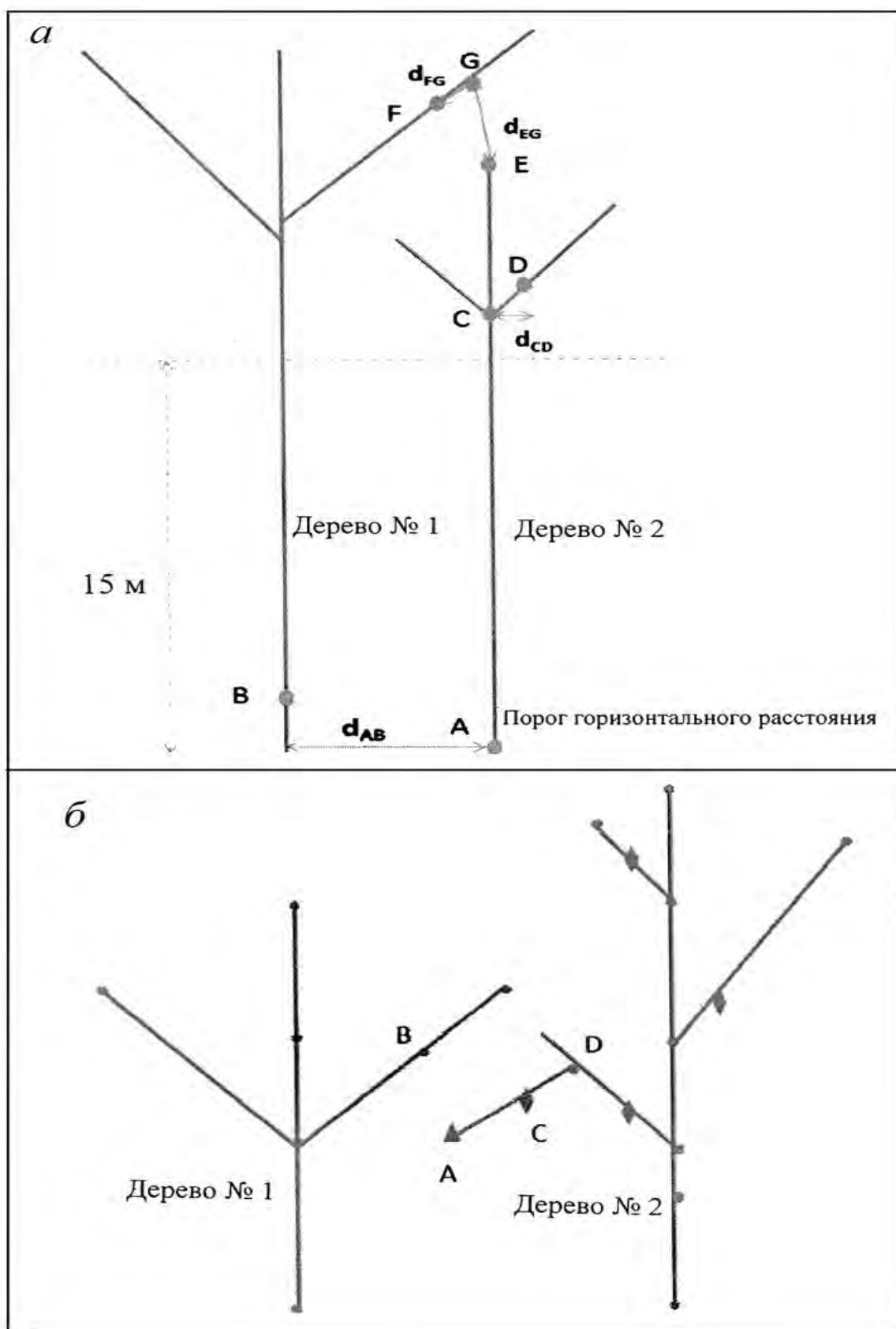


Рис. 63. Схема «выращивания» дерева: а – идентификация расстояний между точками стволов двух деревьев; б – иллюстрация необходимости процесса «выращивания» дерева [A bottom-up approach to segment individual deciduous trees using leaf-off lidar point cloud data, 2014]

После того как все стволы извлечены из облака точек и сегментированы, другие точки, интенсивность которых ниже порогового значения, установленного в процессе извлечения ствола (например, 35), распределяются по соответствующим стволам деревьев. Процесс выделения разделен на две части: «выращивание» ствола дерева и окончательное выделение точек. В процессе «выращивания» ствола дерева в направлении снизу вверх вычисляется трехмерное расстояние, а также двумерное расстояние между точками, интенсивность которых меньше 35, и точками ствола дерева. Только когда трехмерное расстояние является наименьшим, а двумерное расстояние составляет менее 1,5 м (горизонтальный порог), точки относятся к стволу целевого дерева. Если классификация точек основана только на минимальном трехмерном расстоянии между точкой, которую необходимо классифицировать, и точками ствола целевого дерева, без этапа «выращивания» дерева, классификация становится некорректной, особенно если два дерева расположены близко друг к другу. Например, на рис. 64 без процесса «выращивания» дерева одна ветвь, принадлежащая дереву № 2, ошибочно классифицируется как часть дерева № 1 [A bottom-up approach to segment individual deciduous trees using leaf-off lidar point cloud data, 2014].

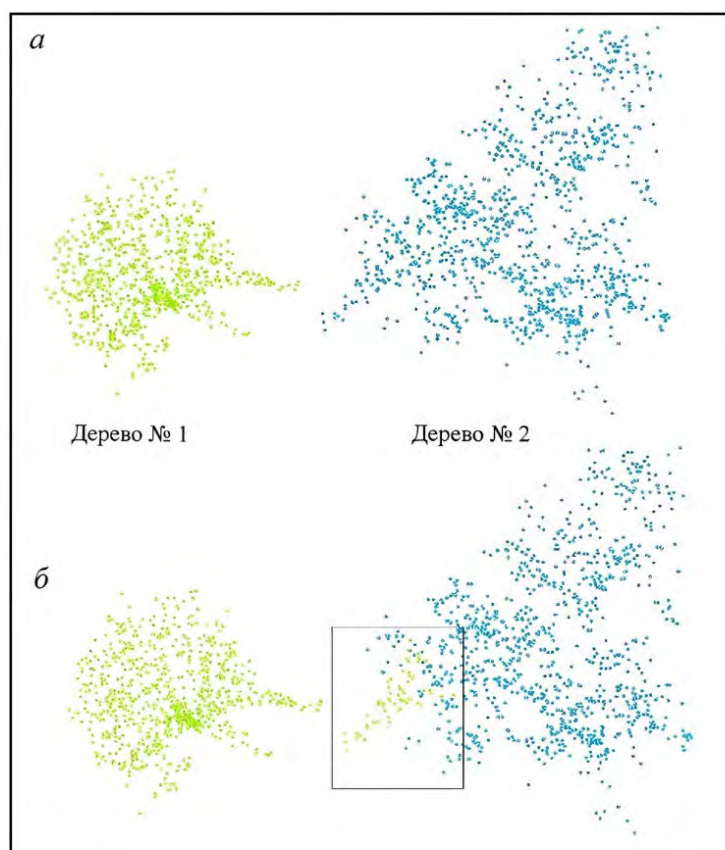


Рис. 64. Сегментация: *a* – правильная; *б* – ложная
[A bottom-up approach to segment individual deciduous trees
using leaf-off lidar point cloud data, 2014]

Причина этого явления заключается в том, что конечная точка неправильно сегментированной ветви дерева № 2 является самой низкой в этой области. На рис. 63, б точка *A* представляет собой верхушку ветви дерева № 2, кружки представляют точки на стволах деревьев, которые уже были сегментированы в ходе первого процесса, а ромбы представляют точки, которые соответствуют требованиям, указанным выше, и будут отнесены к дереву № 2 в процессе «выращивания» деревьев. Без процесса «выращивания» дерева точка *A* будет отнесена к дереву № 1, поскольку точка *B* является ближайшей к ней сегментированной точкой. Однако, как только будет применен процесс «выращивания» дерева, сначала точка *C* будет отнесена к дереву № 2, а затем в конце процесса к дереву № 2 будет отнесена точка *A*, поскольку трехмерное расстояние между *A* и *C* является наименьшим. В целом, процесс «выращивания» деревьев предназначен для устранения неправильной классификации окончаний ветвей, которые находятся рядом с соседними деревьями [A bottom-up approach to segment individual deciduous trees using leaf-off lidar point cloud data, 2014].

В процессе окончательного распределения точки, не соответствовавшие требованиям, указанным в процессе «выращивания» ствола дерева, относятся к «полурастущим» деревьям, полученным на последнем этапе, когда механизм распределения точек состоит в сравнении трехмерных расстояний до сегментированных «полурастущих» деревьев. Точка назначается целевому дереву, если трехмерное расстояние до одной из точек такого дерева является самым коротким [A bottom-up approach to segment individual deciduous trees using leaf-off lidar point cloud data, 2014].

Таким образом, данные о стволах деревьев сначала извлекаются на основе порогового значения интенсивности сигнала, а затем сегментируются с использованием комбинации 2D- и 3D-порогов отсечения. Точки, интенсивность которых меньше порогового значения, распределяются по соответствующим стволам деревьев в два этапа – процесс «выращивания» ствола дерева и окончательный процесс распределения точек. Предложенный алгоритм является гибким и объектно-ориентированным и может быть модифицирован и адаптирован к различным типам лиственных лесов [A bottom-up approach to segment individual deciduous trees using leaf-off lidar point cloud data, 2014].

Оценка адекватности результата рассчитывается по аналогии с предыдущим параграфом [Goutte, Gaussier, 2005; Sokolova, Japkowicz, Szpakowicz, 2006] по формулам (5)–(7). Как указывалось выше, для демонстрации применимости описываемого метода были использованы три тестовых участка с редким размещением деревьев. Сравнение исходного и сегментированного облаков точек с одного из трех тестовых участков (рис. 65, а, б) свидетельствует о корректной сегментации всех четырех деревьев. Затем метод был применен к данным остальных 20 тестовых участков с высокой плотно-

стью размещения деревьев. На рис. 65, *в–е* показаны соответственно исходное облако точек, результаты извлечения ствола дерева, результаты процесса «выращивания» ствола дерева и результаты окончательного процесса «выращивания» на одном из названных 20 участков. Очевидно, что большинство деревьев после процесса сегментации классифицируется правильно [A bottom-up approach to segment individual deciduous trees using leaf-off lidar point cloud data, 2014].

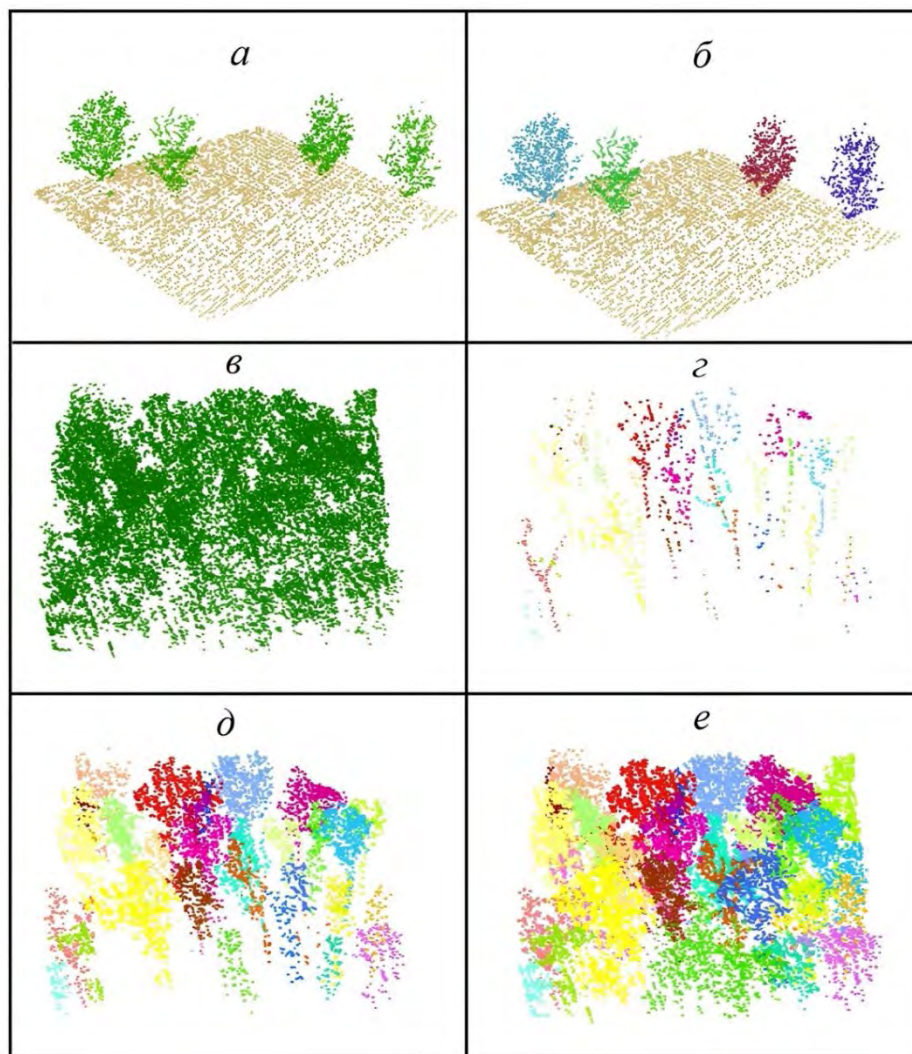


Рис. 65. Последовательность сегментации деревьев: *а* – исходное облако точек для четырех деревьев; *б* – полностью сегментированное облако точек для четырех деревьев; *в* – исходное облако точек лидара; *г* – извлечение ствола дерева; *д* – результат процесса «выращивания» дерева; *е* – полностью сегментированное облако точек [A bottom-up approach to segment individual deciduous trees using leaf-off lidar point cloud data, 2014]

Оценка точности предложенного алгоритма сегментации деревьев на 20 тестовых участках показала, что значение *recall* варьирует от 0,73 до 0,97, в среднем 0,84. Значение *precision* варьирует от 0,92 до 1,00, в среднем 0,97. Коэффициент *F*, который учитывает оба названных фактора, варьирует от 0,85 до 0,97 при среднем значении 0,90 [A bottom-up approach to

segment individual deciduous trees using leaf-off lidar point cloud data, 2014]. Таким образом, показатели точности предложенного восходящего алгоритма, реализованного в лиственных насаждениях, практически одинаковы с показателями точности нисходящего алгоритма, реализованного в предыдущем параграфе в хвойных насаждениях [A new method for segmenting individual trees from the lidar point cloud, 2012].

Зависимость между количеством эталонных и сегментированных деревьев на участках при восходящем алгоритме (за исключением трех участков с разреженными лиственными насаждениями) показана на рис. 66. Коэффициент детерминации R^2 составил 0,928, что существенно выше аналогичного показателя (0,828), полученного нисходящим методом в хвойных насаждениях [A new method for segmenting individual trees from the lidar point cloud, 2012]. В целом, предложенный восходящий метод занижает количество сегментированных деревьев, поскольку из общего количества 770 эталонных деревьев на 20 участках сегментировано только 669 деревьев, из них 648 сегментированы по предложенному методу корректно. Таким образом, предложенный алгоритм пропустил 122 дерева и ошибочно обнаружил 21 дерево [A bottom-up approach to segment individual deciduous trees using leaf-off lidar point cloud data, 2014]. Для сравнения: с использованием нисходящего алгоритма в хвойных насаждениях было пропущено 53 дерева и ошибочно обнаружено 20 деревьев, при этом недостаточная сегментация превысила избыточную [A new method for segmenting individual trees from the lidar point cloud, 2012].

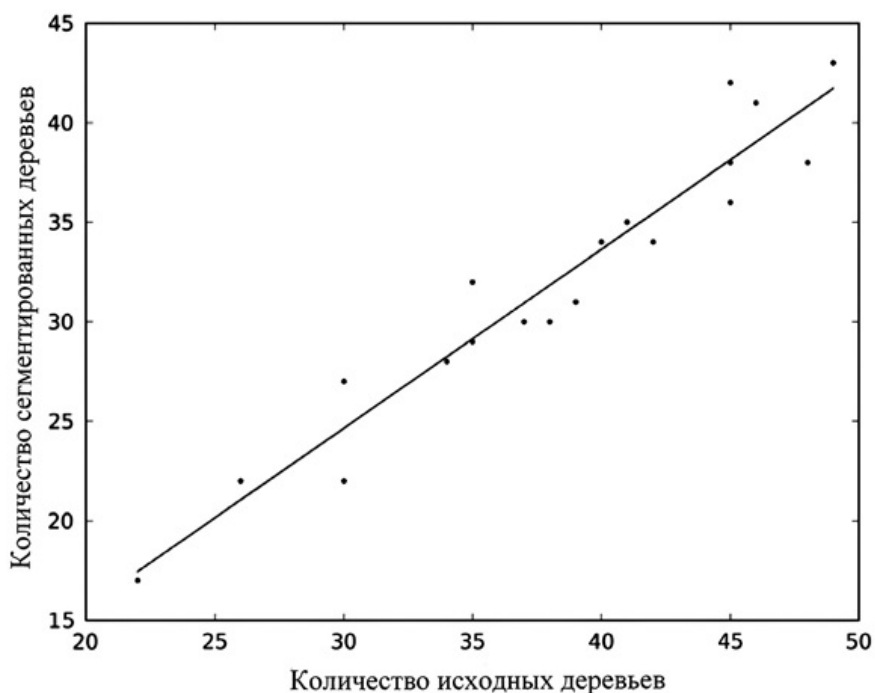


Рис. 66. Зависимость между количеством исходных и правильно сегментированных деревьев на 20 тестовых участках при восходящем алгоритме [A bottom-up approach to segment individual deciduous trees using leaf-off lidar point cloud data, 2014]

Как уже упоминалось, описанный восходящий метод сегментации был применен к деревьям лиственных видов в безлистном состоянии. Авторы восходящего метода [A bottom-up approach to segment individual deciduous trees using leaf-off lidar point cloud data, 2014] протестировали нисходящий метод сегментации, примененный ранее к хвойным насаждениям [A new method for segmenting individual trees from the lidar point cloud, 2012], используя данные деревьев лиственных видов как в облиственном, так и безлистном состоянии. При изменении горизонтального и вертикального порогов нисходящего метода применительно к лиственным деревьям в облиственном состоянии установлено, что ранее сегментированные по восходящему методу четыре дерева при использовании нисходящего метода оказались разделенными на 17 деревьев, а на другом участке три из пяти деревьев были сегментированы неправильно. Результаты были аналогичными и для безлистных деревьев. Причина уже упоминалась: в отличие от хвойных, кроны лиственных деревьев имеют неправильную форму (симподиальное ветвление).

Основное достоинство предложенного восходящего алгоритма состоит в том, что процесс сегментации начинается с самого низа, где каждый ствол виден четко и его легче обнаружить, чем на более высоких уровнях насаждения. При этом могут быть обнаружены небольшие деревья, перекрываемые более крупными.

Второе достоинство восходящего метода заключается в использовании трехмерной структуры лидарного облака точек. В методах, использующих преобразование облака точек с привязкой к сетке [Isolating individual trees in a savanna woodland using small footprint lidar data, 2006], неопределенности, вносимые интерполяцией, влияют на точность результата сегментации. Восходящий алгоритм работает непосредственно с облаком точек и, следовательно, снижает неопределенность. Кроме того, он использует все существующие точки, в то время как методы, основанные на модели высоты полога, используют только первые и последние импульсные точки; это означает, что с помощью восходящего метода можно получить более детальную структуру полога.

Третьим достоинством, а также важным нововведением в восходящем алгоритме является использование фактора интенсивности для извлечения стволов деревьев в лиственном лесу. В большинстве случаев от стволов отражается достаточное количество точек, поскольку данные воздушного зондирования обычно собираются с разных углов сканирования с наложением точек. При использовании порогового значения интенсивности большинство точек, представляющих увядшие (усохшие) листья и мелкие ветви, отфильтровываются. Тем самым повышается точность сегментации, поскольку большинство «шумовых» точек на исследуемых участках не регистрируется [A bottom-up approach to segment individual deciduous trees using leaf-off lidar point cloud data, 2014].

Тем не менее восходящий алгоритм имеет некоторые ограничения. Как отмечалось выше, процесс сегментации начинается с самого низа, что означает, что на его результат влияет наличие подлеска на некоторых участках. Для устранения помех, создаваемых подлеском, устанавливается пороговое значение высоты (например, 2 м). Хотя это пороговое значение позволяет отфильтровывать подлесок из облака точек, будут отфильтровываться и некоторые деревья основного полога высотой менее 2 м. Вторым ограничением восходящего алгоритма является установка порога интенсивности. Пока что он определяется методом проб и ошибок. Третье ограничение заключается в том, что метод можно использовать только в безлистном состоянии деревьев. У облиственных деревьев интенсивность для листвы так же велика, как для стволов, что создает помехи процессу извлечения ствола дерева [A bottom-up approach to segment individual deciduous trees using leaf-off lidar point cloud data, 2014].

Наконец, общей проблемой для методов обнаружения деревьев с помощью лидара является проблема заниженной сегментации: 14 % деревьев при нисходящем методе и около 16 % деревьев при восходящем не могут быть обнаружены на исследуемых участках. Общее количество деревьев при лидарном зондировании недооценивается и при других методах сегментации [Koch, Heyder, Weinacker, 2006; Solberg, Naesset, Bollandsas, 2006; Isolating individual trees in a savanna woodland using small footprint lidar data, 2006; A new method for segmenting individual trees from the lidar point cloud, 2012]. Поэтому при оценке лесной биомассы на основе методов сегментации деревьев по данным лидарного облака точек необходимо внесение поправок.

В целом, применение лидара играет важную роль в исследованиях лесов и управлении ими. На основе информации о сегментированных деревьях могут быть построены экологические модели, которые имеют огромное значение для понимания различных биогеохимических процессов в природе [A bottom-up approach to segment individual deciduous trees using leaf-off lidar point cloud data, 2014].

2.3. Сравнение точности методов сегментации по растровой модели высоты полога и по лазерному облаку точек

Определение границ (оконтуривание) отдельных крон деревьев с помощью платформ дистанционного зондирования позволяет получать подробную инвентаризацию деревьев и информацию о них на больших площадях. Хотя ручное определение границ крон по изображениям с высоким разрешением обеспечивает точные измерения на небольших объектах [Clark, Roberts, Clark, 2005; Combining high spatial resolution multi-temporal satellite data with leaf-on LiDAR to enhance tree species discrimination at the crown level,

2018], необходимы эффективные автоматизированные методы для их масштабирования на более крупные географические регионы. Учитывая, что многие леса по всему миру находятся под растущим давлением изменения климата [Shifts in tree functional composition amplify the response of forest biomass to climate, 2018], инвазивных вредителей [No saturation in the accumulation of alien species worldwide, 2017] и изменений в землепользовании [Houghton, 1995], надежные методы измерения и картографирования лесов приобретают дополнительную актуальность. Тем не менее широкомасштабное применение автоматизированных методов оконтуривания крон деревьев остается сложной задачей, а их надежность остается неопределенной [Tree species traits determine the success of LiDAR-based crown mapping in a mixed temperate forest, 2020].

Была проделана значительная работа по разработке и совершенствованию автоматизированных методов оконтуривания крон деревьев [An individual tree crown delineation method based on multi-scale segmentation of imagery, 2012; A survey of remote sensing-based aboveground biomass estimation methods in forest ecosystems, 2014; Agent-based region growing for individual tree crown delineation from airborne laser scanning (ALS) data, 2015; Layer stacking: A novel algorithm for individual forest tree segmentation from LiDAR point clouds, 2017; Improving individual tree crown delineation and attributes estimation of tropical forests using airborne LiDAR data, 2018; 3D-segmentation of trees through a flexible multiclass graph cut algorithm, 2019]. Лидарные методы оконтуривания крон, как правило, предпочтительнее спектральных методов, поскольку они не подвержены влиянию теней и дефектов освещения [Delineation of individual tree crowns from ALS and hyperspectral data: A comparison among four methods, 2015], а также вследствие их способности непосредственно измерять архитектуру крон [Zhen, Quackenbush, Zhang, 2016]. Однако данные о точности различных методов, основанных на лидарах, значительно различаются [A bottom-up approach to segment individual deciduous trees using leaf-off lidar point cloud data, 2014]. Успех оконтуривания крон напрямую связан с архитектурой крон отдельных деревьев и их положением относительно соседей [Comparative testing of single-tree detection algorithms under different types of forest, 2011]. Архитектура кроны определяется расположением листьев [Valladares, Niinemets, 2007] и необходимостью балансирования между получением ресурсов, например света, и механическими ограничениями, например прогибание под собственным весом [Towards a worldwide wood economics spectrum, 2009]. Форма кроны деревьев довольно пластична [Muth, Bazzaz, 2003; Pretzsch, 2014; Diversity and competition influence tree allometric relationships – developing functions for mixed-species forests, 2017], и на нее влияют конкурентные взаимодействия с соседними деревьями [From competition to facilitation: How tree species respond to neighbourhood diversity, 2017], а также история насаждения [Oliver,

Stephens, 1977; Diversity and competition influence tree allometric relationships – developing functions for mixed-species forests, 2017].

Несмотря на кажущуюся случайную природу структурного развития кроны и древостоя, существуют также предсказуемые различия между функциональными типами вечнозеленых хвойных и листопадных лиственных пород, которые влияют на точность оконтуривания крон. Хвойные и лиственные породы различаются по своим физиологическим особенностям и способам адаптации к наличию ресурсов [Brodribb, Pittermann, Coomes, 2012; The enigma of the rise of angiosperms: Can we untie the knot? 2014], которые проявляются в различиях в форме крон и географии древостоев. Методы оконтуривания крон, основанные на лидарах, были успешно применены в насаждениях с преобладанием хвойных пород [A new method for segmenting individual trees from the lidar point cloud, 2012; International benchmarking of the individual tree detection methods for modeling 3-D canopy structure for silviculture and forest ecology using airborne laser scanning, 2016; Imputation of individual longleaf pine (*Pinus palustris* Mill.) tree attributes from field and LiDAR data, 2016], но оказались менее эффективными в лиственных насаждениях [Spatial partitioning of biomass and diversity in a lowland Bolivian forest: Linking field and remote sensing measurements, 2008; Zhen, Quackenbush, Zhang, 2016]. Различия в точности методов оконтуривания между хвойными и лиственными насаждениями часто объясняют характерной плагиотропной формой (эллипсоидной или зонтичной) крон лиственных деревьев, что затрудняет идентификацию их верхушек, отделение от соседних крон и очерчивание единого контура кроны у дерева с раздвоенными стволами [A bottom-up approach to segment individual deciduous trees using leaf-off lidar point cloud data, 2014].

Леса умеренного пояса на северо-востоке США, как правило, представляют собой густые смешанные насаждения с сомкнутым пологом, кроны которых часто перекрываются и имеют неправильную форму. В этих лесах с помощью комплекса лидарных, гиперспектральных и тепловых датчиков (G-LiHT) [NASA Goddard's LiDAR, hyperspectral and thermal (G-LiHT) airborne imager, 2013] были получены лидарные (БПЛА) облака точек и гиперспектральные данные. Облако лидарных точек имело среднюю плотность 26,98 точек на 1 м² с 1-метровым пространственным разрешением гиперспектральных и лидарных данных модели высоты полога. Все кроны деревьев, визуально различимые на 15 участках, были оконтурены вручную с помощью экранной оцифровки изображения, полученного с БПЛА. Кроны нижнего яруса не учитывались, поскольку не были видны на снимках. Ручное оконтуривание крон деревьев было выполнено стилусом с использованием плагина для ручного редактирования в QGIS (рис. 67).

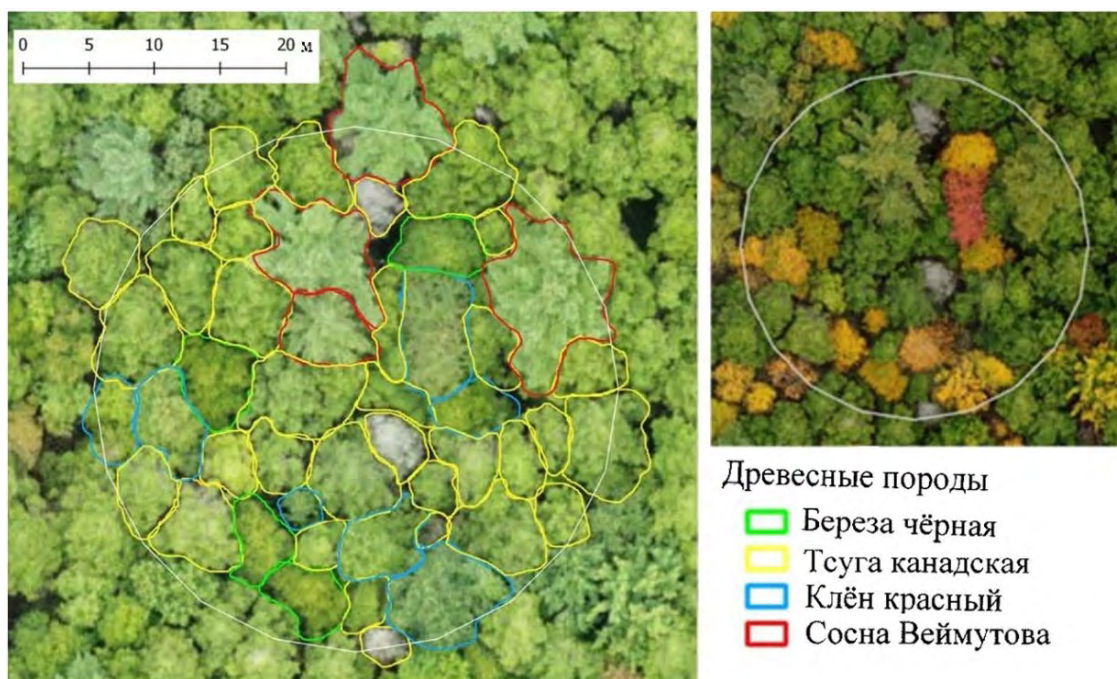


Рис. 67. Результат ручного оконтуривания крон, выполненного с использованием БПЛА-снимков высокого разрешения (слева). Показан пример фенологических различий между породами, он может быть использован для оконтуривания крон, которые в противном случае при ручной интерпретации были бы проигнорированы [Tree species traits determine the success of LiDAR-based crown mapping in a mixed temperate forest, 2020]

Вручную были оконтурены 650 крон деревьев 14 пород. Метка дерева ($M_{ТС}$) и связанные с ней атрибуты ствола (диаметр на высоте груди и аллометрически полученная высота дерева) были присвоены вручную в процессе оцифровки на основе базы данных *ForestGEO*. В редких случаях, когда крона предположительно могла принадлежать одному из нескольких стволов одной и той же породы или стволам разных пород, которые невозможно было отличить с помощью фенологических и структурных признаков, крона присваивалась дереву с большим значением высоты дерева, полученной аллометрически. На каждом участке были рассчитаны площадь кроны и ее максимальная высота, полученная на основе модели высоты полога. Используя метки пород для крон, доля хвойных деревьев на каждом участке была рассчитана как отношение площади крон хвойных деревьев к площади крон широколиственных деревьев [Tree species traits determine the success of LiDAR-based crown mapping in a mixed temperate forest, 2020].

Были протестированы пять методов автоматического оконтуривания крон деревьев ($A_{ТС}$), доступных в пакете *lidR* [Tree species traits determine the success of LiDAR-based crown mapping in a mixed temperate forest, 2020]. В четырех случаях использованы методы на основе растриванной модели высоты полога (CHM), и в одном – 3D-нисходящий (*top-to-bottom*) метод

сегментации профиля деревьев, применяемый непосредственно к облаку лидарных точек. Названы пять методов:

- 1) обычная сегментация морфологического водораздела на основе модели поверхности полога [Vincent, Soille, 1991];
- 2) сегментация морфологического водораздела с маркерным управлением;
- 3) метод поверхности сидов и «растущей зоны» [Dalponte, Coomes, 2016];
- 4) метод поверхности сидов и мозаики Вороного [Imputation of individual longleaf pine (*Pinus palustris* Mill.) tree attributes from field and LiDAR data, 2016];
- 5) нисходящий (*top-to-bottom*) метод сегментации профиля деревьев, примененный непосредственно к облаку точек [A new method for segmenting individual trees from the lidar point cloud, 2012].

Авторы отказались от сглаживания модели высоты полога через гауссову фильтрацию перед оконтуриванием крон, поскольку предварительные результаты показали, что сглаживание либо не привело к заметному улучшению результатов оконтуривания, либо снизило общую точность методов [Tree species traits determine the success of LiDAR-based crown mapping in a mixed temperate forest, 2020].

Прежде чем применить каждый из методов оконтуривания, были оптимизированы параметры по отношению к ручному методу. Каждый метод автоматического оконтуривания имел разные входные параметры алгоритма, управляющие поиском и определением границ по модели высоты полога или по облаку точек, и по сложности входных параметров эти методы различаются. Параметры включают размеры окна поиска, максимальные значения высоты дерева или радиуса кроны и пороговые значения для удаления [Tree species traits determine the success of LiDAR-based crown mapping in a mixed temperate forest, 2020].

Затем были настроены входные параметры каждого метода, чтобы найти наилучшие параметры для настройки изображения, которые обеспечивают максимальную точность для каждого отдельного участка, и найти наилучшие обобщенные параметры – единый набор параметров, который достигал бы наивысшей точности при оценке по всем 15 участкам. Настройка параметров проводилась с использованием бутстрэп-метода, при котором входные параметры выбирались случайным образом в пределах заданного диапазона. После каждой итерации определения границ точность оценивалась путем сравнения сгенерированных полигонов (контуров) A_{ITC} с эталонными полигонами M_{ITC} . Автоматические разграничения были сопоставлены с разграничениями, выполненными вручную, так что каждый заданный M_{ITC} был помечен как правильно или неправильно оконтуренный. Каждой итерации присваивался балл точности обнаружения (DA):

$$DA = n_{TP} / N, \quad (8)$$

где n_{TP} – число правильно оконтуренных A_{ITC} ; N – число M_{ITC} [Yin, Wang, 2016]. Крона A_{ITC} считалась правильно очерченной (истинно положительной), если перекрывалось более 50 % площади как A_{ITC} , так и M_{ITC} (рис. 68).

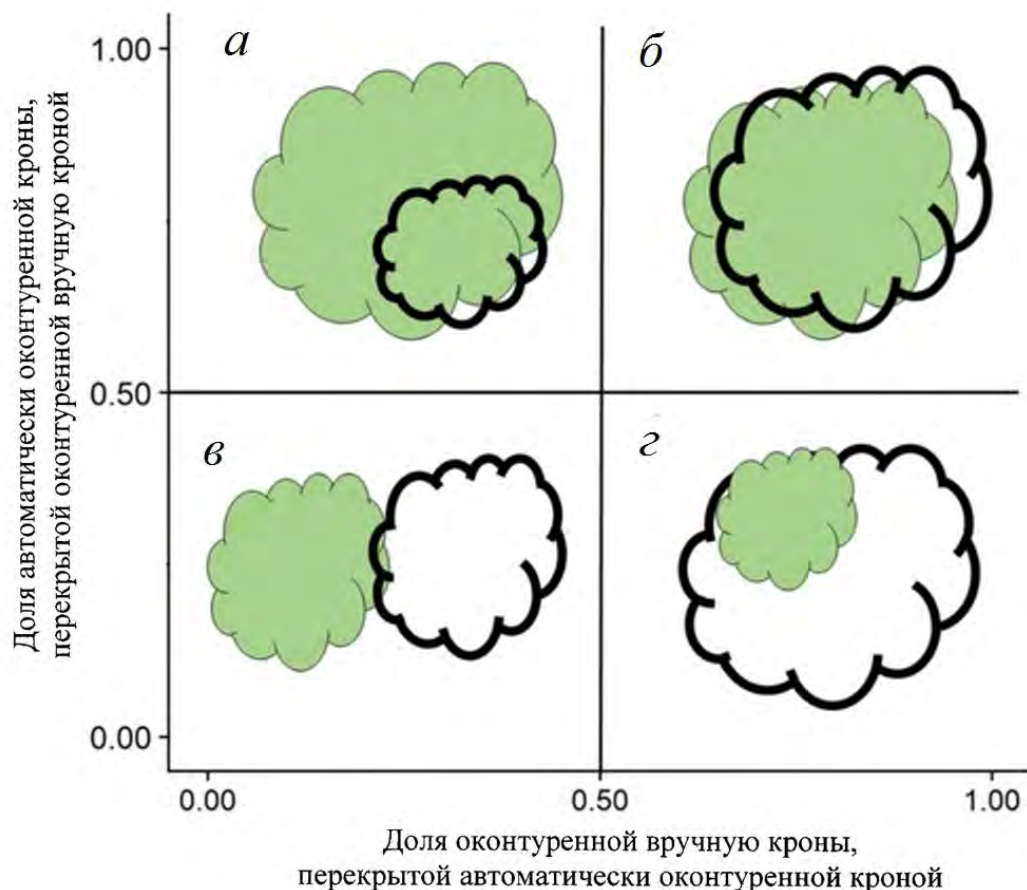


Рис. 68. Результаты автоматизированного оконтуривания крон (A_{ITC} ; выделены жирным шрифтом) сравнивались с контурами крон, выполненными вручную (M_{ITC} ; выделены зеленой заливкой), и были отнесены к одной из четырех категорий в зависимости от величины площади перекрытия: *а* – чрезмерная сегментация: площадь перекрытия между A_{ITC} и M_{ITC} больше или равна 50 % площади только A_{ITC} ; *б* – истинно положительная: площадь перекрытия между A_{ITC} и M_{ITC} больше или равна 50 % площади как A_{ITC} , так и M_{ITC} ; *в* – недостаточная сегментация: площадь перекрытия между A_{ITC} и M_{ITC} больше или равна 50 % площади только M_{ITC} ; *г* – ложноположительный результат: площадь перекрытия между A_{ITC} и M_{ITC} составляет менее 50 % площади как A_{ITC} , так и M_{ITC} [Tree species traits determine the success of LiDAR-based crown mapping in a mixed temperate forest, 2020]

Таким образом, каждая крона была в конечном итоге отнесена к одной из четырех категорий исходя из степени перекрытия A_{ITC} и M_{ITC} (рис. 68). Каждая процедура, за исключением пятой, была повторена 500 раз. Процедура пять была повторена всего 200 раз, поскольку была значительно медленнее, чем по методам с первого по четвертый, и достигнутая максимальная точность не улучшалась после первых 100 итераций. Итерации

настройки были сохранены по каждому методу автоматизированного оконтуривания крон для достижения наибольшей точности настройки параметров на участке и наивысшей точности обобщенных параметров по всем 15 участкам. Учитывая, что любой M_{ITC} может быть связан только с одним A_{ITC} , в случае, когда несколько A_{ITC} попадают в одно M_{ITC} (что может произойти при чрезмерной сегментации), M_{ITC} присваивается тому A_{ITC} , который имеет наибольшую долю перекрытия с конкретным M_{ITC} .

Чтобы понять, какие факторы повлияли на успешность автоматизированного оконтуривания кроны, были оценены переменные на уровне деревьев (диаметр ствола, измеренный в полевых условиях, высота кроны M_{ITC} , полученная на основе модели высоты полога, и площадь кроны M_{ITC}) и показатели на уровне насаждения, связанные с биоразнообразием и густотой [Tree species traits determine the success of LiDAR-based crown mapping in a mixed temperate forest, 2020].

Влияние настройки обобщенных параметров, по сравнению с параметрами по умолчанию, варьировало в зависимости от метода в диапазоне от 1 до 41 %. Хотя дальнейшая настройка параметров метода на уровне участков лишь незначительно улучшила общие показатели точности (+2–5 %), было решено продолжить анализ с использованием результатов, полученных на уровне участков, поскольку точность на уровне участков повысилась на целых 36 %, согласно методу оконтуривания (5), а также потому, что требовалось понять, какие факторы влияли на самое высокое качество оконтуривания. После настройки на уровне участка общая точность и точность на уровне участка существенно не различались в зависимости от метода оконтуривания. Общая точность варьировала от 51 % по первому методу до 59 % по пятому методу. Хотя метод (5) был немного точнее (на 4 %), по сравнению с (2), это приводило к существенному увеличению времени обработки входных параметров. Точность на уровне участка варьировала от низких 27 % (методы (1) и (4)) до высоких 90 % (метод (2)). Разница между наиболее и наименее точно оконтуренным участком составила более 40 % для всех методов. Точность всех методов варьировала одинаково на всех участках и в значительной степени зависела от доли хвойных пород в составе [Tree species traits determine the success of LiDAR-based crown mapping in a mixed temperate forest, 2020].

Крона хвойных деревьев была оконтурена более точно (в среднем 64 %), по сравнению с кроной широколиственных (в среднем 42 %), по всем методам. У каждого метода были свои различия в точности на уровне пород, и ни один метод не отличался наивысшей точностью по всем породам. Например, по методу (4) особенно хорошо были оконтурены кроны сосны красной (81 %), но тот же метод дал стабильно низкие показатели точности по лиственным породам. С другой стороны, метод (1) обладал самой низкой точностью оконтуривания крон сосны красной (53 %), но превосходил другие методы по точности оконтуривания дуба красного (+9 %).

Была выполнена альтернативная оценка точности оконтуривания с помощью глобальной логит-модели (логистическая функция, принимающая значения от 0 до 1). Модель включала независимые переменные уровня дерева (диаметр ствола, высота дерева и площадь горизонтальной проекции кроны) и три переменные на уровне древостоя, связанные с биоразнообразием. Наибольшую точность (70 %) показал метод (1) (обычная сегментация морфологического водораздела на основе модели поверхности полога), включающая в качестве независимых переменных высоту дерева и площадь горизонтальной проекции кроны. Точность остальных четырех методов (2–5), включающих независимые переменные как дерева, так и древостоя, варьировала от 61 до 65 %. Это означало, что, хотя для прогнозирования контура кроны были задействованы наиболее информативные переменные, были и дополнительные факторы, которые не учтены [Tree species traits determine the success of LiDAR-based crown mapping in a mixed temperate forest, 2020].

Таким образом, установлено, что автоматическое оконтуривание крон по лидарным данным является перспективным методом, но его по-прежнему сложно применять в смешанных лесах с закрытым пологом. Все пять методов позволяют лучше очертить крону хвойных деревьев, чем лиственных. Возможный альтернативный путь улучшения картографирования крон смешанных и лиственных насаждений может заключаться в изучении уникальных фенологических и спектральных особенностей различных лиственных пород. Несмотря на методологические различия между исследованными пятью процедурами сегментации, они мало различались по точности. В целом, расхождения в точности оконтуривания крон обусловлены различиями в их архитектуре, а не методами сегментации лидарных данных. Даже при настройке параметров ни один из методов не обеспечил точности выше 51–59 %. Установлено, что, хотя метод сегментации непосредственно облака точек (1) превосходит по точности методы сегментации на основе модели высоты полога (методы (1–4)), это превышение незначительно. Возможно, это связано с тем, что примененный метод валидации (ручное определение границ изображений, полученных с помощью беспилотника) позволял проводить точную съемку крон деревьев, но не учитывал нижний ярус. Методы, основанные на сегментации непосредственно облака точек, превосходят по точности методы, основанные на модели высоты полога, в обнаружении и оконтуривании нижнего яруса и крон угнетенных деревьев [A comparative assessment of the performance of individual tree crowns delineation algorithms from ALS data in tropical forests, 2019], но при оконтуривании крон деревьев преимущество первых меньше [Tree species traits determine the success of LiDAR-based crown mapping in a mixed temperate forest, 2020].

Многие предыдущие исследования показали, что на точность сегментации дерева влияют факторы, выходящие за рамки продвинутого характера и производительности алгоритмов сегментации; эти факторы включают тип исследуемой области и настройки параметров алгоритма [Performance and sensitivity of individual tree segmentation methods for UAV-LiDAR in multiple forest types, 2022]. Тем не менее в большинстве исследований по сегментации отдельных деревьев обсуждался только эффект определенного метода сегментации в конкретном типе исследовательской области, в то время как анализ и сравнение применимости алгоритмов и чувствительности настроек параметров для нескольких типов пробных участков по-прежнему отсутствуют [Combined impact of sample size and modeling approaches for predicting stem volume in *Eucalyptus* spp. forest plantations using field and LiDAR data, 2020]. Кроме того, большинство из этих изученных районов были расположены в лесах бореальной и умеренной зон, а области сегментации деревьев были представлены в основном простыми насаждениями. Сообщалось о небольшом количестве исследований по сегментации отдельных деревьев в субтропических сложных лесных районах. Поэтому была предпринята попытка ответить на вопрос: имеют ли определенные модели и методы сегментации деревьев, основанные на данных бортового лидарного зондирования, некоторые преимущества или недостатки? При оконтуривании деревьев по облакам точек, полученным с помощью БПЛА-лидара, ключевыми моментами, влияющими на точность обнаружения деревьев в разных типах насаждений, являются модели данных, используемые для сегментации отдельных деревьев, выбор метода сегментации и настройка параметров того или иного метода [Performance and sensitivity of individual tree segmentation methods for UAV-LiDAR in multiple forest types, 2022].

Для исследования были выбраны районы, расположенные в зоне субтропического муссонного климата на юге Китая, с участием в составе лесов как хвойных, так и лиственных пород, в том числе с наличием нижнего яруса. Чтобы решить проблему выбора индивидуального алгоритма сегментации деревьев и настроек параметров, был определен наиболее подходящий алгоритм сегментации для нескольких типов насаждений с целью получить оптимальную точность обнаружения деревьев и определения их высоты. В ходе исследования, в соответствии со сложностью выборочных участков на юге Китая, для анализа было отобрано в общей сложности 530 деревьев на девяти участках в трех категориях сложности насаждений: простой структуры, средней сложности и сложной структуры (рис. 69).

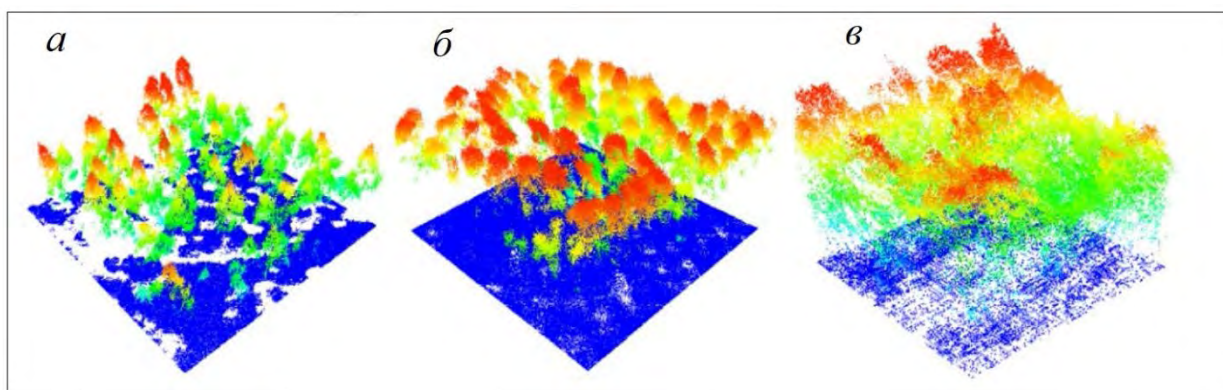


Рис. 69. Участки с тремя типами облаков точек, полученных с помощью БПЛА-лидара:
 а – простой структуры; б – средней сложности; в – сложной структуры
 [Performance and sensitivity of individual tree segmentation methods for UAV-LiDAR
 in multiple forest types, 2022]

На основе предварительной обработки облака точек БПЛА-лидара были сгенерированы данные для модели высоты полога (CHM) и нормализованного облака точек (NPC). Для обнаружения отдельных деревьев и определения их высоты использовались алгоритмы контролируемого маркерами водораздела (WA) и локального максимума (LM), сегментация кластеров на основе облака точек (PCS) и укладка слоев (*layer stacking*) (LS). Для целей валидации было отобрано девять исследовательских участков площадью 0,067 га. На пробных площадях были измерены высота, диаметры ствола и кроны всех деревьев. Для определения местоположения и записи координат каждого дерева применена глобальная система позиционирования (GPS), и эти данные были использованы для оценки точности определения местоположения деревьев с помощью методов сегментации деревьев данного исследования [Performance and sensitivity of individual tree segmentation methods for UAV-LiDAR in multiple forest types, 2022].

Данные лидарных облаков точек были получены с помощью беспилотной платформы *Shanghai Huace navigation BB4*. Режим работы беспилотного летательного аппарата и настройки параметров лидарного датчика были определены в соответствии с высотой полета и перепадами высот на выборочном участке. В частности, высота полета составляла 150 м, интервал между полосами полета – 70–100 м, скорость полета – 6 м/с, частота излучения лазерного импульса – 300 кГц, угол сканирования – 140–180°, а плотность облака точек превышала 300 точек на 1 м². После сбора данных была выполнена обработка системой определения местоположения и ориентации (POS), сращивание воздушных полос и коррекция данных для получения данных об облаке точек с БПЛА-лидара для исследуемой территории. Модели данных, требуемые алгоритмами сегментации деревьев, обычно представляют собой модели высоты полога (CHM) и нормализованного облака точек (NPC) [Gougeon, 1995; Wang, Gong, Biging, 2004; Comparative testing of single-tree detection algorithms under different types of forest, 2011; A survey

of remote sensing-based aboveground biomass estimation methods in forest ecosystems, 2014; A novel vegetation point cloud density tree-segmentation model for overlapping crowns using UAV LiDAR, 2021]. Поэтому данные облака точек, полученные с помощью БПЛА-лидара, предварительно обрабатываются [Performance and sensitivity of individual tree segmentation methods for UAV-LiDAR in multiple forest types, 2022].

Для предварительной обработки данных использовалось программное обеспечение *Lidar 360*. Для устранения шума, создаваемого датчиками и факторами среды, был использован метод шумоподавления, основанный на пространственном расстоянии. Алгоритм определяет наличие зашумленности точки на основе среднего расстояния между целевой точкой в окружении и всеми остальными точками. Количество точек окружения (*neighborhood points*) было установлено равным 20. Затем для классификации наземных точек была использована усовершенствованная прогрессивная триангулированная идентификация нерегулярной сети (IPTD) [Mapping stand age dynamics of the Siberian larch forests from recent Landsat observations, 2016; Wang, Gong, Biging, 2004]. Этот алгоритм генерирует разреженную триангулированную нерегулярную сеть через начальные точки и шифрует каждый слой путем итеративной обработки до тех пор, пока все основные точки не будут классифицированы [A survey of remote sensing-based aboveground biomass estimation methods in forest ecosystems, 2014; A bottom-up approach to segment individual deciduous trees using leaf-off lidar point cloud data, 2014]. Ключевыми параметрами алгоритма в программном обеспечении *Lidar 360* являются максимальный уклон рельефа, угол и расстояние итерации, которые были установлены соответственно на 60°, 10° и 1 м. В пределах древостоя точки, расположенные выше поверхности земли, рассматривались как облака точек растений. В итоге были получены модели как высоты полога, так и нормализованного облака точек [Performance and sensitivity of individual tree segmentation methods for UAV-LiDAR in multiple forest types, 2022].

Упомянутые выше четыре метода сегментации деревьев, использованные в данном исследовании, были обозначены аббревиатурами WA, LM, PCS и LS. Методы сегментации WA и LM основаны на модели высоты полога, в то время как PCS и LS являются алгоритмами, основанными непосредственно на лидарных облаках точек. Алгоритмы контролируемого маркерами водораздела (WA) и локального максимума (LM) были изложены в предыдущих п. 1.1.3 и 1.1.1 [Koch, Heyder, Weinacker, 2006; Persson, Holmgren, Södermann, 2002], а сегментация кластеров на основе облака точек (PCS) – в п. 1.2.1 [A new method for segmenting individual trees from the lidar point cloud, 2012]. Алгоритм укладки слоев (*layer stacking*) (LS) ранее был лишь упомянут [Individual tree detection and crown delineation from unmanned aircraft system (UAS) LiDAR in structurally complex mixed species eucalypt forests, 2021], и здесь нужно дать о нем краткое представление.

Алгоритм укладки слоев основан на данных нормализованного облака точек (NPC). Облако точек полого разрезается слоями с заданным интервалом, в каждом слое определяется положение дерева, и для получения репрезентативного контура дерева результаты по всем слоям объединяются [Individual tree detection and crown delineation from unmanned aircraft system (UAS) LiDAR in structurally complex mixed species eucalypt forests, 2021]. Основная идея алгоритма заключалась в следующем [Performance and sensitivity of individual tree segmentation methods for UAV-LiDAR in multiple forest types, 2022]:

1) расслоение облака точек, начатое с высоты 0,5 м над землей, продолжено с интервалом 1 м вплоть до достижения самой высокой точки (верхушки дерева) (рис. 70);

2) кластеризация облаков точек. Применена кластеризация по К-среднему значению с целью сгруппировать данные облака точек с фрагментами до ближайшей исходной точки, и этот процесс повторяли до тех пор, пока положение исходной точки не изменялось. При этом желательно было получить исходные точки дерева для каждого слоя;

3) построение полигонов. В каждом слое строили полигон Тиссена, используя начальные точки дерева;

4) наложение и слияние. Полигоны Тиссена в каждом слое складывали, чтобы создать большое количество растрированных перекрывающихся полигонов. Область значительного перекрытия – это область высокой плотности кроны дерева, указывающая на присутствие дерева в области многоугольного перекрытия. Толщина слоя (n), используемая в алгоритме LS, влияет на способность метода обнаруживать деревья на разных уровнях насаждения [Performance and sensitivity of individual tree segmentation methods for UAV-LiDAR in multiple forest types, 2022].

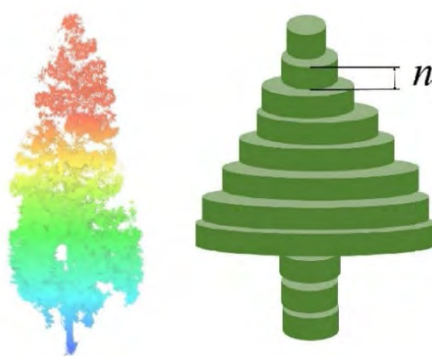


Рис. 70. Схема алгоритма укладки слоев (метод LS) [Performance and sensitivity of individual tree segmentation methods for UAV-LiDAR in multiple forest types, 2022]

Были реализованы четыре разных алгоритма сегментации дерева с использованием программного обеспечения *Python*. Чтобы оценить эффективность и чувствительность четырех алгоритмов, результаты сегментации деревьев сравнивались с их высотой и положением, наблюдаемыми в полевых

условиях, с использованием трех показателей: «полнота» (*recall*), «точность» (*precision*) и «F-оценка» (*F-score*). Последняя объединяет первые две и служит стандартом оценки моделей классификации. Формулы и назначение названных трех показателей были приведены в одном из предшествующих п. 1.2.1 [A new method for segmenting individual trees from the lidar point cloud, 2012].

Сгенерированные данные для модели высоты полога (CHM) и нормализованного облака точек (NPC) показаны для участка 6 на рис. 71. Кроме того, на рис. 71, а–д отображены результаты с растровым разрешением соответственно 0,1×0,1 м, 0,2×0,2 м, 0,3×0,3 м, 0,4×0,4 м и 0,5×0,5 м, а на рис. 71, е – результат модели по нормализованному облаку точек. С увеличением растрового разрешения детали модели высоты полога сглаживаются, а при уменьшении разрешения до 0,1 м выступающие границы крон и низкие кустарники на локальных участках влияют на точность сегментации деревьев. Напротив, оценка по нормализованному облаку точек сохраняет полную трехмерную информацию о деревьях и устраняет влияние рельефа местности [Performance and sensitivity of individual tree segmentation methods for UAV-LiDAR in multiple forest types, 2022].

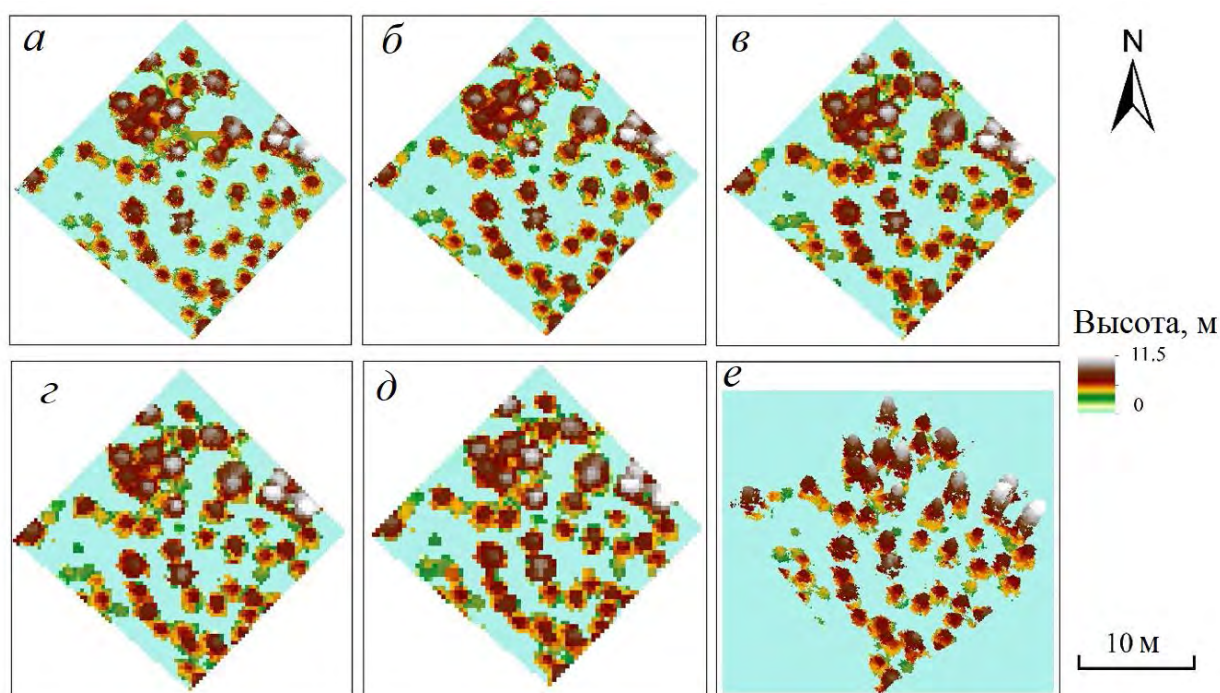


Рис. 71. Сгенерированные данные для модели высоты полога (CHM) и нормализованного облака точек (NPC) для участка 6: а – 0,1×0,1 м; б – 0,2×0,2 м; в – 0,3×0,3 м; г – 0,4×0,4 м; д – 0,5×0,5 м; е – результат модели по нормализованному облаку точек [Performance and sensitivity of individual tree segmentation methods for UAV-LiDAR in multiple forest types, 2022]

Результаты сегментации деревьев по четырем алгоритмам для трех типовых участков показаны на рис. 72. На участке 2 были точно сегментированы все 14 деревьев по каждому из четырех методов. И, напротив, на участке 9 из-за наличия широколиственных пород деревьев эффективность сегментации по методу водораздела (WA) была недостаточной; в частности, этот метод позволял сегментировать только деревья с большими кронами, в то время как эффект сегментации небольших деревьев был относительно слабым [Performance and sensitivity of individual tree segmentation methods for UAV-LiDAR in multiple forest types, 2022].

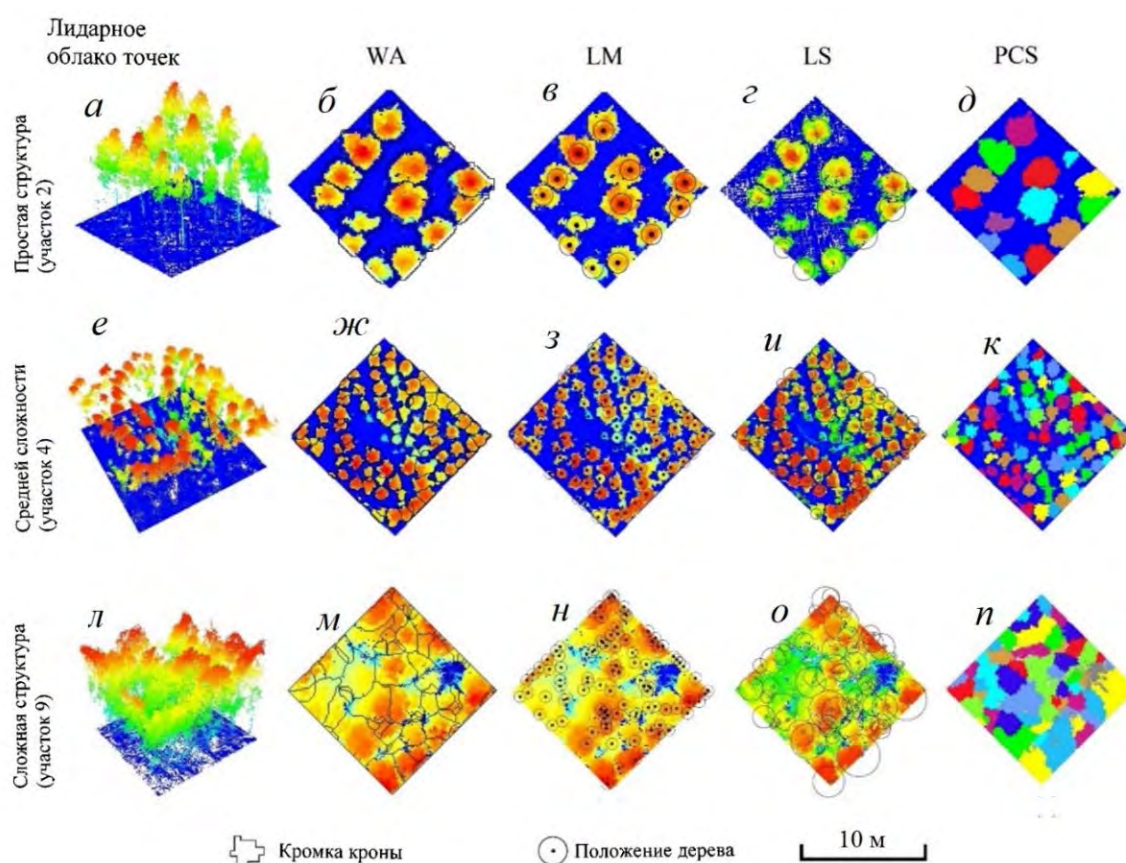


Рис. 72. Эффективность сегментации деревьев на трех типичных участках:
 а, е, л – облака точек с БПЛА-лидара на участках соответственно 2, 4 и 9;
 б, ж, м – значения модели высоты полога после сегментации методом WA;
 в, з, н – значения модели высоты полога после сегментации методом LM;
 г, и, о – значения модели высоты полога после сегментации методом LS;
 д, к, п – то же после сегментации непосредственно облака точек (PCS)
 [Performance and sensitivity of individual tree segmentation methods for UAV-LiDAR
 in multiple forest types, 2022]

Точность сегментации деревьев оценивалась путем сопоставления результатов, полученных с помощью четырех методов сегментации на девяти пробных участках. Результаты экспериментов показали, что на участках простой структуры «полнота» обнаружения (*recall*) и «точность» (*precision*)

превышали соответственно 86,4 и 85,3 %, а *F-score* превышала 0,874. На участке 2 с пихтой китайской «полнота» и «точность» были равны 100 %, а «F-оценка» равна 1 по всем четырем методам. На участках средней сложности «полнота» варьировала от 78,6 до 93,3 %, «точность» – от 75,76 до 98,57 %, а *F-score* варьировала от 0,794 до 0,952. Метод сегментации непосредственно по облакам точек (PCS) показал самую высокую точность на участке 4, в то время как метод морфологического водораздела (WA) показал самую низкую точность на участке 6. На участках сложной структуры самые высокие значения «полноты» и «точности» для четырех методов составили соответственно 86,0 и 89,7 %, и они были получены для участка 9 с использованием алгоритма LM и для участка 7 с использованием LS. Самые низкие значения «полноты» и «точности» составили 71,9 и 51,0 %, они были получены для участка 9 по алгоритмам соответственно WA и LM. *F-score* варьировала от 0,621 до 0,861, при этом наилучший результат был получен для участка 7, а наихудший – для участка 9 [Performance and sensitivity of individual tree segmentation methods for UAV-LiDAR in multiple forest types, 2022].

Таким образом, было установлено [Performance and sensitivity of individual tree segmentation methods for UAV-LiDAR in multiple forest types, 2022], что результаты сегментации по моделям высоты полога (CHM) и нормализованного облака точек (NPC) характеризовались сходными показателями «полноты» обнаружения (*recall*) без очевидных различий. В отношении показателя «точности» (*precision*) методы сегментации деревьев непосредственно по облаку точек работают лучше, по сравнению с моделями высоты полога (CHM), и различия между этими двумя подходами были очевидны в сложных широколиственных гетерогенных насаждениях, а также в насаждениях с высокой плотностью полога, что подтверждает ранее полученные результаты [Nonlinear mixed-effects height to crown base model based on both airborne LiDAR and field datasets for Picea crassifolia kom. trees in northwest China, 2020].

Хотя для повышения точности сегментации деревьев по данным лидарного сканирования было разработано множество методов, их эффективность зависит от различий в структуре насаждений. В большинстве предыдущих исследований сегментации больше внимания уделялось хвойным лесам [A new method for segmenting individual trees from the lidar point cloud, 2012; Individual tree crown delineation from airborne laser scanning for diseased larch forest stands, 2017; A new method for 3D individual tree extraction using multispectral airborne LiDAR point clouds, 2018], культурам [Assessment of individual tree detection and canopy cover estimation using unmanned aerial vehicle based light detection and ranging (UAV-LiDAR) data in planted forests, 2019] и редколесьям саванны [Isolating individual trees in a savanna woodland using small footprint lidar data, 2006], которые характеризовались четкими формами и очертаниями крон деревьев. Однако при сегментации крон в густых

естественных лиственных насаждениях вследствие смыкания и переплетения ветвей деревьев эффективность обнаружения деревьев не превышала 70 % [An individual tree crown delineation method based on multi-scale segmentation of imagery, 2012; A bottom-up approach to segment individual deciduous trees using leaf-off lidar point cloud data, 2014; An efficient, multi-layered crown delineation algorithm for mapping individual tree structure across multiple ecosystems, 2014; On the use of binary partition trees for the tree crown segmentation of tropical rainforest hyperspectral images, 2015].

Было сделано предположение [Isolating individual trees in a savanna woodland using small footprint lidar data, 2022], что данные, полученные с помощью БПЛА-лидара в безлистном и облиственном состояниях, предоставят больше информации, полезной для сегментирования и оценки высоты деревьев в лиственных насаждениях. В большинстве предыдущих исследований были разработаны и протестированы алгоритмы единовременного получения данных с БПЛА-лидара, но сообщалось и о результатах сопряженной обработки таких данных, полученных в безлистном и облиственном состояниях деревьев. Для получения корректной информации о морфоструктуре насаждений с помощью БПЛА-лидара необходимы знания об эффективных методах обработки облаков точек, полученных в безлистном и облиственном состояниях деревьев, а также о влиянии различий в структуре древостоев на точность сегментации [Individual tree segmentation and tree height estimation using leaf-off and leaf-on UAV-LiDAR data in dense deciduous forests, 2022].

В горных лесах умеренного пояса на северо-востоке Китая с помощью БПЛА-лидара были собраны данные о деревьях в безлистном и облиственном состояниях, и была создана их сопряженная база данных (FULD). Деревья таксировали в четырех насаждениях разной структуры и породного состава: широколистное (MBF), хвойно-широколиственное (MBCF), чистое из дуба монгольского (MOF) и культура лиственницы японской (LPF). Сканирование выполняли лидарным сенсором *RieglVUX-1LR* с частотой 110 и 280 имп/сек соответственно в безлистном и облиственном состояниях деревьев. С помощью набора данных о деревьях в безлистном (OLD), облиственном (LLD) состояниях и в сопряженном их варианте (FULD) (рис. 73) было проведено всестороннее сравнение алгоритмов для проверки их эффективности при оконтуривании крон и оценке высоты деревьев [Individual tree segmentation and tree height estimation using leaf-off and leaf-on UAV-LiDAR data in dense deciduous forests, 2022].

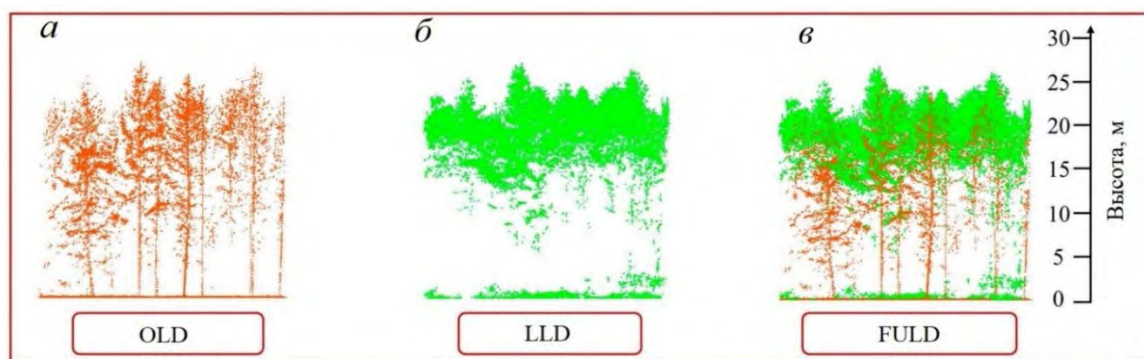


Рис. 73. Облака точек, полученные БПЛА-лидаром на деревьях: *а* – в безлистном состоянии; *б* – облиственном состоянии; *в* – в сопряжении двух состояний [Individual tree segmentation and tree height estimation using leaf-off and leaf-on UAV-LiDAR data in dense deciduous forests, 2022]

Последующий анализ и обработка облаков точек выполнены после предварительной обработки данных с помощью программного обеспечения *LiDAR 360* версии 3.2 [A cross-comparison of field, spectral, and lidar estimates of forest canopy cover, 2009]. Во-первых, шумовые точки в исходных данных были удалены с помощью метода пороговых расстояний. Во-вторых, данные были отфильтрованы по точкам рельефа и растительности с помощью прогрессивного триангулирования нерегулярной сети (TIN). Затем были сгенерированы цифровая модель рельефа (DEM) и цифровая модель поверхности (DSM) с пространственным разрешением 0,5 м [Effects of topographic variability and lidar sampling density on several DEM interpolation methods, 2010; Assessment of individual tree detection and canopy cover estimation using unmanned aerial vehicle based light detection and ranging (UAV-LiDAR) data in planted forests, 2019], а модель высоты полога получена по их разности. Наконец, с помощью модели DEM [Adaptive clustering of airborne LiDAR data to segment individual tree crowns in managed pine forests, 2010] были сгенерированы нормализованные данные облака точек [Individual tree segmentation and tree height estimation using leaf-off and leaf-on UAV-LiDAR data in dense deciduous forests, 2022].

По каждому из трех наборов данных и четырем разным насаждениям были применены три алгоритма сегментации: морфологического водораздела, нисходящая (*top-to-bottom*) сегментация профиля деревьев [A new method for segmenting individual trees from the lidar point cloud, 2012] и сегментация с наложением слоев (LSS). Последний алгоритм сочетает в себе алгоритм укладки слоев [Individual tree detection and crown delineation from unmanned aircraft system (UAS) LiDAR in structurally complex mixed species eucalypt forests, 2021] и нисходящую сегментацию профиля деревьев. Положение каждого дерева на участке получено путем определения локальных максимумов с помощью кластеризации *k*-средних каждого слоя. Затем

начальные точки, сгенерированные по локальным максимумам, были использованы для выделения дерева. Толщина слоя была установлена равной 1 м [Layer stacking: A novel algorithm for individual forest tree segmentation from LiDAR point clouds, 2017]. Регистрации подлежали деревья высотой более 10 м. Высота дерева была оценена на основе правильных результатов сегментации по нормализованным облакам точек. Был использован пакет «случайный лес» в статистическом программном обеспечении R 4.1.3 [Liaw, Wiener, 2002].

Эффективность трех алгоритмов сегментации оценивалась на уровне отдельных деревьев в соответствии с их замерами в полевых условиях. Это считалось правильным, когда сегментированное дерево находилось в пределах границы кроны дерева с привязкой к земле [Individual tree detection and classification with UAV-based photogrammetric point clouds and hyperspectral imaging, 2017; Assessment of individual tree detection and canopy cover estimation using unmanned aerial vehicle based light detection and ranging (UAV-LiDAR) data in planted forests, 2019]. Сегментации приводила к трем вариантам результатов, оцениваемых по трем показателям: «полнота» (*recall*), «точность» (*precision*) и *F-score*. Формулы и назначение названных трех показателей были приведены в п. 1.2.1 [A new method for segmenting individual trees from the lidar point cloud, 2012]).

На 15 лесных участках было зарегистрировано 884 дерева, и 763, 780 и 819 деревьев были сегментированы в безлистном (OLD), облиственном (LLD) состояниях и в сопряженном их варианте (FULD) соответственно. Из них были правильно обнаружены соответственно 573, 575 и 646 деревьев. Совмещенная сегментация (FULD), по сравнению с сегментацией деревьев в облиственном состоянии, показала большее количество правильных результатов на 16–18 % в широколиственном, хвойно-широколиственном и дубовом насаждениях и на 4 % в культуре лиственницы [Individual tree segmentation and tree height estimation using leaf-off and leaf-on UAV-LiDAR data in dense deciduous forests, 2022].

Все три алгоритма сегментации показали одинаковую эффективность применительно к деревьям как в облиственном, так и в безлистном состояниях. *F-score* результата сегментации деревьев в лиственничнике (0,84) оказалась выше, чем в широколиственном (0,66), хвойно-широколиственном (0,66) и дубовом (0,64) насаждениях при сегментации как в облиственном, так и в безлистном состояниях деревьев. Совмещенная сегментация улучшила *F-score*, по сравнению с облиственным или безлистным состояниями в широколиственном, хвойно-широколиственном, дубовом и лиственничном насаждениях соответственно на 0,10; 0,08; 0,08 и 0,03 [Individual tree segmentation and tree height estimation using leaf-off and leaf-on UAV-LiDAR data in dense deciduous forests, 2022].

Результаты сравнения высот лиственных деревьев, измеренных в поле и с помощью БПЛА-лидара, показали, что сегментация лазерных данных высоты деревьев объяснила изменчивость высот, измеренных в полевых условиях, в облиственном, безлистном состояниях и в сопряженном их варианте соответственно на 77, 83 и 87 % (рис. 74).

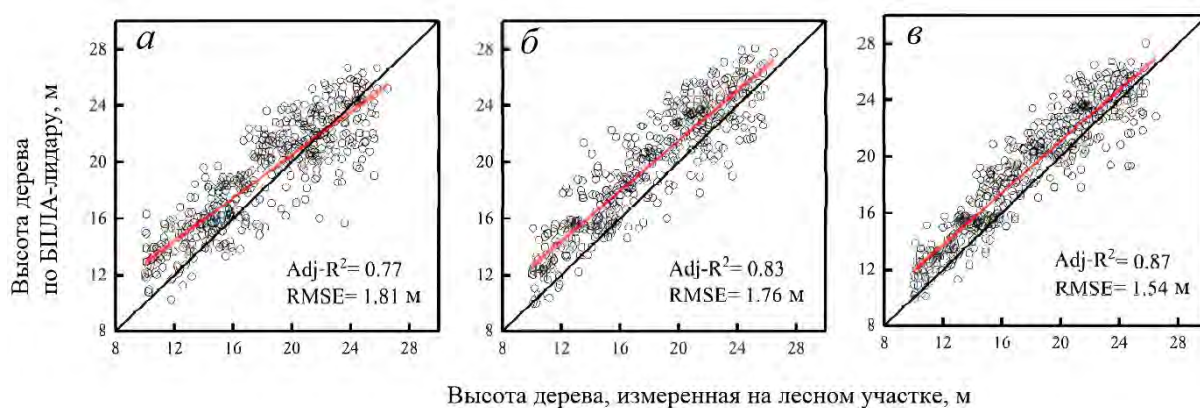


Рис. 74. Сравнение высот деревьев (более 10 м), измеренных в полевых условиях и оцененных с помощью БПЛА-лидара: *а* – в облиственном состоянии; *б* – в безлистном состоянии; *в* – в сопряженном их варианте. Красные и черные сплошные линии представляют собой соответственно регрессии и соотношения 1:1 [Individual tree segmentation and tree height estimation using leaf-off and leaf-on UAV-LiDAR data in dense deciduous forests, 2022]

Таким образом, сегментация крон в сопряжении облиственного и безлистного состояний деревьев показала преимущество метода по отношению к сегментации деревьев или в безлистном, или в облиственном состояниях. Результативность метода морфологического водораздела в однотипных по структуре насаждениях в последние годы непрерывно прогрессировала и составила последовательно: 62 % [Koch, Heyder, Weinacker, 2006], 69 % [Automated delineation of individual tree crowns from lidar data by multi-scale analysis and segmentation, 2012], 70 % [On the use of binary partition trees for the tree crown segmentation of tropical rainforest hyperspectral images, 2015] и 80 % в настоящем исследовании [Individual tree segmentation and tree height estimation using leaf-off and leaf-on UAV-LiDAR data in dense deciduous forests, 2022], что, по-видимому, связано с со значительным сокращением затрат при использовании БПЛА-лидара и последними достижениями в области обработки данных лидарного сканирования [On the use of unmanned aerial systems for environmental monitoring, 2018].

Эффективность сегментации зависела от структуры насаждения и размера дерева. Основным источником ошибок являлись необнаруживаемые небольшие деревья, хотя возможность их обнаружения улучшена с помощью совмещения безлистного и облиственного состояний зондирования.

Увеличение плотности точек сканирования в безлистном состоянии способствовало лучшему обнаружению небольших деревьев. Совмещенная сегментация, поддерживаемая алгоритмом наложения слоев (LSS), по-видимому, хорошо подходит для оценки высоты деревьев в густых лиственных насаждениях, а также для исследований в области лесной экологии, где требуется высокая точность [Individual tree segmentation and tree height estimation using leaf-off and leaf-on UAV-LiDAR data in dense deciduous forests, 2022].

Вышеизложенные методы сегментации были основаны на анализе облаков точек, фиксирующих отражения лазерных импульсов от поверхности полога и от земли, структура профиля полога не исследовалась. Поскольку реальные насаждения часто представлены сложными многоярусными структурами, для их анализа применяются полноволновые лидары.

2.4. Сегментация вертикального профиля деревьев полноволновыми лидарами

Когда фотоны когерентного светового излучения от лидара попадают на лесной полог, часть света отражается от его структурных элементов и возвращается к датчику. В зависимости от структуры объектов, часть света продолжает идти к земле. Это явление приводит к многократным отражениям, и волновая форма создается распределением энергии, которая возвращается к датчику и регистрируется. Распределение пиков энергии создается в областях, где имеются максимумы световой энергии, возвращаемой к датчику. В зависимости от того, как регистрируются отраженные сигналы, различают дискретные и полнодиапазонные датчики. Последние дают возможность извлечения информации, присущей формам сигнала, путем разделения сигнала на отдельные отражения. Такая декомпозиция формы сигнала позволяет получить координаты, энергию импульса и длительность импульса для каждого отражения [Reitberger, Krzystek, Stilla, 2008a; 3D segmentation of single trees exploiting full waveform LIDAR data, 2009; 3-D mapping of a multi-layered Mediterranean forest using ALS data, 2009].

Технология коммерческого лазерного сканирования была выведена на новый уровень благодаря быстродействующим электронным устройствам, которые позволяют регистрировать весь эхо-сигнал лазерного импульса как функцию времени. С 2004 г. появились новые так называемые лидары полной волны (*full-waveform lidar*), или полноволновые лидарные системы малого размера, такие как *Riegl LMS-Q560* от *TopoSys* или *ALTM 3100* от *Optech*, которые дают возможность записи полной формы сигнала. Принципиальное различие функционирования традиционного лидара первого/последнего импульса (с дискретным возвратом) и лидара полной

формы волны показано на рис. 75. При определении высоты полого с использованием лидарных данных существуют две общие проблемы. Определение точной высоты поверхности земли создает трудности как для лидара с дискретным возвратом, так и для полноволнового лидара. При сложной структуре полого высота, получаемая от возврата от уровня земли, на самом деле может исходить от сильно развитого густого нижнего яруса [Lidar remote sensing for ecosystem studies, 2002].

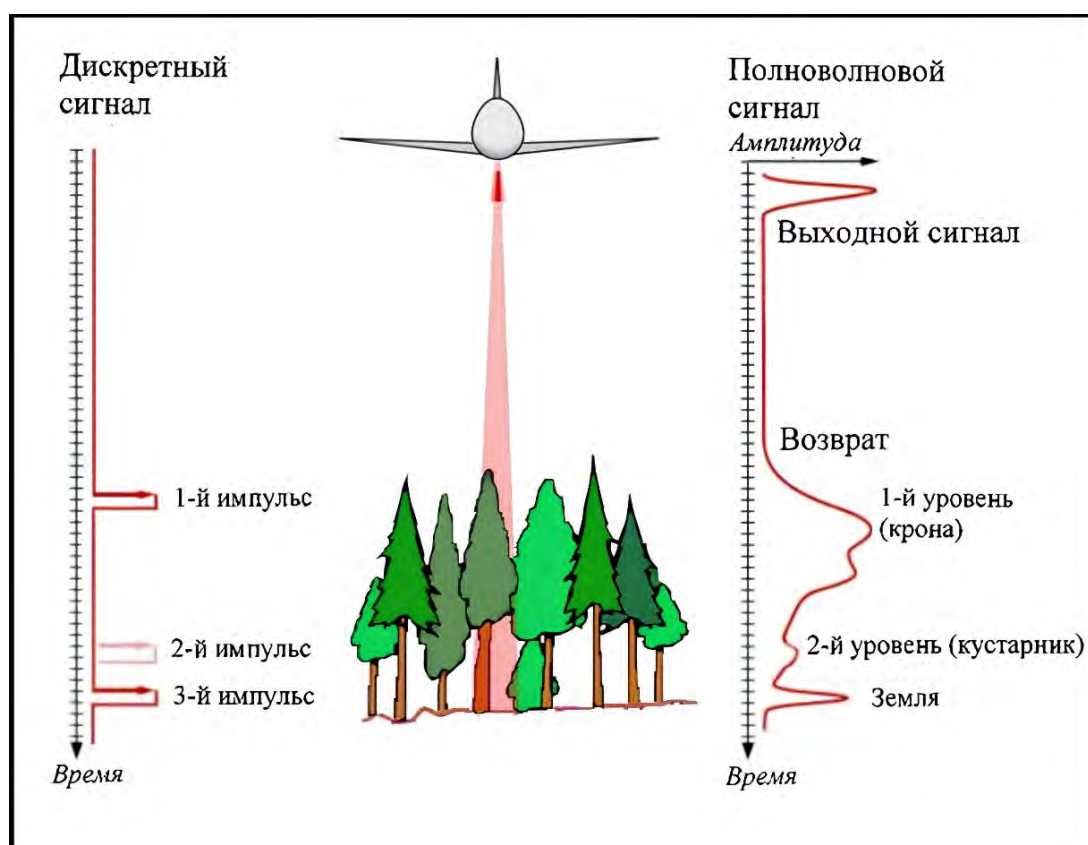


Рис. 75. Принципиальные различия функционирования дискретных (слева) и полноволновых (справа) лидарных систем [The role of lidar systems in fuel mapping, 2009]

Структура нижнего яруса и его высота в насаждении могут существенно различаться в зависимости от условий окружающей среды и видового состава [Impact of introduced herbivores on understory vegetation along a regional moisture gradient in Patagonian beech forests, 2016; Extreme warming challenges sentinel status of kelp forests as indicators of climate change, 2016]. Вершина нижнего яруса часто находится близко к центру кроны основного яруса, что может вызвать трудности при определении высоты основания кроны [Popescu, Zhao, 2008]. Таким образом, чтобы исключить влияние нижнего яруса на оценку высоты основания кроны, необходимо удаление подлеска и устранение «шума», но в предыдущих исследованиях этим часто пренебрегали.

В связи с этим в смешанном хвойном насаждении в Сьерра-Неваде, Калифорния, был применен нисходящий (*top-to-bottom*) метод сегментации профиля деревьев с автоматическим удалением подлеска и «шума» путем вычленения верхней части подлеска под отдельными деревьями [Simple method for direct crown base height estimation of individual conifer trees using airborne LiDAR data, 2018]. Метод включает в себя две основные стратегии: 1) устранение шума и растительности подлеска для каждого дерева; 2) формирование модели высоты полога путем создания процентильного профиля ранжирования для каждого дерева и использования сплайновой кривой для определения точек перегиба. Эти две стратегии дают методу преимущества, заключающиеся в том, что он не требует полевых измерений и эффективен в смешанных лесах. Перед применением названного алгоритма было проведено три этапа предварительной обработки исходного лидарного облака точек, которые включали удаление «выбросов», нормализацию и удаление наземных точек. Точки, расположенные ниже 1 м, в соответствии с полевой съемкой считались кустарниками и были исключены при оценке высоты основания кроны. Все расчеты выполнены с помощью программного обеспечения *LiDAR360* [Simple method for direct crown base height estimation of individual conifer trees using airborne LiDAR data, 2018].

Благодаря наблюдениям и исследованию лидарных облаков точек и полевым измерениям было обнаружено, что плотность лидарных точек всегда была ниже и даже близка к нулю в вертикальном промежутке между подлеском и основанием кроны. Таким образом, точное определение вертикального разрыва, в котором плотность облака точек резко снижается, является ключом к определению верхушек растений подлеска. Чтобы охарактеризовать вертикальные изменения плотности точек, для каждого отдельного дерева была сгенерирована гистограмма вертикального распределения лидарных точек с интервалом 0,1 м, из которой сгенерирована плавная кривая. Интервал в 0,1 м был выбран здесь потому, что он достаточно мал для формирования плавной кривой, которая сохраняла детальные изменения плотности точек. Точки перегиба сглаженной кривой, которые представляли собой точки со знаком изменения кривизны [Modeling of the bacterial growth curve, 1990], были затем идентифицированы как потенциальные точки вершины растений подлеска. В качестве примера приведены подробные шаги по определению вершин растений подлеска для устранения шума [Simple method for direct crown base height estimation of individual conifer trees using airborne LiDAR data, 2018].

Чтобы правильно определить точки перегиба, сначала был применен алгоритм сплайн-подгонки кривой для сглаживания гистограммы (синяя кривая на рис. 76). Затем взята вторая производная (красная кривая, совмещенная с черной кривой, на рис. 76), соответствующая сглаженной кривой, и получено несколько точек перегиба, где значения второй производной были равны нулю (точки *a*, *b*, ..., *z* на рис. 76). Эти точки перегиба могут

быть локальными максимумами, минимумами или стационарными метками в облаке точек. Задача заключалась в том, как из возможных точек выбрать правильную точку перегиба, обозначающую вершину растений подлеска, и она была выполнена с помощью следующих процедур.

1. Вначале были выделены поддиапазоны кривой второй производной, которые имеют положительные знаки (здесь и далее они обозначены как участки выше нуля), показанные красными кривыми на рис. 76. Эти участки кривых, расположенные выше нуля, указывают на то, что плотность облаков точек была ниже, чем на соседних участках, расположенных ниже нуля (например, плотность точек в $a-b$ ниже, чем в $b-c$, на рис. 76).

2. Рассчитана плотность точек для каждой области с высотой выше нуля и выбрана область с наименьшей плотностью точек (на рис. 76 $m-n$ имеет наименьшую плотность, равную 0,5).

3. Сопоставлены высоты m и n и в качестве вершины растений подлеска выбрана точка перегиба с меньшей высотой. Если высота m меньше высоты n , то m помечена как вершина подлеска, после чего перед оценкой высоты основания кроны были удалены лидарные точки, которые находились ниже выбранной точки перегиба m и соответствовали растениям подлеска и прочему «шуму» [Simple method for direct crown base height estimation of individual conifer trees using airborne LiDAR data, 2018].

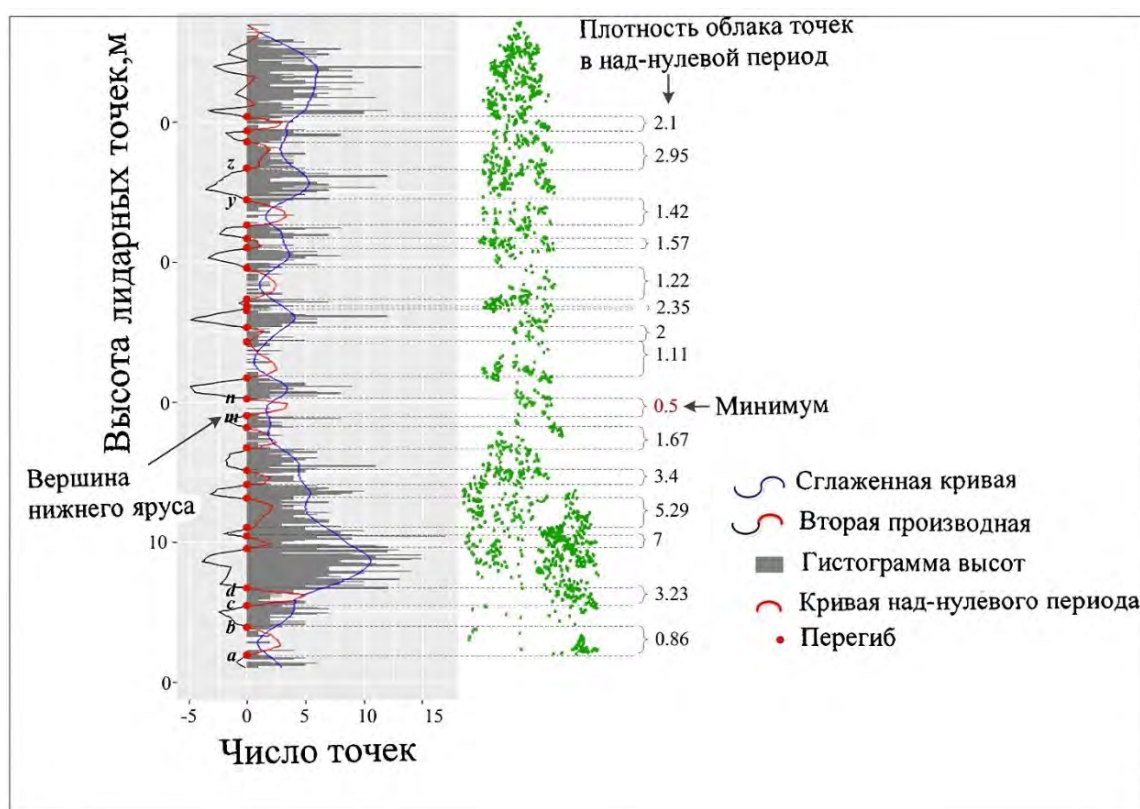


Рис. 76. Пример отдельного дерева, показывающий процесс определения местоположения вершины растений подлеска с последующим его удалением [Simple method for direct crown base height estimation of individual conifer trees using airborne LiDAR data, 2018]

Для оценки высоты основания кроны был применен метод процентильного ранжирования, согласно которому сначала был сгенерирован профиль процентильного ранжирования для каждого дерева, используя точки без подлеска. Этот профиль был подобран с использованием алгоритма сплайна (черная кривая на рис. 77). Затем были взяты первая производная (синяя кривая на рис. 77) и вторая производная кривой (красная кривая на рис. 77), и на рис. 77 показаны значения второй производной, равной нулю ($a, b, c, \dots, j$). После чего выбрана точка перегиба (f на рис. 5), в которой значение первой производной является максимальным, а для оценки высоты основания кроны значение процентильного ранжирования должно быть меньше 0,5. На рис. 77 показан пример оценки высоты основания кроны на основе профиля процентильного ранжирования. Для расчета высоты основания кроны у всех сегментированных деревьев та же процедура была применена ко всему лидарному облаку точек [Simple method for direct crown base height estimation of individual conifer trees using airborne LiDAR data, 2018].

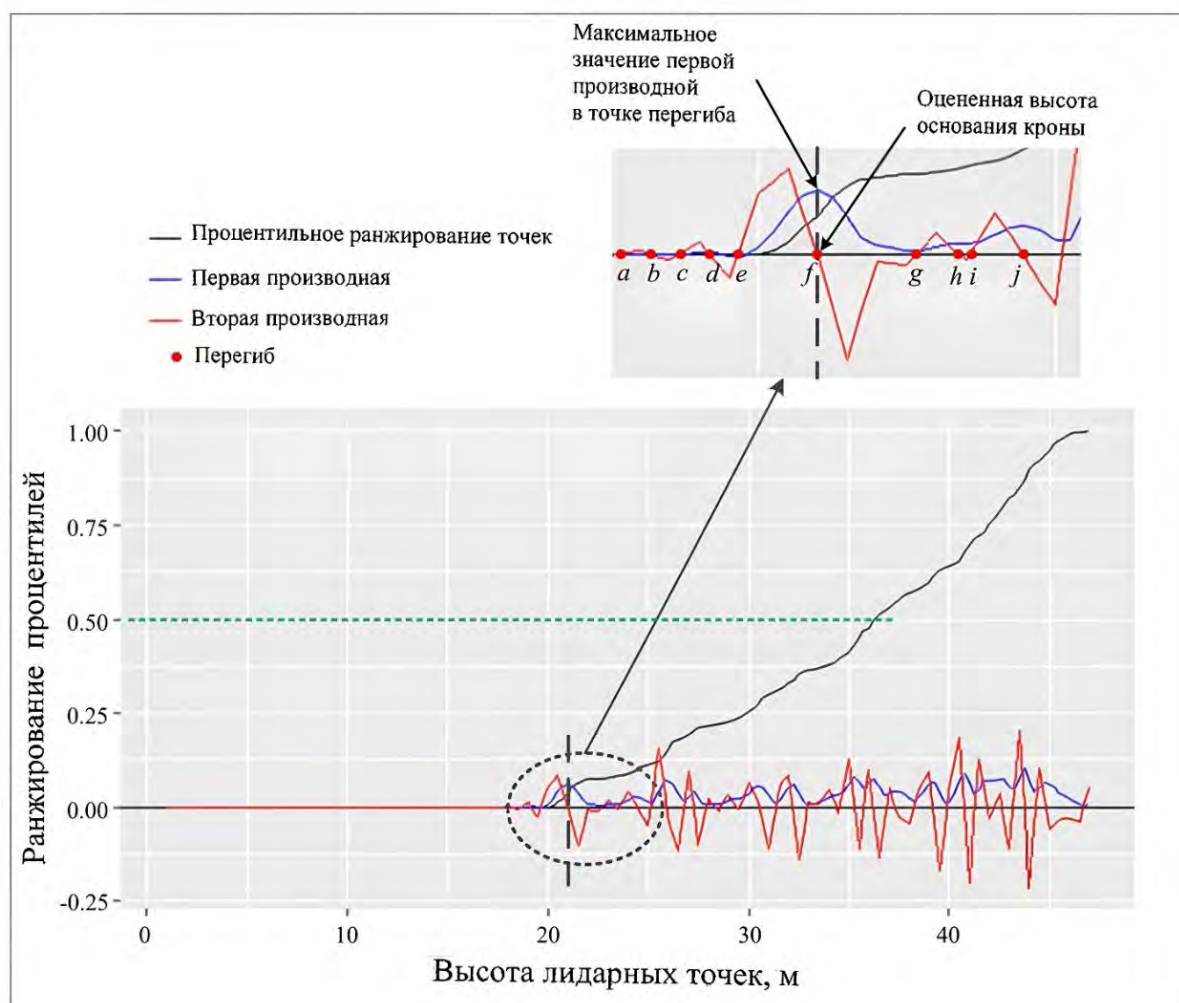


Рис. 77. Пример оценки высоты основания кроны на основе процентильного ранжирования лидарных точек на уровне отдельного дерева [Simple method for direct crown base height estimation of individual conifer trees using airborne LiDAR data, 2018]

Таким образом, первая производная показывает, увеличивается или уменьшается рейтинг в процентилях и насколько он увеличивается или уменьшается. Вторая производная показывает, увеличивается или уменьшается первая производная. Если вторая производная положительна, то первая производная будет увеличиваться (подогнанная сплайновая кривая будет вогнутой). И наоборот, если вторая производная отрицательна, то первая производная будет уменьшаться (подогнанная сплайновая кривая будет выпуклой). Если вторая производная равна нулю, то в этой точке наблюдается перегиб. Перегиб возникает при резком изменении процентильного ранжирования. Высоте основания кроны соответствует перегиб, при котором значение первой производной является максимальным, а значение процентильного ранжирования должно быть меньше 0,5. Сообщается, что высота второго квантиля является хорошей переменной для оценки лесной биомассы [Estimation of tropical forest structural characteristics using large-footprint lidar, 2002]. Таким образом, согласно проведенному расчету, высота основания кроны должна быть ниже высоты второго квантиля⁷ [Simple method for direct crown base height estimation of individual conifer trees using airborne LiDAR data, 2018].

Сравнение оценок высоты основания кроны, полученных с помощью лидара, и результатов полевых измерений показало, что значения коэффициента детерминации, стандартной ошибки и смещения составили соответственно 0,88; 1,62 и 3,4 %. Это означает, что лидарная оценка высоты основания кроны хорошо согласуется с результатами полевых измерений, хотя и с небольшим завышением (рис. 78).

Приведенные результаты показывают, что предложенный в этом исследовании метод позволяет более точно оценить высоту основания кроны на уровне деревьев в смешанных насаждениях, по сравнению с предыдущими исследованиями. Для всех хвойных и лиственных деревьев стандартная ошибка составила около 1,6 м. В аналогичном исследовании хвойных и лиственных деревьев была ошибка около 2 м [Popescu, Zhao, 2008] и для сосны обыкновенной в диапазоне от 1,44 до 3,56 м [Vauhkonen, 2010]. Соответственно, коэффициенты детерминации в данном исследовании ($R^2 = 0,88$) были немного выше, чем в вышеупомянутых более ранних результатах (R^2 соответственно равен 0,75 и 0,80).

⁷ *Квантиль* в математической статистике – значение, которое заданная случайная величина не превышает с фиксированной вероятностью; если вероятность задана в процентах, то квантиль называется *процентилем*.

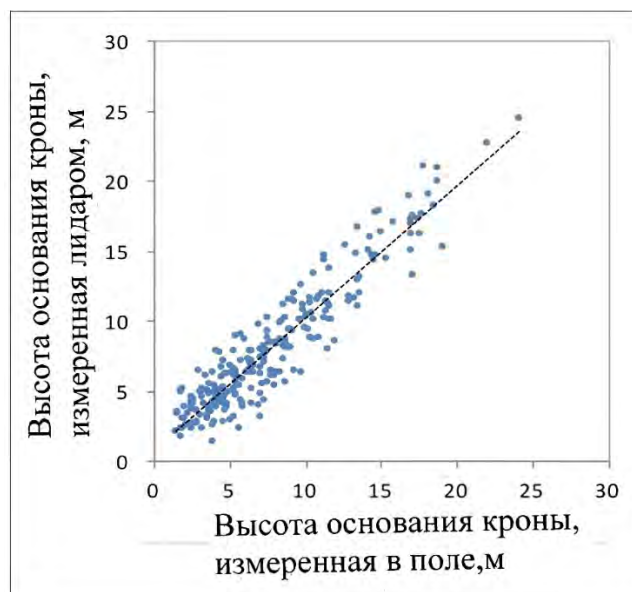


Рис. 78. Соотношение значений высоты основания кроны, полученных в результате полевых измерений и по методу, основанному на использовании лидара [Simple method for direct crown base height estimation of individual conifer trees using airborne LiDAR data, 2018]

Как уже отмечалось, для определения таких важных параметров, как высота дерева, размер кроны, высота основания кроны и видовая принадлежность деревьев, использовались методы вычленения отдельных деревьев из облака лидарных данных, представленных регистрацией первого и последнего импульсов. Большинство методов обнаружения деревьев были сосредоточены на использовании модели высоты крон, которая определенным образом интерполировалась из самых высоких лазерных точек. Поскольку процесс интерполяции значительно сглаживает поверхность, соседние деревья бывает невозможно разделить, и вместо отдельных деревьев выделяются их группы (кластеры). При этом небольшие деревья, подрост и подлесок под пологом доминирующих деревьев полностью упускаются из виду [HIGH-SCAN: The first European-wide attempt to derive single tree information from laser scanner data, 2001; Solberg, Naesset, Bollandsas, 2006; Brandtberg, 2007]. Методы классификации древесных видов, использующие исключительно лидарные данные, в основном основаны на применении облака лазерных точек и – очень редко – интенсивности. Было показано, что при использовании данных лидара с высокой плотностью первого и последнего импульсов хвойные породы ель обыкновенная и сосна обыкновенная могут быть распознаны с точностью до 95 % [Holmgren, Persson, 2004], а в другом случае распознавание ели обыкновенной и европейского бука было выполнено с точностью до 97 % [Heurich, 2006]. Однако, несмотря на высокую плотность (10 точек/м²), подрост обнаружить не удавалось [3D segmentation of single trees exploiting full waveform LIDAR data, 2009].

В связи с этим был предложен новый метод применения полноволнового лидара, превосходящий традиционный метод первого/последнего импульса при сегментации и распознавании видов деревьев [3D segmentation of single trees exploiting full waveform LIDAR data, 2009]. Цель данной работы состояла в том, чтобы: 1) изложить новый алгоритм сегментации, основанный на нормализованном срезе (*normalized cut*), который выделяет деревья много лучше, по сравнению с сегментацией по морфологическому водоразделу; 2) продемонстрировать улучшение частоты обнаружения отдельных деревьев; 3) доказать преимущество данных полной формы волны как в облиственном, так и в безлистном состоянии; 4) представить результаты классификации лиственных и хвойных деревьев.

В процессе декомпозиции формы сигнала одиночный сигнал, измеренный в интересующей области, модифицируется путем подгонки серии гауссовых импульсов к сигналу, который содержит N отражений (рис. 79). Каждое отражение i -й формы сигнала представлено соответствующим вектором в трехмерных координатах (X_i, Y_i, Z_i) , где W_i – длительность импульса, а I_i – энергия импульса отражения. Калибровка значений W_i и I_i является обязательной и достигается за счет использования длительности импульса и интенсивности излучаемого гауссовского импульса. Кроме того, интенсивность I_i корректируется в зависимости от длины пробега лазерного луча и номинального расстояния [Reitberger, Krzystek, Stilla, 2008a; Gaussian decomposition and calibration of a novel small-footprint full-waveform digitising airborne laser scanner, 2006].

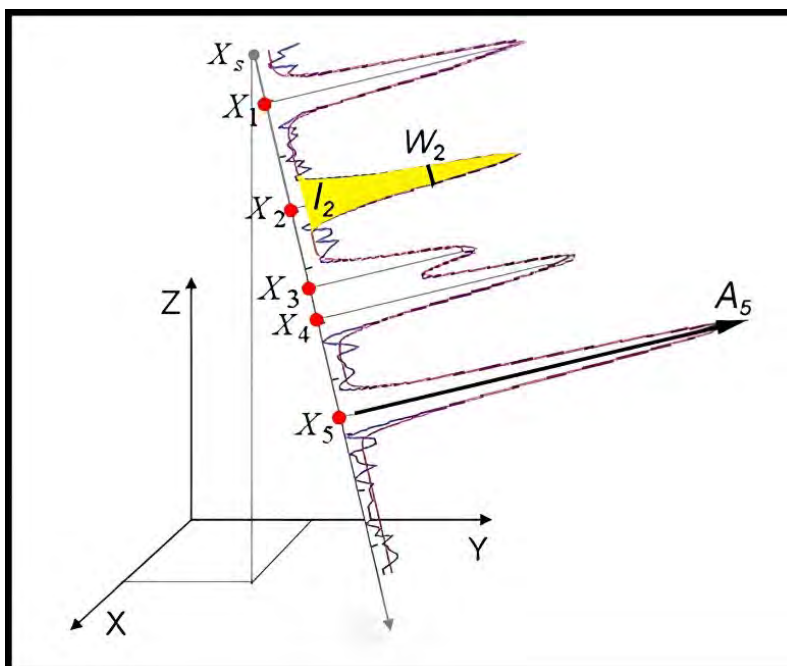


Рис. 79. Трехмерные точки и признаки, полученные из одной формы сигнала [3D segmentation of single trees exploiting full waveform LIDAR data, 2009]

Ключевая идея новой технологии трехмерной сегментации заключается в применении сегментации на нормализованных срезах [Shi, Malik, 2000] в воксельном пространстве. Как уже упоминалось, методы сегментации, основанные на модели высоты крон, не позволяют разделять рядом растущие соседние деревья и выделяют не отдельные деревья, а их группу. Более того, деревья меньшего размера на среднем и более низком уровнях вертикального профиля не могут быть распознаны, поскольку в модели высоты крон они невидимы (рис. 80, *а*).

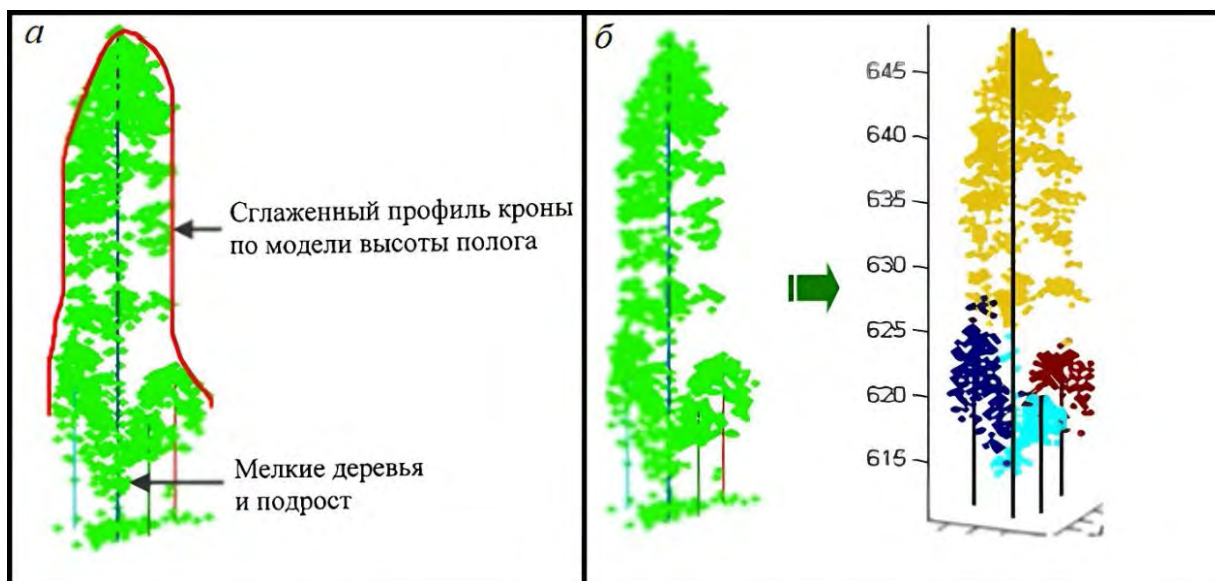


Рис. 80. Сегментация деревьев:

а – обычная на основе модели высоты крон; *б* – трехмерная
[3D segmentation of single trees exploiting full waveform LIDAR data, 2009]

Предложенная трехмерная сегментация начинается с воксельного представления лесного участка с использованием положений (X_i , Y_i , Z_i) отражений, а также длительности импульса W_i и интенсивности I_i декомпозиции формы сигнала (рис. 80, *б*) [3D segmentation of full waveform LIDAR data for single tree detection using normalized cut, 2008b]. Согласно нормализованной сегментации, применяемой в воксельной структуризации полога, два разрозненных сегмента *A* и *B* идентифицируются путем максимизации сходства элементов сегмента и минимизации сходства между сегментами (рис. 81) с помощью решения функции стоимости [3D segmentation of full waveform LIDAR data for single tree detection using normalized cut, 2008b].

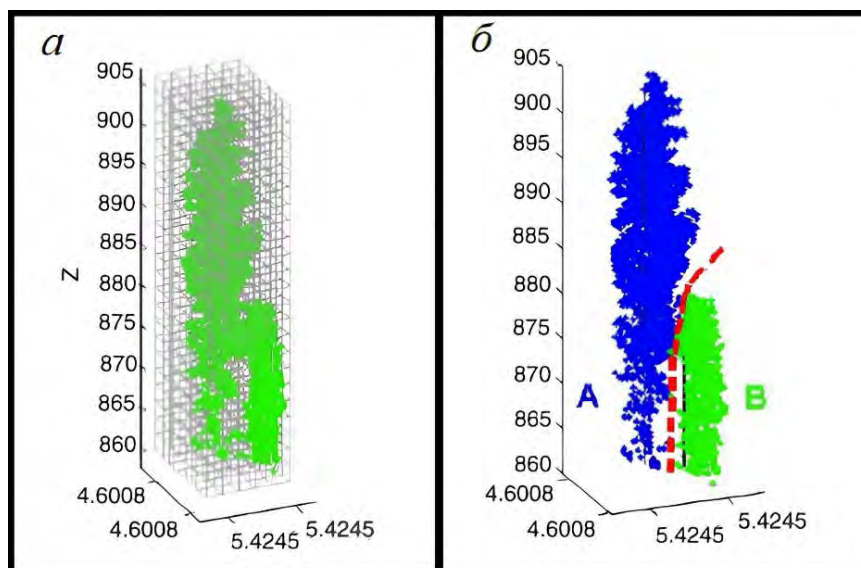


Рис. 81. Идентификация сегментов: *а* – преобразование изображения в воксельной структуре; *б* – разделение вокселей на два дерева-сегмента [3D segmentation of single trees exploiting full waveform LIDAR data, 2009]

На двух тестовых участках было подобрано 18 пробных площадей размером от 1 000 до 3 600 м². Были измерены с помощью GPS, тахеометрии и системы *Vertex III* диаметр ствола на высоте груди, общая высота дерева, положение ствола и породная принадлежность деревьев. Всего обмерено 1 664 дерева двух хвойных и четырех лиственных пород. Для хвойных и лиственных пород деревьев выполнена как неконтролируемая, так и контролируемая идентификация. Для неконтролируемой идентификации оказался подходящим алгоритм максимизации математического ожидания [Classification, parameter estimation and state estimation – An engineering approach using MATLAB, 2004], а контролируемая была выполнена по алгоритму максимального правдоподобия с использованием соответствующего количества эталонных деревьев в качестве обучающего подмножества [Reitberger, Krzystek, Stilla, 2008c]. Неконтролируемая идентификация лиственных и хвойных деревьев составляет в 93 %, а контролируемая 95 %, что существенно выше результата использования данных о первом/последнем импульсе – всего 80 % [3D segmentation of single trees exploiting full waveform LIDAR data, 2009].

В итоге сделан вывод, что применение сегментации на нормализованных срезах в воксельном пространстве в случае объединения с лидарными данными полной волны повышает эффективность обнаружения отдельных деревьев в нижнем ярусе насаждения более чем на 20 % [3D segmentation of single trees exploiting full waveform LIDAR data, 2009].

В горных условиях на севере Италии с характерными еловыми, буковыми и смешанными насаждениями были получены наборы данных лазерного сканирования морфоструктуры полого с помощью лидара *Optech*

ALTM 3100, обеспечивающего возможность регистрации нескольких ярусов растительности. Работа была сосредоточена на разработке информативных методологий и алгоритмов для автоматической оценки параметров, характеризующих трехмерную структуру отдельных деревьев. Эксперименты проводились с использованием оригинального программного обеспечения, разработанного в среде *Open Source*, которое позволяет управлять облаками лазерных точек. На основе этого программного обеспечения был реализован специальный инструментарий для лесных массивов, с его помощью можно извлекать информацию о положении, количестве и высоте отдельных деревьев и о их форме и площади кроны [Assessing the 3D structure of the single crowns in mixed alpine forests, 2007].

Несмотря на постоянное совершенствование методов сегментации деревьев по лидарным данным, обработка данных и разработка инновационных алгоритмов фильтрации, классификации и моделирования данных лазерного сканирования все еще находятся в стадии развития [Algorithms and methods of airborne laser scanning for forest measurements, 2004]. Что касается изучения трехмерной формы кроны, то высота дерева является одним из наиболее сложно оцениваемых параметров. Из-за этой трудности некоторые авторы выводят этот геометрический атрибут из данных лидара, используя эмпирические модели линейной корреляции [Adaptive methods for individual tree detection on airborne laser based canopy height model, 2004]. Однако подобный подход применим только в локальных условиях и не может быть обобщен, поскольку форма кроны варьирует в зависимости от многих факторов: типологии насаждений, густоты насаждения, породы деревьев, типа почв и т. д. Более того, определение параметров кроны в полевых условиях является непростой процедурой с точки зрения затрат операционного времени, а результаты не являются корректными. Исходя из этих соображений, в данном параграфе представлена реализация автоадаптивных методов для оценки трехмерных параметров кроны. Особое внимание было уделено проверке качества результатов на различных участках исследований в высокогорных районах [Assessing the 3D structure of the single crowns in mixed alpine forests, 2007].

Предложена последовательность полной обработки, начиная с исходных лазерных точек в качестве входных данных и заканчивая производными параметрами каждого дерева. Процедура состоит из ряда уточнений и преобразований, которые могут быть схематично связаны со следующими методологическими аспектами [Assessing the 3D structure of the single crowns in mixed alpine forests, 2007]:

- предварительная обработка исходных лазерных данных;
- применение математических алгоритмов морфологии в соответствии с методом выделения вершин кроны отдельных деревьев;
- идентификация лазерных точек, принадлежащих отдельным кронам, с помощью алгоритма кластерного анализа;

- субкластеризация растительности нижнего яруса с использованием метода локальной фильтрации.

Предложенный метод выделения дерева основан на морфологическом анализе распределения лазерных точек. С этой целью был реализован алгоритм *TopHat*, описанный в теории обработки изображений [Serra, 1982]. Независимо от типологии изображения, эта математическая функция позволяет извлекать самые высокие элементы в шкале представленных значений [Andersen, Reutebuch, Schreuder, 2001]. Расширяя концепцию алгоритма непосредственно на предварительно отфильтрованное облако точек, этот метод позволяет определять набор точек, принадлежащих верхней части кроны, избегая интерполяции на растровых изображениях. Можно получить пространственное положение (координаты x , y , z) вершин на основе лазерных данных. Предполагается, что координаты x , y таких вершин соответствуют картографическому положению отдельных деревьев. В некоторых случаях из-за небольшой разницы высот между ближайшими точками, принадлежащими к одной и той же кроне, для каждого дерева может быть отмечено более одной вершины. Чтобы уменьшить вероятность такого рода ошибок, был внедрен алгоритм проверки, который идентифицирует и исправляет ошибочно классифицированные вершины (часто локализованные по краям кроны). Алгоритм сравнивает значение высоты каждой выделенной вершины с ближайшими лазерными точками, используя подходящий (определяемый пользователем) радиус поиска. Если в окне поиска обнаружена точка с большим значением высоты, она становится вершиной нового дерева.

Чтобы идентифицировать отдельные кроны, был реализован алгоритм «растущей зоны». Начиная с предварительно выделенных вершин деревьев, алгоритм классифицирует точки крон в соответствии со следующими критериями [Assessing the 3D structure of the single crowns in mixed alpine forests, 2007]:

- если точки, расположенные в непосредственной близости от исходной вершины, находятся ниже установленного порогового значения, они помечаются как принадлежащие к одному кластеру;
- когда одна и та же лазерная точка помечается как относящаяся к разным вершинам (что особенно актуально в густых насаждениях), алгоритм привязывает точку к ближайшей вершине;
- для каждой отмеченной вершины повторяется одна и та же процедура.

Облако лазерных точек всего полога елового насаждения было разделено на кластеры (обособленные скопления деревьев, визуально находящиеся как бы под одной кроной), и в пологе выделены красным цветом и визуализированы три кластера различной формы и разного ближайшего окружения (рис. 82). Там же отображены частотные распределения кластеризованных точек по высоте (синяя линия) и показаны результаты реализа-

ции специального инструмента анализа для автоматического расчета частотных распределений и относительных интерполированных кривых (красная линия).

Согласно рис. 82, интерполированные кривые сильно отличаются в каждом из трех вариантов. Регрессионная кривая на рис. 82, *а* показывает, что выделенное дерево хорошо кластеризовано. Напротив, кривые на рис. 82, *б, в* показывают наличие аномалий, т. е. более высокой плотности точек в нижней части профиля частот. Такие аномалии, очевидно, вызваны наличием нижнего яруса (подлеска). В таком случае интерполирующая кривая описывается с помощью аналитической функции, и используется разница высот между минимальной и максимальной точками интерполирующей кривой для нахождения и определения автоматического порога для повторной фильтрации кластеров. Результаты повторной фильтрации кластера показаны на рис. 83.

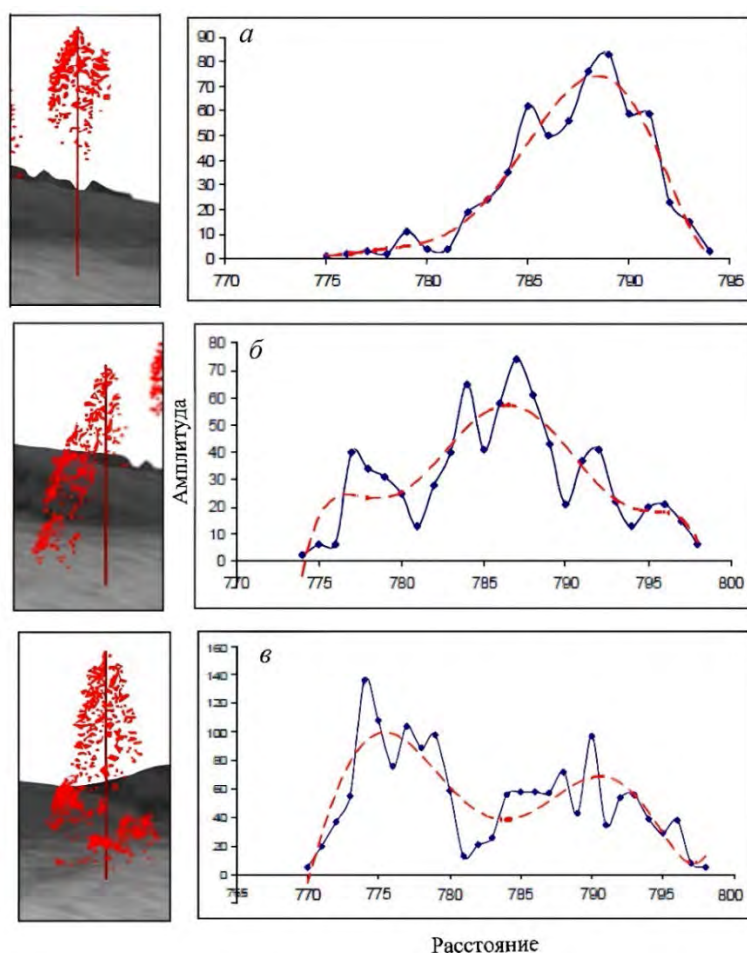


Рис. 82. Примеры сгруппированных в кластеры деревьев: *а* – дерево в густом насаждении; *б* – два дерева, совмещенные в одном кластере; *в* – дерево с нижним ярусом под его кроной. Синей линией показано распределение частот по высоте, красной линией обозначено полиномиальное распределение частотной диаграммы, используемое для повторной фильтрации подкластеров

[Assessing the 3D structure of the single crowns in mixed alpine forests, 2007]

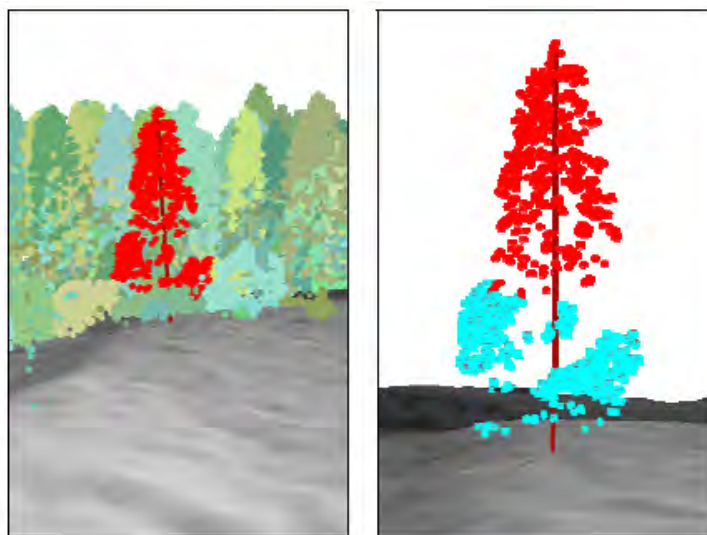


Рис. 83. Пример результата повторной фильтрации кластеров с целью выделения нижнего яруса (обозначен голубыми точками) под доминирующими деревьями [Assessing the 3D structure of the single crowns in mixed alpine forests, 2007]

Таким образом, предложен инновационный метод обработки данных лазерного сканирования для автоматического определения параметров кроны. Для определения положения вершин деревьев использован алгоритм *TopHat*, реализованный в среде *Open Source*. Затем с использованием оригинального алгоритма кластеризации были выделены и очерчены отдельные кроны деревьев. Результаты полевых исследований, своевременно интегрированные в среду ГИС для создания базы лесных данных, предоставили подробную информацию о трехмерной структуре деревьев. Реализованный метод определения границ кроны (в частности оценка высоты основания кроны) показал лучшие результаты в случае хвойных деревьев, чем широколиственных. В последнем случае процент проникновения лазерного сигнала сквозь полог невелик из-за очень плотной фитонасыщенности полога. Предложенный новый метод кластерного анализа оказался полезным для фильтрации и выделения нижнего яруса под пологом насаждения. Результаты были подтверждены с использованием данных топографического тахеометра, собранных на 13 лесных пробных участках с общим количеством около 550 эталонных (*reference*) деревьев. Показана высокая корреляция между полевыми данными и результатами, полученными при лазерном сканировании, особенно в хвойных насаждениях [Assessing the 3D structure of the single crowns in mixed alpine forests, 2007].

Как уже отмечалось, методы, основанные на регистрации отдельных деревьев, основывались на модели высоты крон (CHM), которая являлась упрощенным представлением реальности в вертикально сомкнутом пологе [Algorithms and methods of airborne laser scanning for forest measurements, 2004; LIDAR-based geometric reconstruction of boreal type forest stands at sin-

gle tree level for forest and wildland fire management, 2004; Tree species classification of individual trees in Sweden by combining high resolution laser data with high resolution near-infrared digital images, 2004; Popescu, Wynne, 2004; Solberg, Naeset, Bollandsas, 2006]. Для исследования пространственной структуры доминирующих деревьев были разработаны многоэтапные подходы. В частности, сначала выделяли группы деревьев в модели высоты крон, а затем регистрировали деревья, сопоставляя статистическую зависимость с соответствующим распределением облаков точек [Richardson, Moskal, 2011]. Или выявляли самые высокие деревья в каждой группе, определяли положение ствола и применяли метод сегментации с помощью нормализации среза для выделения более мелких деревьев [3D segmentation of single trees exploiting full waveform LIDAR data, 2009]. Несмотря на хорошие результаты, эти подходы зависели от местоположения, поскольку требуют нескольких эмпирических параметров. Более того, они должным образом не решали проблему вертикальной стратификации в многоярусных насаждениях, поскольку, даже если они очерчивали кроны доминантных деревьев, многие точки, соответствующие наземной растительности или подлеску, оставались незамеченными [3-D mapping of a multi-layered Mediterranean forest using ALS data, 2012].

Таким образом, фактически отсутствует подход, который одновременно сегментирует вертикальные и горизонтальные структуры лесного полога. В связи с этим была предложена работа [3-D mapping of a multi-layered Mediterranean forest using ALS data, 2012], в которой обосновывается метод сегментации, основанный на алгоритме среднего сдвига (*mean shift algorithm*). Этот метод был протестирован на трехмерном облаке точек, полученном с помощью малогабаритного лидарного устройства в многоярусном насаждении в Португалии. Тестовый участок представлен эвкалиптом (*Eucalyptus globulus Labill.*) и сосной приморской (*Pinus pinaster Ait.*) в разном соотношении с нижними ярусами, представленными несколькими древесными и кустарниковыми видами. Вертикальная структура древостоя была подразделена на семь классов по высоте деревьев (0–0,6 м, 0,6–1 м, 1–2 м, 2–4 м, 4–8 м, 8–16 м и > 16 м). Каждому дереву был присвоен класс высоты и социальный статус (доминантное, согосподствующее, подчиненное и подавленное). Учтены деревья высотой более 2 м с диаметром ствола более 5 см. Лидарные данные были получены системой *LiteMapper 5600*. Оцифрованные сигналы были преобразованы в эхо-сигналы, при этом каждый лазерный импульс генерировал от 1 до 5 эхо-сигналов. Систематические ошибки в определении высоты устранялись с помощью данных наземного контроля. Средняя плотность пульсации составила 9,5 точек на 1 м². Были построены цифровая модель поверхности земли и нормализованное облако точек полога [3-D mapping of a multi-layered Mediterranean forest using ALS data, 2012].

В данном исследовании была применена методология алгоритма сдвига среднего значения. Сдвиг среднего значения – это непараметрическая техника анализа пространства признаков для определения местоположения максимума плотности вероятности, так называемый алгоритм поиска моды. Облако лидарных точек здесь рассматривается как мультимодальное распределение, где каждая мода, определяемая в качестве локального максимума как по плотности, так и по высоте, соответствует вершине кроны. В данной работе исследуется способность алгоритма сдвига среднего значения (MS) извлекать моды облака точек, что обычно осуществляется с помощью такого понятия, как полоса пропускания ядра (*kernel bandwidth*). Единичная полоса пропускания ядра (параметр сглаживания) в методе ядерной оценки плотности – это значение, при котором функция ядра (функция сглаживания) равна единице. Это означает, что для всех значений аргумента, для которых определяется оценка плотности, значение функции ядра равно 1. Выбор значения полосы пропускания влияет на сглаженность получившейся кривой плотности. Например, при малой полосе пропускания кривая будет грубой и зубчатой, а при большой – чрезмерно сглаженной, скрывающей структуру данных. Оптимальное значение полосы пропускания для конкретного набора данных определяется с помощью эмпирических правил или критериев. Например, для экспоненциального ядра и ядра Гаусса часто используется эмпирическое правило Сильвермана, которое рассчитывается на основе стандартного отклонения и интерквартильного диапазона последовательности.

Из-за сложности лесных насаждений, в которых сочетаются кустарники, угнетенные и доминирующие деревья, единичная полоса пропускания ядра непригодна. Алгоритм сдвига среднего значения в основном применялся для сегментации изображений [Comaniciu, Meer, 2002]. Здесь исследован его потенциал для сегментации трехмерного облака точек. Чтобы улучшить сегментацию отдельных объектов растительности, был предложен восходящий итерационный метод, основанный на адаптивном алгоритме сдвига среднего значения, с помощью которого последовательно сегментируются отдельные сегменты полого [3-D mapping of a multi-layered Mediterranean forest using ALS data, 2012].

Для проверки эффективности алгоритма сдвига среднего значения были смоделированы двумерные и трехмерные кроны «синтетических» деревьев. На рис. 84, а, б показано, что точки сходятся в направлении мод. Эту процедуру можно легко расширить до метода сегментации на основе расстояния, если сгруппировать все точки данных, сходящиеся к одной и той же моде (рис. 84, в). Все моды, вписанные в сферу радиусом 1 м, рассматриваются как единичная мода.

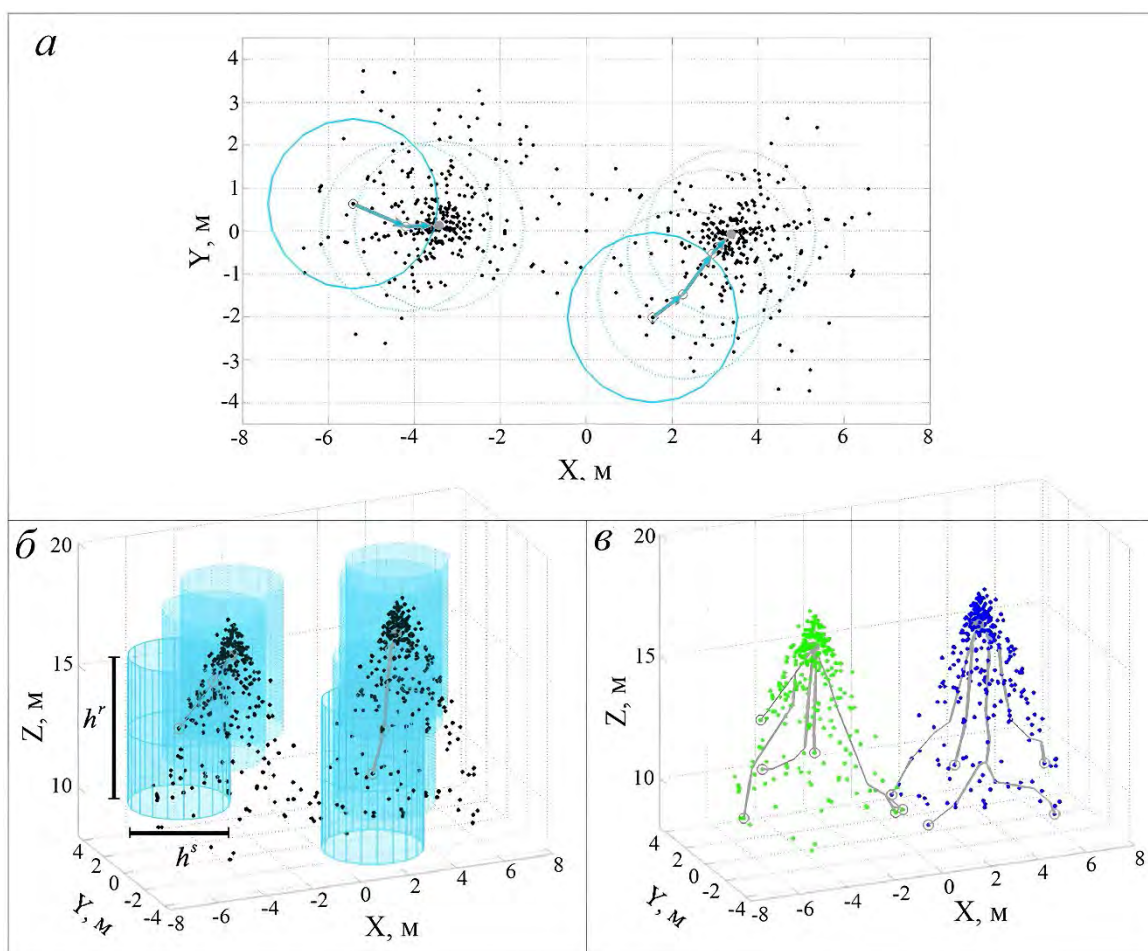


Рис. 84. Сегментация по алгоритму сдвига среднего значения, примененная к моделям крон деревьев: *а* – двумерной; *б* – трехмерной. Исходные полосы пропускания ядра с различными вертикальными (h^r) и горизонтальными (h^s) составляющими представлены цилиндрами. Средние векторы сдвига показаны стрелками, которые определяют последовательные положения полосы пропускания ядра (пунктирные цилиндры). Все точки данных, которые сходились к одной и той же моде (заполненные серые «шарики», *spheres*), сгруппированы вместе. Серые линии на рис. 84, *в* соответствуют траектории случайных точек [3-D mapping of a multi-layered Mediterranean forest using ALS data, 2012]

Определение оптимального значения полосы пропускания ядра имеет решающее значение, поскольку это сильно влияет на результаты. Установка небольшого значения создает несколько различных мод (локальные зоны притяжения), в то время как установка большого значения объединяет небольшие структуры в более крупные (большие зоны притяжения). Толщина лесных ярусов обычно увеличивается с высотой, т. е. кустарниковая растительность, как правило, имеет меньшую толщину, по сравнению с основным ярусом. К моделируемому объекту были применены три сегментации с использованием различных полос пропускания (рис. 85). Меньшая полоса пропускания, оптимальная для почвенного покрова, приводит к фрагментации деревьев на множество сегментов (рис. 85, *а*). Увеличение полосы

пропускания улучшает сегментацию подлеска, не влияя на более высокие деревья (рис. 85, б). Наконец, оптимальная пропускная способность для верхнего яруса приводит к заниженной сегментации объекта в целом (рис. 85, в). Что еще хуже, густой напочвенный покров, как правило, включает в себя разреженный подлесок, что приводит к завышению толщины этого самого нижнего яруса [3-D mapping of a multi-layered Mediterranean forest using ALS data, 2012].

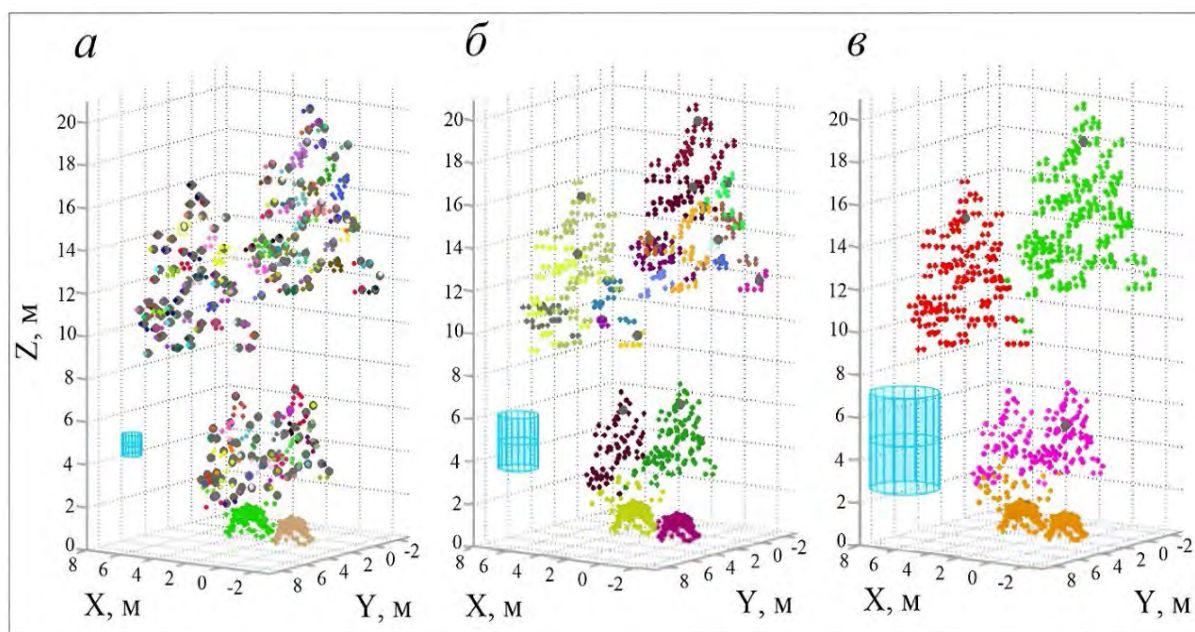


Рис. 85. Сегментация моделируемого лесного объекта по алгоритму сдвига среднего значения с использованием полосы пропускания ядра $[h^* = (h^s \text{ и } h^r)]$, равной:
 а – 1,3 и 2 м; б – 3 и 5 м; в – 6 и 9 м. Цилиндры соответствуют различным ядрам, а серые «шарики»-сферы представляют рассчитанные моды [3-D mapping of a multi-layered Mediterranean forest using ALS data, 2012]

Таким образом, использование единого масштаба по всему исследуемому пространству не подходит для анализа структуры лесного полога. Проблема выбора полосы пропускания была изучена с целью многомасштабной сегментации с использованием мультиспектральных или гиперспектральных изображений [Bo et al., 2009; Comaniciu, 2003; Huang, Zhang, 2008]. Было доказано, что алгоритм сдвига среднего значения с переменной пропускной способностью приближается по точности к алгоритму с фиксированной пропускной способностью и даже превосходит ее [Comaniciu, Meer, 2002]. Чтобы правильно сегментировать отдельные объекты растительности, каждому ярусу растительности назначается своя полоса пропускания. Чем толще ярус насаждения, тем больше полоса пропускания. Первый этап алгоритма состоит в построении гистограмм высот в насаждении,

чтобы идентифицировать верхний ярус, нижний ярус и напочвенный покров. Первый этап алгоритма сдвига среднего значения применялся к исходному облаку лидарных точек для вычисления их зон притяжения [3-D mapping of a multi-layered Mediterranean forest using ALS data, 2012].

Алгоритм извлечения деревьев включает в себя две или три итерации. Сначала вычисляется набор векторов сдвига среднего значения с использованием лидарных точек, которые рассматриваются как исходные (*seeds*) значения. Векторы выполняют поиск локального направления с наибольшей плотностью с соответствующей полосой пропускания. Последнее выбирается путем вычисления пятого процентиля высоты текущего облака точек (w). На первой итерации ширина полосы устанавливается равной h_{gv} (рис. 86, *a*), поскольку величина w стремится к нулю. Траектория связывает каждую лидарную точку с некоторой модой. Растительный ярус, имеющий моду ниже ht_{us} , рассматривается как напочвенный покров (рис. 86, *в*, зеленые эллипсоиды). В конце первой итерации соответствующие лидарные точки удаляются из облака точек. Вычисление w на второй итерации определяет полосу пропускания и, следовательно, количество итераций (две или три). Таким образом, полоса пропускания равна h_{us} , если $w < ht_{os}$, и равна ht_{os} , если $w > ht_{os}$ [3-D mapping of a multi-layered Mediterranean forest using ALS data, 2012].

На второй итерации вычленяется подлесок, который соответствует растительному слою с модами в диапазоне от ht_{us} до ht_{os} (рис. 86, *д*, красные эллипсоиды). Третья итерация идентифицирует верхний ярус с модами, превышающими ht_{os} (рис. 86, *е*, синие эллипсоиды). Применение порогового значения к пространству мод позволяет определить нечеткие границы между ярусами. Это физически более значимо, по сравнению с простой вертикальной стратификацией, основанной на пороговых значениях высоты. После каждой итерации удаление уже назначенных точек улучшает сегментацию за счет уменьшения влияния более плотных ярусов. Таким образом, когда две области с разной плотностью расположены близко друг к другу, точки, принадлежащие к более разреженным областям, скорее всего, будут объединены с точками, принадлежащими к более плотным областям. Этот эффект очевиден на рис. 85, *б*, где лесные ярусы либо завышены, либо занижены [3-D mapping of a multi-layered Mediterranean forest using ALS data, 2012].

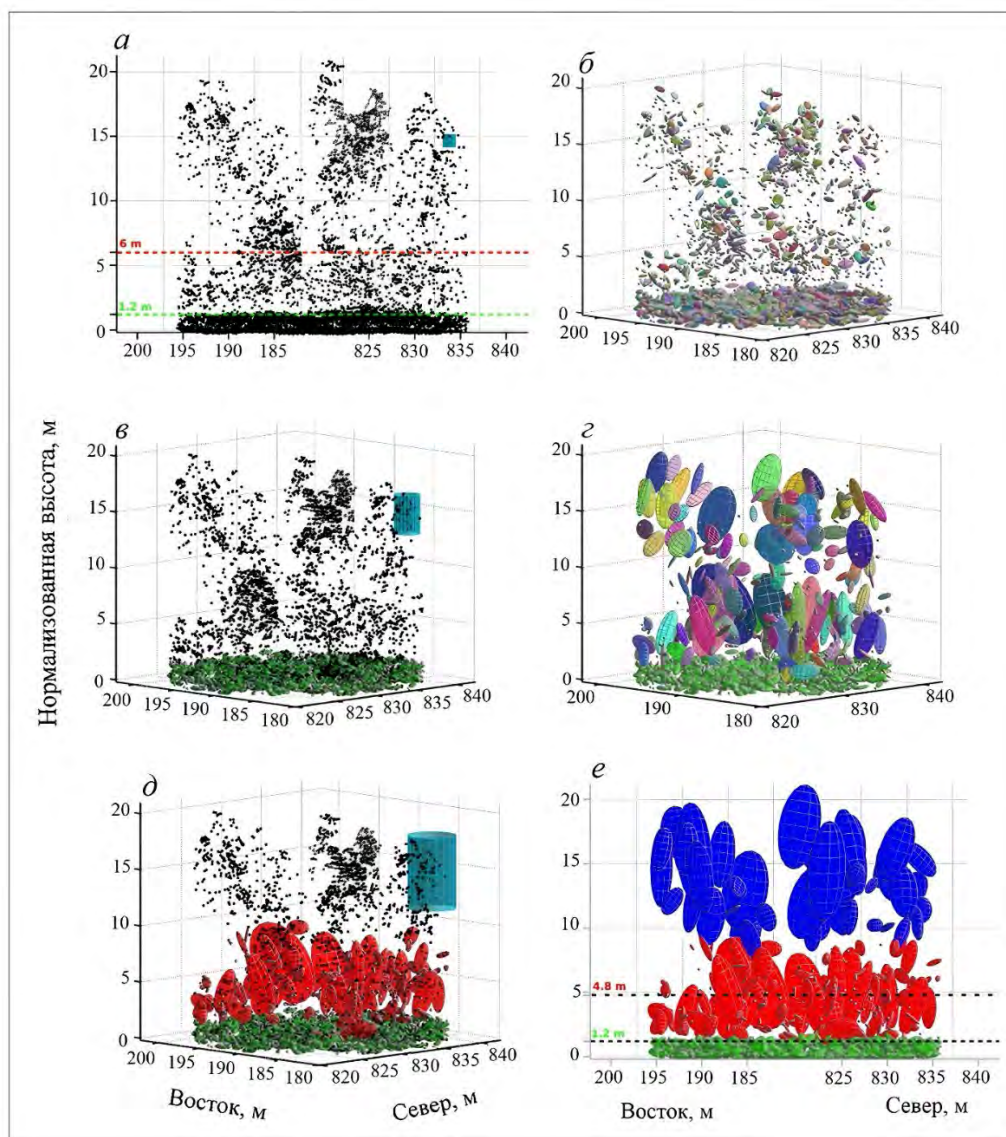


Рис. 86. Сегментация пробной площади № 30 с ht_{us} , равной 1 м, и ht_{os} , равной 8 м. Черные точки соответствуют лидарным точкам, которые остаются немаркированными после итерации и являются входными данными для следующей итерации. Первая итерация: а, б – $w = 0$ м и $h_{gv} = (1 \text{ и } 1)$. Вторая итерация: в, г – $w = 2$ м и $h_{gv} = (2,3 \text{ и } 3,5)$. Третья итерация: д, е – $w = 9,5$ м и $h_{os} = (4,3 \text{ и } 6,5)$. (Пунктирные линии на а и е относятся к замерам средней высоты напочвенного покрова (зеленый цвет) и подлеска (красный цвет), проведенным в полевых условиях и полученным с помощью лидара соответственно [3-D mapping of a multi-layered Mediterranean forest using ALS data, 2012])

На рис. 87 показана связь высот деревьев всех социальных статусов насаждения, полученных с помощью лидара, и высот, измеренных в полевых условиях. На рис. 87, а, в данные относятся к высоте деревьев, а на рис. 87, б, г – к высоте крепления кроны (или расстоянию до первой живой ветви). Линейная связь лидарных и полевых замеров высот деревьев характеризуется коэффициентами детерминации 0,94 для сосны и 0,96 для эвкалипта, а стандартные ошибки составили соответственно 1,07 и 0,86 м.

Аналогичная связь замеров высоты крепления кроны характеризуется коэффициентами детерминации соответственно 0,79 и 0,69 со стандартными ошибками 2,25 и 2,48 м. При этом лазерная оценка высоты крепления кроны завышает фактическую у сосны и эвкалипта соответственно на 0,66 и 1,29 м, а лазерная оценка общей высоты дерева занижает фактическую соответственно на 0,28 и 0,23 м. Эти результаты сопоставимы с результатами других исследований, которые показывают, что лидарные данные, как правило, занижают высоту деревьев [Gaveau, Hill, 2003; Review of methods of small-footprint airborne laser scanning for extracting forest inventory data in boreal forests, 2008].

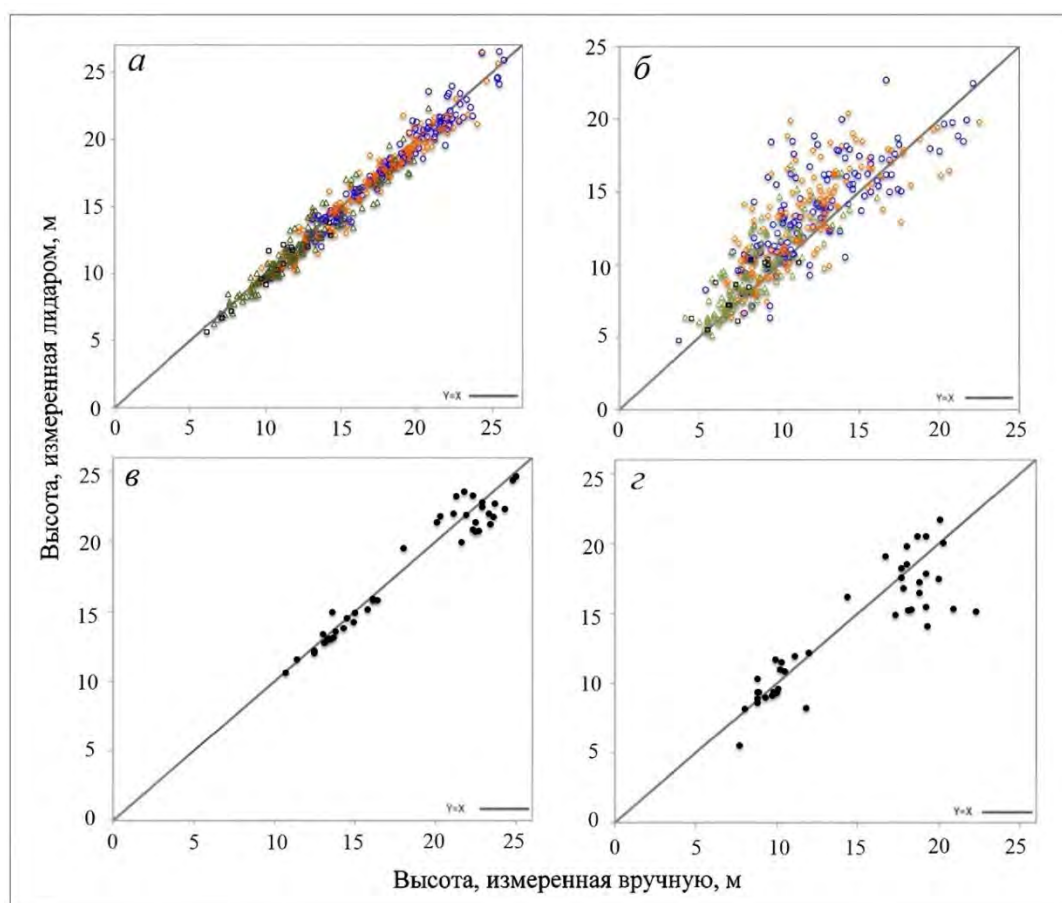


Рис. 87. Связь высот деревьев всех социальных статусов насаждения, полученных с помощью лидара, и высот, измеренных в полевых условиях. На а и в данные относятся к высоте деревьев, а на б и г – к высоте крепления кроны [3-D mapping of a multi-layered Mediterranean forest using ALS data, 2012]

Таким образом, предложен метод формирования корректных трехмерных сегментов, соответствующих индивидуальным особенностям основных лесных ярусов: напочвенного покрова, подлеска и верхнего яруса. Метод не связан с моделью высоты крон, а напрямую применяется к трехмерному облаку точек, что важно при характеристике многоярусных насаждений. Сегментация происходит в пространстве мод, где с большей вероятностью

вычленяются характерные особенности растительных ярусов. Предложенный подход позволяет на месте рассчитать конкретные статистические данные для каждого растительного яруса и четко отличать напочвенный покров от вышерасположенных ярусов растений.

Показано, что алгоритм сдвига среднего значения является надежным методом определения мод в мультимодальном распределении облаков точек в многоярусном насаждении. Вследствие сложной структуры лесного полога применен многомасштабный подход, при котором моды вычисляются с использованием адаптивной полосы пропускания ядра, оптимизированной для каждого слоя. Однако метод применим пока лишь к лесному пологу максимум с тремя ярусами. Для работы с сильно стратифицированной структурой полога необходимы более сложные методы [3-D mapping of a multi-layered Mediterranean forest using ALS data, 2012].

Наряду с вышерассмотренными методами и алгоритмами, некоторые методы направлены на обнаружение деревьев по модели высоты крон и на сегментацию в лидарном облаке точек, где кроны выделяются с помощью алгоритма кластеризации с использованием k -среднего значения [LIDAR-based geometric reconstruction of boreal type forest stands at single tree level for forest and wildland fire management, 2004; Gupta, Weinacker, Koch, 2010; Adaptive clustering of airborne LiDAR data to segment individual tree crowns in managed pine forests, 2010]. Кластеры инициализировали, используя как набор случайно выбранных исходных значений, так и набор локальных максимумов, выделенных в модели высоты крон [Gupta, Weinacker, Koch, 2010]. Кроме того, оценивалась возможность снижения значения высоты вместо использования исходного (*reference*) дерева, чтобы свести к минимуму внутригрупповую дисперсию и обеспечить соответствие кроны конической форме. При этом наивысшие значения точности получали при инициализации алгоритма с использованием обнаруженных верхушек деревьев и при изменении масштаба оценки высоты. Действительно, евклидова метрика, используемая для управления алгоритмом кластеризации, имела тенденцию генерировать шарообразные кластеры лидарных точек [LIDAR-based geometric reconstruction of boreal type forest stands at single tree level for forest and wildland fire management, 2004]. Однако основным недостатком алгоритмов обнаружения, применяемых к домену изображения, являлось то, что они не способны выделить растительность нижнего яруса [Estimation of timber volume and stem density based on scanning laser altimetry and expected tree size distribution functions, 2004], корректная регистрация которого представляет собой важную задачу при моделировании лесных пожаров [Modeling airborne laser scanning data for the spatial generation of critical forest parameters in fire behavior modeling, 2003], а также в целях управления лесами и планирования [Paris, Valduga, Bruzzone, 2016].

Для решения данной проблемы предложены методы, согласно которым выполняли сегментацию доминирующих деревьев по модели высоты крон

и затем анализировали лидарное облако точек для обнаружения нижнего яруса. В частности, был представлен уже упоминаемый метод трехмерной сегментации данных лидара с полной формой волны, или полноволнового лидара, отличавшийся приемлемой точностью, особенно в сложных естественных насаждениях. При этом, во-первых, для определения доминирующих крон деревьев использован алгоритм сегментации по морфологическим водоразделам и, во-вторых, сегментированные области уточнялись путем вычленения стволов деревьев. Наконец, небольшие деревья обнаруживали с использованием метода нормализованной сегментации срезов (*cut segmentation*) [Shi, Malik, 2000]. Несмотря на то, что метод позволял добиваться высокой эффективности обнаружения небольших деревьев, среди них выявлялось много ложных. Кроме того, возможности регистрации нижнего яруса сильно зависели от некоторых параметров. С той же проблемой столкнулись ранее, когда алгоритм эллипсоидальной кластеризации по k -среднему значению применялся непосредственно к лидарному облаку точек после обнаружения доминирующих деревьев в модели высоты крон [Delineation of tree crowns and tree species classification from full-waveform airborne laser scanning data using 3-D ellipsoidal clustering, 2014]. Для регистрации субдоминантных⁸ (*subdominant*) деревьев центры скоплений (кластеров) располагались на одинаковом расстоянии по горизонтали, а высота устанавливалась равной половине средней высоты доминирующих (*dominant*) деревьев. Результат сегментации окончательно уточнялся путем подгонки поверхности эллипсоида. Однако многие выделенные кроны подчиненных деревьев не соответствовали ни одному дереву, измеренному в полевых условиях.

В качестве одной из альтернатив ранее было выполнено оконтуривание субдоминантных деревьев без настройки каких-либо параметров или пороговых значений. Частотное распределение высот (*height frequency distribution*) деревьев интерполировалось с помощью полиномиальной функции, и по ее конфигурации определяли наличие растительности нижнего яруса [Assessing the 3D structure of the single crowns in mixed alpine forests, 2007]. Аналогичный подход был реализован путем анализа функции вероятности распределения точек лидара по высоте для разделения данных полог на два слоя [Wang, Weinacker, Koch, 2008]. Однако этот подход был основан на предположении, что структура насаждения характеризуется двумя ярусами, которые можно разделить плоскостью. Идентификация различных ярусов насаждения также решалась путем статистического анализа облака точек лидара [Identifying and quantifying structural characteristics of heterogeneous boreal forest using laser scanner data, 2005; Richardson, Moskal, 2011; 3-D mapping of a multi-layered Mediterranean forest using ALS data,

⁸ В дальнейшем изложении под субдоминантными деревьями понимаются все растения, расположенные под пологом доминирующих деревьев.

2012; Using a multistructural object-based lidar approach to estimate vascular plant richness in Mediterranean forests with complex structure, 2015].

Из сказанного следует, что точное определение и разграничение доминирующих и субдоминантных деревьев представляет собой критическую проблему, особенно в густых насаждениях [Comparative testing of single-tree detection algorithms under different types of forest, 2011; Jakubowski, Guo, Kelly, 2013]. Большинство методов требовало предварительных знаний о структуре насаждения и сомнительных предположений о постоянстве среднего размера кроны и густоты насаждений. Для решения этой проблемы были разработаны методы адаптационного размера кроны [Adaptive methods for individual tree detection on airborne laser based canopy height model, 2004; Koch, Heyder, Weinacker, 2006; Multi-scale segmentation of forest areas and tree detection in lidar images by the attentive vision method, 2013; Swetnam, Falk, 2014]. Однако многие из них использовали только область (домен) изображения, на которую влияла интерполяция лидарных данных. Напротив, методы, которые обнаруживали деревья в трехмерном облаке точек, сталкивались с проблемами выбора правильного масштаба [Alexander, 2009] и с неравномерной регистрацией размера крон с помощью лазерных импульсов [A new method for segmenting individual trees from the lidar point cloud, 2012]. Несколько гибридных подходов объединяли домены изображений и облака точек [Gupta, Weinacker, Koch, 2010; Adaptive clustering of airborne LiDAR data to segment individual tree crowns in managed pine forests, 2010; An efficient, multi-layered crown delineation algorithm for mapping individual tree structure across multiple ecosystems, 2014]. Однако ни один из них не использовал преимуществ совместного использования двух названных доменов для лучшего обнаружения деревьев [Paris, Valduga, Bruzzone, 2016].

В связи с этим предложен иерархический подход к трехмерной сегментации для обнаружения и разграничения крон как доминирующих, так и субдоминантных деревьев с использованием лидарных данных с высокой плотностью импульсов [Paris, Valduga, Bruzzone, 2016]. В отличие от методов, представленных ранее, предложенный подход не требует какой-либо предварительной информации о размере крон и густоте древостоя и основан на геометрической структуре насаждения и свойствах лидарных данных. Он может быть успешно применен на больших лесных массивах, характеризующихся неоднородными трехмерными структурами полога. Предложенный метод:

- 1) использует как изображение, так и области облака точек для определения доминирующих деревьев;
- 2) определяет кроны доминирующих деревьев непосредственно по пространству облака точек с помощью деривационного анализа горизонтальной структуры насаждения;

3) идентифицирует субдоминантные деревья путем анализа вертикального 3D-профиля доминирующих деревьев в разных угловых секторах;

4) обеспечивает вычленение растительности нижнего яруса [Paris, Valduga, Bruzzone, 2016].

Эффективность предложенного метода продемонстрирована в экспериментах, проведенных в условиях сложного густого насаждения, расположенного в Южных Альпах (Италия), с использованием лидарных данных высокой (до 50 импульсов на 1 м^2) и низкой плотности сигналов (до 8 импульсов на 1 м^2) [Paris, Valduga, Bruzzone, 2016]. Метод направлен на точное извлечение всех деревьев, зарегистрированных лидаром. Чтобы упростить процесс сегментации и тем самым облегчить обнаружение деревьев, использован иерархический подход, который последовательно применяется к ярусам доминирующих и субдоминантных деревьев. Нормализованное лидарное облако точек (PCS) получают после вычитания цифровой модели земли [Paris, Valduga, Bruzzone, 2016].

На первом этапе определяются доминирующие деревья, присутствующие в сцене насаждения, с использованием как растровой модели высоты крон, так и нормализованного облака точек с целью извлечь пользу от взаимной дополняемости двух доменов. В то время как в растровой модели можно обнаружить большую часть деревьев (но не все), анализ облака точек позволяет идентифицировать пропущенные деревья. Сначала выполняется грубый анализ в домене изображения с применением метода установки уровня (*level set method*) [Capturing tree crown formation through implicit surface reconstruction using airborne lidar data, 2009]. Затем анализ уточняется на облаке точек для обнаружения близко расположенных верхушек деревьев, которые могут не отображаться в растровой модели, но видны в облаке точек. Схема углового анализа лазерного изображения показана на рис. 88. Его горизонтальная 2D-проекция разделена на восемь угловых секторов, и в каждом анализируется вертикальный 3D-профиль доминирующих деревьев с целью их идентификации [Paris, Valduga, Bruzzone, 2016].

Необходимо отметить, что шаг квантирования ξ должен быть настроен с учетом характеристик лидарных данных (т. е. размера следа и плотности точек) для гарантии, что в каждом интервале ξ – самая высокая лидарная точка – соответствует поверхности кроны. Аналогичный угловой анализ был выполнен ранее, когда авторы стремились усовершенствовать ручную сегментацию крон деревьев на основе полевых измерений, удалив секторы, включающие лидарные точки соседних деревьев [Tree species differentiation using intensity data derived from leaf-on and leaf-off airborne laser scanner data, 2009]. В частности, они представляли угловой сектор с учетом средних значений высоты в каждом интервале ξ , равном 0,5 м. Затем, оценивая тенденцию изменения профиля сектора, они определяли возможную избыточную сегментацию (*commission segmenting*). Напротив, при предложенном методе рассматривается максимальное значение высоты для каждого интервала,

чтобы представить форму кроны, и определяется положение ближайшей верхушки дерева. Затем к функции $S_{k,\Theta_j}(\rho)$ применяется гауссова фильтрация, чтобы обрезать верхние ветви и тем самым избежать ложных локальных максимумов. В отличие от фильтрации, применяемой в домене изображения, в данном случае не теряются никакие детали, сохраняя при этом коническую форму кроны. Чтобы избежать ложного обнаружения верхушечных побегов (апексов) дерева, локальный максимум считается вершиной дерева, если он обнаружен по крайней мере на двух разных апексах деревьев, определенных в растровой модели высоты крон. Это основано на предположении, что пропущенный апекс окружен более чем одним деревом. В условиях густого насаждения эта перекрестная проверка позволяет избежать ложных локальных максимумов, не теряя при этом возможных вершин деревьев [Paris, Valduga, Bruzzone, 2016].

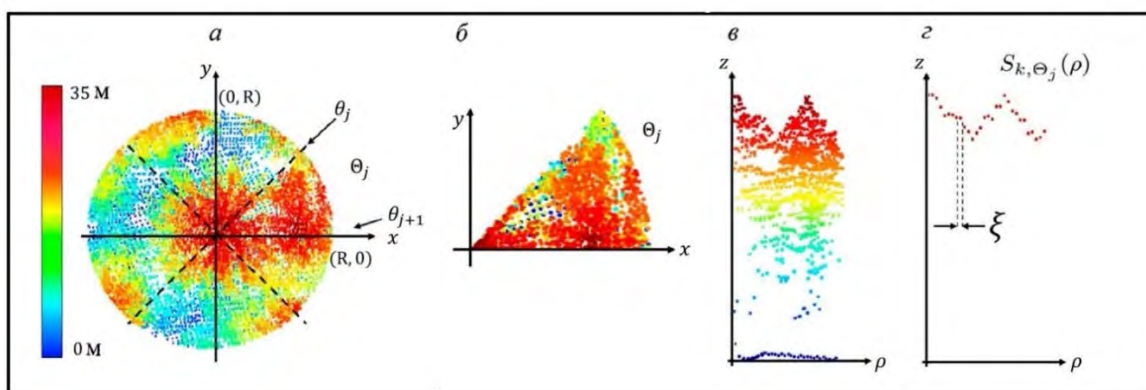


Рис. 88. Пример углового анализа: *a* – вид сверху на лидарное облако точек, разделенное на восемь угловых секторов; *б* – вид сверху на лидарные точки углового сектора Θ_j ; *в* – вид сбоку на лидарные точки углового сектора Θ_j после их проекции на плоскость ρ – z ; *г* – вертикальный профиль уточненных лазерных сигналов, соответствующий проекции ρ – z на *в*. Цветовая гамма от красной до синей зоны соответствует диапазону высот деревьев от 35 м до нуля [Paris, Valduga, Bruzzone, 2016]

Гибридные подходы, представленные в литературе [3D segmentation of single trees exploiting full waveform LIDAR data, 2009], обычно уточняют результаты сегментации, полученные в растровой модели высоты крон путем регистрации стволов деревьев или путем расчета параметрических моделей применительно к сегментированным облакам точек [Improving the efficiency and accuracy of individual tree crown delineation from high-density lidar data, 2014]. Однако стволы деревьев не всегда видны (особенно в условиях густого леса), а для получения точных результатов обнаружения необходимо правильно настроить параметры модели. В отличие от подобных подходов, предложенный метод для лучшего обнаружения деревьев использует домены изображения и облака точек совместно с учетом геометрической

структуры кроны. Кроме того, предлагаемый анализ облаков точек не требует больших вычислительных затрат и, следовательно, может быть легко применен к большим лесным массивам [Paris, Valduga, Bruzzone, 2016].

Далее следует оконтуривание крон доминирующих деревьев. Чтобы устранить недостатки методов сегментации, основанных на растровой модели крон деревьев, для оконтуривания крон на основе нормализованного облака точек обычно применяют методы кластеризации [LIDAR-based geometric reconstruction of boreal type forest stands at single tree level for forest and wildland fire management, 2004; Gupta, Weinacker, Koch, 2010]. Однако недостатком этих методов является большая вычислительная нагрузка, поскольку необходимо обрабатывать все облако точек. Более того, они не учитывают физические свойства формы кроны, необходимые для выполнения сегментации. В отличие от упомянутых методов, в предложенном подходе для сегментации каждого отдельного дерева использована геометрическая структура крон. На основе углового анализа сегментация адаптируется к различным частям кроны, анализируя каждый угловой сектор отдельно. Для лучшего определения контуров кроны можно увеличить количество угловых секторов при условии, что в каждом из них будет достаточное количество лидарных точек, характеризующих форму кроны. Затем проверяется набор деревьев, обнаруженных с помощью деривационного анализа, чтобы убедиться, что эти сегментированные облака точек имеют минимальное количество лидарных отметок. Действительно, в случае, если при деривационном анализе верхние ветви могут выглядеть как локальные максимумы, очерченные вокруг них кроны могут быть легко удалены, поскольку они содержат мало лидарных отметок. В отличие от ранее применяемых методов, предложенный подход позволяет выполнять сегментацию каждой кроны отдельно и параллельно, что значительно сокращает вычислительные затраты [Paris, Valduga, Bruzzone, 2016].

В данном исследовании предполагалось, что насаждение характеризуется не двумя ярусами деревьев, а представляет многоярусную структуру. Чтобы автоматически обнаружить растительность нижних ярусов, вначале каждая сегментированная крона разбивается на угловые секторы, достаточно большие, чтобы можно было обнаружить наличие субдоминантных деревьев, и они должны быть меньше количества секторов, используемых для выполнения сегментации кроны доминирующих деревьев (рис. 89). Далее анализируется вертикальный профиль каждого сектора, чтобы определить как наличие, так и высоту субдоминантных деревьев. Действительно, если под основным пологом имеются деревья, то разумно предположить наличие горба в нижней части вертикального профиля углового сектора кроны (рис. 89, в), в противном случае невидимого (рис. 89, е).

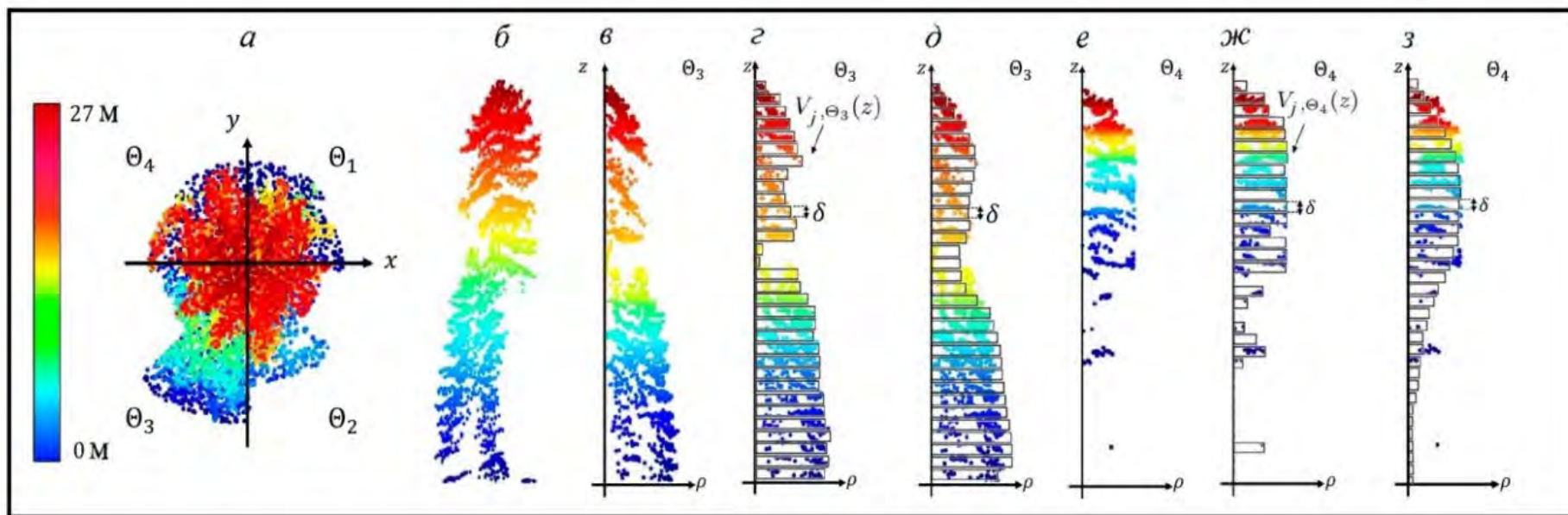


Рис. 89. Пример обнаружения кроны субдоминантного дерева: *a* – вид сверху на крону доминирующего дерева, разделенную на четыре угловых сектора; *б* – вид сбоку на крону доминирующего дерева; *в* – вертикальный профиль проецируемых лидарных точек при наличии кроны субдоминантного дерева; *г* – квантирование вертикального профиля; *д* – профиль после гауссовой фильтрации; *е* – вертикальный профиль проецируемых лидарных точек при отсутствии крон субдоминантных деревьев; *ж* – выполнено квантирование вертикального профиля; *з* – профиль после гауссовой фильтрации [Paris, Valduga, Bruzzone, 2016]

Если обнаружен локальный минимум, то предполагается наличие субдоминантного дерева (рис. 89, д), но если локальные минимумы не обнаружены, то предполагается, что нижнего яруса нет (рис. 89, з). Далее генерируется растровое изображение и определяется вершина подчиненного дерева с помощью метода установки уровня к полученной модели высот, представляющей растительность нижнего яруса (рис. 90). В частности, смежные угловые секторы растрируются на одном и том же изображении, чтобы определить, представляют они одно и то же угнетенное дерево или они разные. Напротив, несмежные угловые секторы растрируются отдельно. В отличие от методов, представленных в опубликованных источниках [Assessing the 3D structure of the single crowns in mixed alpine forests, 2007; Wang, Weinacker, Koch, 2008; An efficient, multi-layered crown delineation algorithm for mapping individual tree structure across multiple ecosystems, 2014], угловой анализ позволяет обнаружить наличие более одного дерева под одним и тем же доминирующим деревом основного полога. Кроме того, круглый выступ подчеркивает наличие крон субдоминантных растений, что облегчает их обнаружение. В конце этого шага получают набор вершин субдоминантных деревьев.

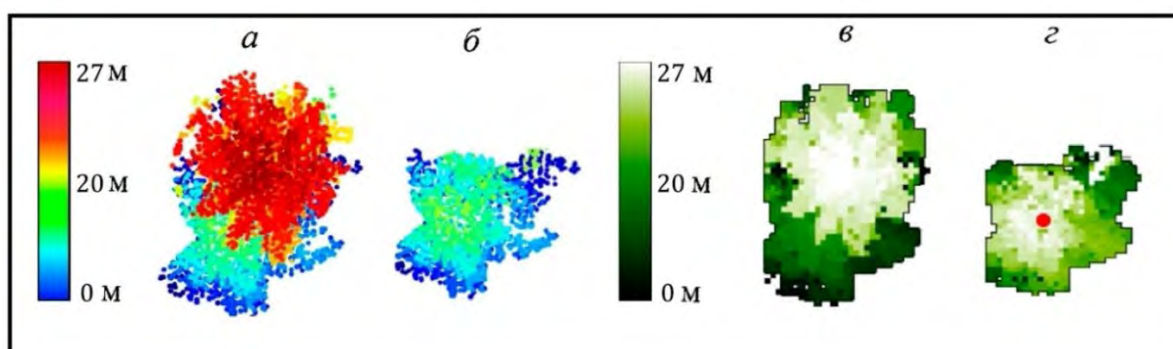


Рис. 90. Пример определения субдоминантного дерева: *а* – вид сверху на крону доминирующего дерева по облаку точек; *б* – вид сверху на субдоминантное дерево, вычлененный из *а*; *в* – модель высоты кроны доминирующего дерева; *г* – модель высоты кроны субдоминантного дерева, где обнаруженная вершина дерева выделена красным цветом [Paris, Valduga, Bruzzone, 2016]

Далее выполнено оконтуривание крон субдоминантных деревьев в нижнем ярусе насаждения по аналогии с пологом доминирующих деревьев. Метод был протестирован на двух наборах лидарных данных, полученных в разных географических районах с различной плотностью лазерных точек, далее называемых наборами данных с высокой (15 точек/м²) и с низкой плотностью (5 точек/м²). Оба объекта представляют собой хвойные леса, расположенные в южных итальянских Альпах, в горной местности, характеризующейся сложной морфологией рельефа [Paris, Valduga, Bruzzone, 2016].

Для оконтуривания доминирующих деревьев предложенный метод был сравнен с двумя ранее рекомендованными методами: 1) методом установки уровня (*level set method*) [Capturing tree crown formation through implicit surface reconstruction using airborne lidar data, 2009]; 2) фильтрацией локальных максимумов [A segmentation based method to retrieve stem volume estimates from 3-D tree height models produced by laser scanners, 2001]. Для оценки точности обнаружения были использованы эталонные показатели *in situ*: формулы (5)–(7) для оценки показателей “precision”, “recall” и *F-score* [A new method for segmenting individual trees from the lidar point cloud, 2012]. Оба упомянутых метода обнаруживали деревья только в домене изображения, и степень сглаживания, применяемая в растровой модели высоты крон, сильно влияла на результаты. Более того, в то время как метод установки уровня постепенно срезал вершины обнаруженных деревьев в модели высоты крон [Capturing tree crown formation through implicit surface reconstruction using airborne lidar data, 2009], метод локальных максимумов использовал скользящее окно для поиска локальных пиков. Таким образом, размер используемого окна влиял на результаты обнаружения. Соответственно, для обеспечения наилучшего результата необходима настройка самых современных алгоритмов на обучающем наборе данных [Paris, Valduga, Bruzzone, 2016].

Чтобы оценить эффективность предложенного метода на субдоминантном ярусе насаждения, был рассмотрен набор из 171 дерева, отобранный по данным лидара с высокой плотностью импульсов. Для этих деревьев не было доступно никаких измерений *in situ*; таким образом, наличие как доминирующих, так и субдоминантных деревьев проверялось вручную на облаке точек в соответствии с процедурой, описанной выше. В этом случае точность обнаружения и ошибка пропуска (*omission error*) представляют собой количество обнаруженных деревьев и количество ложноотрицательных результатов по отношению к количеству реальных субдоминантных деревьев. Ошибка завышения (*commission error*) представляет собой количество ложных срабатываний по отношению к количеству доминирующих деревьев без учета подпологовых растений. Наконец, показатель общей точности оценивает правильность определения наличия или отсутствия субдоминантных деревьев по отношению к общему количеству деревьев [Paris, Valduga, Bruzzone, 2016].

Чтобы количественно оценить эффективность оконтуривания крон, результаты автоматической сегментации сравнивались с радиусами крон, определенными путем визуальной интерпретации как для доминирующих, так и для субдоминантных деревьев. В наборе данных с высокой плотностью сигналов была получена более высокая частота обнаружения (97,2 %), чем в наборе данных с низкой плотностью (92,2 %), благодаря лучшей характеристике трехмерной структуры насаждения. В то время как в случае

с высокой плотностью по модели высоты крон было обнаружено большинство деревьев (ее пространственное разрешение составило 0,25 м), в случае с низкой плотностью было пропущено 17 деревьев из 33 исходных [Paris, Valduga, Bruzzone, 2016].

Результаты оконтуривания крон показаны на рис. 91, а, б в виде полей варьирования фактического и расчетного радиусов крон правильно обнаруженных деревьев для наборов данных соответственно с высокой и низкой плотностью. Графики показывают способность углового анализа правильно определять границы крон отдельных деревьев, независимо от густоты насаждения и плотности лазерных сигналов. Показатели ошибок указывают на наличие точных результатов в обоих наборах данных. Действительно, R^2 находится в диапазоне от 0,78 до 0,82, в то время как стандартная ошибка колеблется от 7,96 до 8,75 %. Из-за того, что некоторые деревья не были обнаружены, имеет место чрезмерная (*commission*) сегментация крон [Paris, Valduga, Bruzzone, 2016].

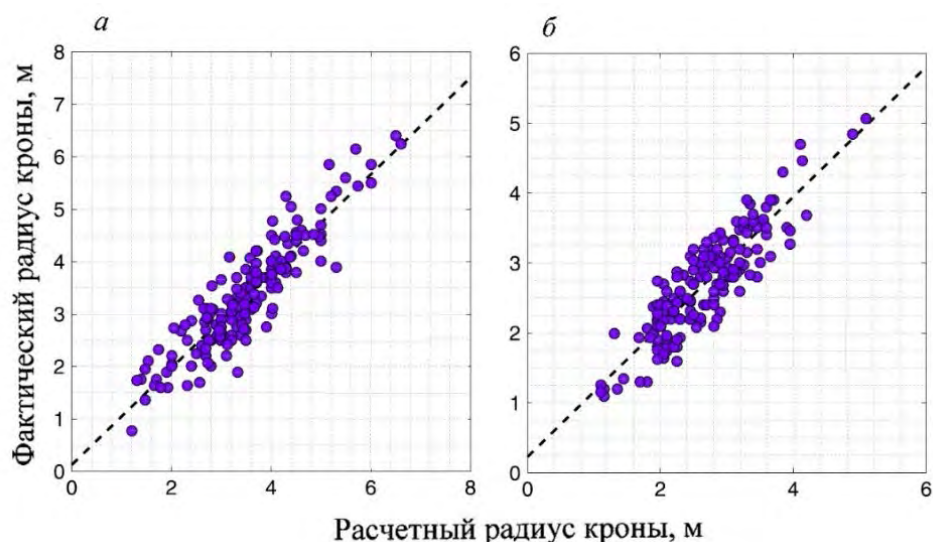


Рис. 91. Соотношение фактических и оцененных с помощью предложенного метода значений радиуса кроны доминирующих деревьев для: а – набора лидарных данных высокой плотности ($R^2 = 0,82$); б – набора лидарных данных низкой плотности ($R^2 = 0,78$) [Paris, Valduga, Bruzzone, 2016]

Качественная оценка результатов сегментации подтвердила эффективность углового анализа при определении границ крон. На рис. 92 показаны некоторые примеры результатов оконтуривания крон, представленных сегментированными деревьями для наборов лидарных данных с высокой и низкой плотностью сканирования. Можно заметить, что метод сегментации позволил оконтурить кроны обнаруженных деревьев, несмотря на наличие перекрывающихся и асимметричных крон [Paris, Valduga, Bruzzone, 2016].

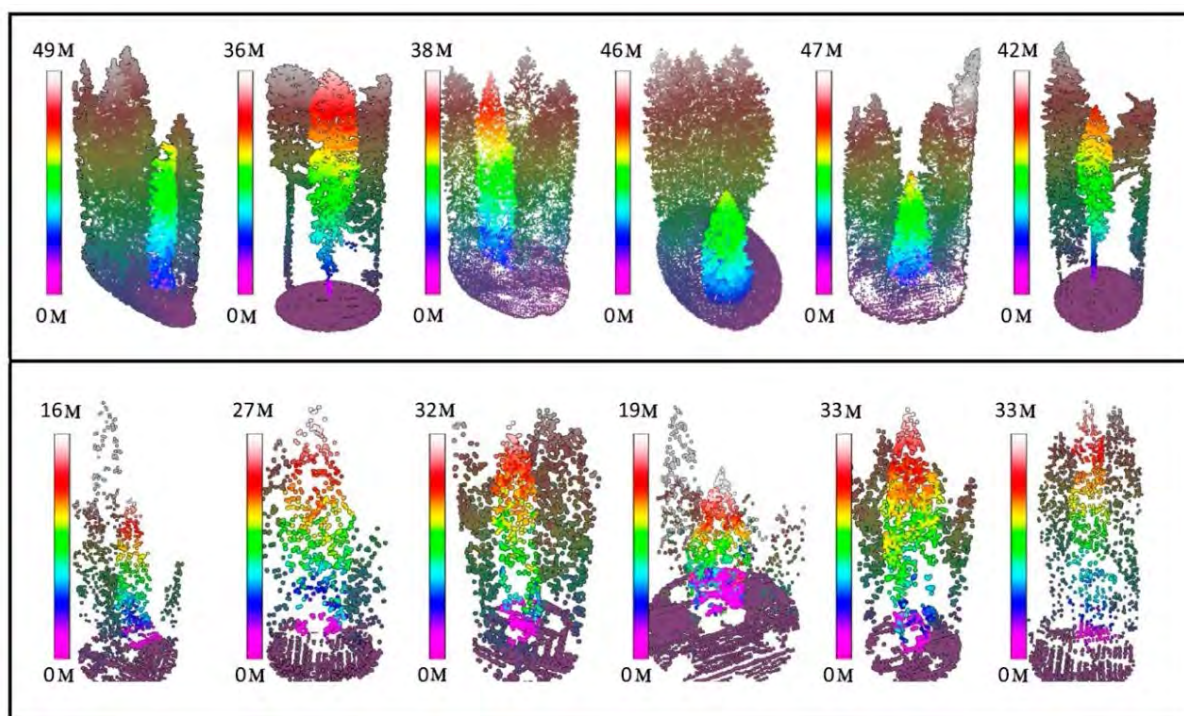


Рис. 92. Качественный пример сегментации крон деревьев, полученной в доминирующем ярусе насаждения для лидарных данных высокой (вверху) и низкой (внизу) плотности. Сегментированные кроны (выделенные яркими цветами) расположены в исходном сценарии насаждения. Визуальный анализ подтверждает, что предложенный метод позволяет правильно извлекать деревья в условиях как плотного полога, так и одиночных деревьев, независимо от плотности лазерных точек [Paris, Valduga, Bruzzone, 2016]

При сегментации субдоминантных деревьев были сопоставлены результаты, полученные по предложенному методу и вышеупомянутому методу частотного распределения высот [Assessing the 3D structure of the single crowns in mixed alpine forests 2007], предполагающему наличие четкого разделения вертикального профиля насаждения на два яруса. Оба метода обеспечили приемлемые показатели в отношении количества обнаруженных деревьев (соответственно 61 и 66), тогда как предложенный подход значительно сократил количество ложно обнаруженных деревьев (24, по сравнению с 43). Повышенная точность предложенного метода реализуется как за счет углового анализа, который позволяет обнаруживать субдоминантные деревья, присутствующие в разных частях полога, так и за счет шага круговой проекции, который подчеркивает наличие крон субдоминантных деревьев. Количественная оценка, представленная на рис. 93, подтверждает точность предложенного подхода к выделению субдоминантного яруса. На рис. 94 показан качественный пример результатов сегментации субдоминантных деревьев. Визуальный анализ подтверждает эффективность метода

сегментации с учетом формы кроны. Благодаря угловому анализу выделяются небольшие деревья, даже если они находятся очень близко к стволу доминирующего дерева [Paris, Valduga, Bruzzone, 2016].

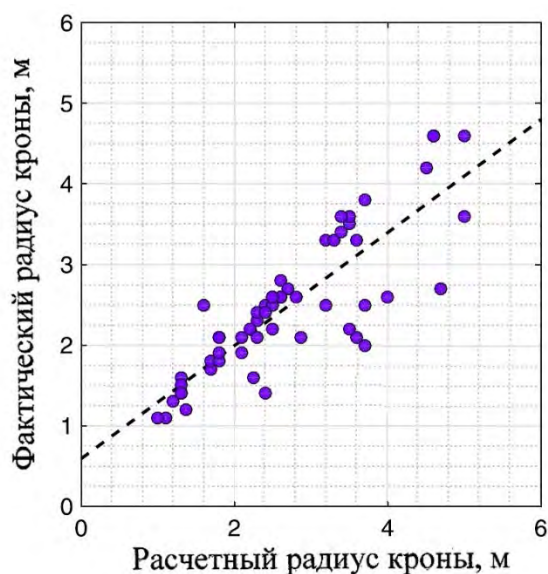


Рис. 93. Соотношение фактических и оцененных с помощью предложенного метода значений радиуса кроны субдоминантных деревьев ($R^2 = 0,71$) [Paris, Valduga, Bruzzone, 2016]

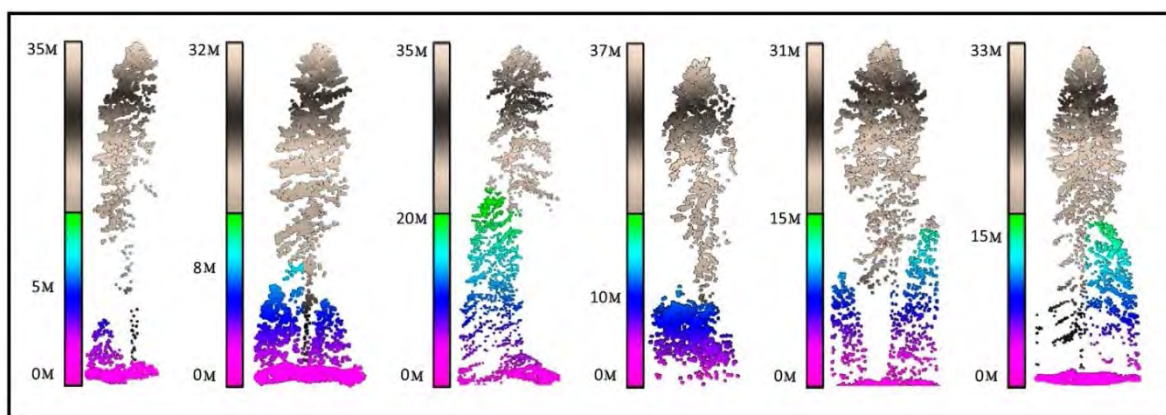


Рис. 94. Качественный пример сегментации крон деревьев, полученной в субдоминантном ярусе насаждения по лидарным данным с высокой плотностью импульсов. Сегментированные кроны представлены яркими цветами в исходном сценарии насаждения [Paris, Valduga, Bruzzone, 2016]

Таким образом, предложен иерархический подход к трехмерной сегментации деревьев по данным лидарного зондирования многоярусного насаждения. При этом используется как растровая модель высоты крон, так и исходное облако точек, определяются кроны доминирующих деревьев с использованием свойств их конической формы, а также субдоминантные деревья с помощью деривационного анализа трехмерного вертикального

профиля крон, и оконтуриваются кроны субдоминантного яруса путем применения алгоритма сегментации непосредственно в домене лидарного облака точек.

Предложенный подход позволяет улучшить результаты обнаружения крон доминирующих деревьев, по сравнению с существующими методами, изложенными в ранее опубликованных источниках. Это достигается путем уточнения результатов обнаружения, полученных по модели крон деревьев, с учетом информации, предоставленной исходным облаком точек лидара, не подверженным отрицательному влиянию интерполяции и сглаживающей фильтрации. Улучшение обнаружения достигается за счет сохранения частоты ошибки завышения (*commission error*), характеризующей ложноположительный результат, на уровне менее 7 %. Более того, обнаружение, выполненное с помощью облака точек, оказалось малочувствительным к изменчивости густоты и среднего размера кроны, поскольку оно основано на геометрических свойствах крон деревьев, что позволяет решить проблему сегментации сложных насаждений с высокой изменчивостью размеров крон. Результаты, полученные по набору данных с высокой плотностью импульсов, показывают, что метод может быть применен к насаждениям разной структуры с использованием одного и того же набора параметров. Причем настройка параметров выполняется с учетом только свойств лидарных данных, без использования какой-либо предварительной информации или процедур обучения. Наконец, угловой анализ вертикального профиля кроны с помощью предложенного метода значительно сократил количество ошибок при обнаружении деревьев в субдоминантном ярусе насаждений [Paris, Valduga, Bruzzone, 2016].

Основными новшествами предложенного подхода являются: 1) использование лидарного облака точек для обнаружения деревьев, пропущенных в домене изображения модели высоты крон; 2) использование лидарного облака точек для определения положения субдоминантных деревьев, расположенных по разные стороны от крон доминирующих деревьев, с помощью углового анализа; 3) определение границ крон как доминирующих, так и субдоминантных деревьев, основанное на деривационном анализе горизонтального профиля деревьев в лидарном облаке точек [Paris, Valduga, Bruzzone, 2016].

Тем не менее, согласно предложенному методу, выделяется ярус субдоминантных растений целиком, без отделения яруса подчиненных деревьев основного полога от нижнего яруса подроста или подлеска. Правда, эта проблема существует безотносительно к лидарному зондированию: и при традиционной таксации названные два яруса вычленить бывает невозможно, особенно в разновозрастном насаждении с вертикальной сомкнутостью полога.

Вышеизложенные методы оконтуривания деревьев касались данных, полученных бортовыми лидарами. Хотя плотность сигналов при бортовом

лидарном сканировании обычно ограничена 10 точками/м² [A survey of remote sensing-based aboveground biomass estimation methods in forest ecosystems, 2014; A bottom-up approach to segment individual deciduous trees using leaf-off lidar point cloud data, 2014], миниатюризация датчиков и быстроразвивающиеся технологии, связанные с беспилотными летательными аппаратами (БПЛА), позволили увеличить плотность точек лидара на два порядка [New opportunities for forest remote sensing through ultra-high-density drone lidar, 2019]. Возросший уровень детализации структуры насаждения, фиксируемый с помощью БПЛА-лидара, требует новых методов для точного обнаружения деревьев. В связи с этим было проведено исследование по разработке алгоритма оконтуривания крон деревьев с целью эффективного использования данных БПЛА-лидара в густых эвкалиптовых насаждениях смешанного породного состава, без необходимости наземных наблюдений [Individual tree detection and crown delineation from unmanned aircraft system (UAS) LiDAR in structurally complex mixed species eucalypt forests, 2021].

Традиционно использование воздушного лазерного сканирования для сегментации деревьев основывалось на нисходящем подходе, при котором обычно используется растровая модель высоты полога (СНМ) для определения локальных максимумов на верхушках деревьев и определения областей крон вокруг максимумов с использованием алгоритма морфологического водораздела [Wang, Gong, Biging, 2004] и других методов. Нисходящий подход с использованием модели высоты полога лучше всего подходит для хвойных деревьев с четко выраженным апексом, но угнетенные подпопеловые деревья при этом часто остаются незамеченными [Comparative testing of single-tree detection algorithms under different types of forest, 2011]. Вечнозеленые эвкалипты имеют обычно асимметричную форму кроны с постоянным профилем листьев при наличии сомкнутых крон и наклоненных деревьев, которые дают более низкие результаты при использовании метода нисходящей модели высоты полога, по сравнению с методами, которые работают непосредственно по данным облаков точек [Using tree detection algorithms to predict stand sapwood area, basal area and stocking density in *Eucalyptus regnans* forest, 2015].

Методы распознавания деревьев непосредственно по облакам точек повышают показатели обнаружения в насаждениях с неправильными кронами за счет кластеризации деревьев под их верхушками. Как уже отмечалось, точность сегментации по алгоритмам, работающим непосредственно с облаками точек, сильно зависит от плотности точек и густоты древостоя [An international comparison of individual tree detection and extraction using airborne laser scanning, 2012]. Геометрия обзора при бортовом сканировании не обеспечивает полной регистрации стволов, поскольку они закрыты пологом. Поэтому в дополнение к воздушному стали применять наземное лазерное сканирование для наблюдения за вертикальной структурой насаждения из-под полога, когда облака точек смещены в сторону нижних частей дерева

и, следовательно, больше подходят для восходящего алгоритма сегментации [Automatic stem mapping using single-scan terrestrial laser scanning, 2012; International benchmarking of terrestrial laser scanning approaches for forest inventories, 2018].

При сегментации деревьев по данным бортового лидара получил распространение алгоритм «структуры по движению» (*Structure from Motion – SfM*), предоставляющий решение классической задачи в области компьютерного зрения и визуального восприятия [Ullman, 1979]. Он включает в себя метод фотограмметрической визуализации, позволяющий оценивать трехмерные структуры на основе последовательностей двумерных изображений, которые могут быть связаны с локальными сигналами движения (*motion signals*).

Хотя использование облака точек в формате SfM имеет широкое распространение [Harwin, Lucieer, 2012; Dandois, Ellis, 2013], для получения полного облака точек вертикального профиля полого датчика БПЛА-лидара применялись реже из-за проблем с аппаратно-программной интеграцией. Подобная технология с использованием модели высоты полого и алгоритма RANSAC со сферической моделью иногда применялась, но только в одновидовых насаждениях простой морфологии [Wallace, Lucieer, Watson, 2014]; Single-tree detection in high-density LiDAR data from UAV-based survey, 2018; Yin, Wang, 2019]. Несмотря на то, что были получены хорошие результаты, эти методы не могут быть перенесены на насаждения смешанного породного состава ввиду их сложной структуры [Individual tree detection and crown delineation from unmanned aircraft system (UAS) LiDAR in structurally complex mixed species eucalypt forests, 2021].

По сравнению с традиционными алгоритмами бортового и наземного лазерного зондирования, уникальные преимущества технологии БПЛА-лидара, с одной стороны, и ограничения – с другой, требуют разработки новых, специально предназначенных для него алгоритмов сегментации деревьев. На изменчивость плотности точек БПЛА-лидара между полетами и в их пределах влияют дополнительные факторы, которые не обязательно связаны с исследуемым пологом. Прежде всего оказывает существенное влияние на плотность точек по вертикальному профилю полого высота полета относительно земли, учитывая, что плотность точек обратно пропорциональна квадрату расстояния от полого до датчика [Remote sensing technologies for enhancing forest inventories: A review, 2016]. Типичный диапазон измерений для датчиков БПЛА-лидара составляет приблизительно 100 м, и поэтому в насаждениях сложной структуры при заданной высоте над землей датчик генерирует сильно изменяющуюся плотность точек в диапазоне от 30 до 80 м. Трудности, связанные с полетом параллельно высоте полого, приводят к снижению плотности точек в связи с изменением расстояния платформы БПЛА до земли. В условиях гористой местности низкая высота

полета приводит к тому, что углы датчика в зените относительно земли будут сильно изменяться, что вызывает неоднородное распределение точек на единице площади в зависимости от рельефа местности. План полета ставится под угрозу также скоростью ветра, что, в свою очередь, влияет на скорость полета и конфигурацию маршрутных точек и, следовательно, на изменчивость плотности точек по всему маршруту [Individual tree detection and crown delineation from unmanned aircraft system (UAS) LiDAR in structurally complex mixed species eucalypt forests, 2021].

Эти мешающие факторы, связанные со сбором данных с помощью БПЛА, еще более усугубляются изменчивостью эшелонирования и плотности вертикальных горизонтов в многоярусном сложном насаждении, что требует разработки новых алгоритмов сегментации деревьев при использовании различных характеристик БПЛА-лидара. Это особенно актуально, учитывая, что существующие методы, которые работают непосредственно с облаками точек, требуют калибровки чувствительных к плотности точек параметров на данном участке, в то время как существующие методы сегментации на основе модели высоты полога не используют информацию о детальном профиле деревьев, получаемом с помощью БПЛА-лидара [Individual tree detection and crown delineation from unmanned aircraft system (UAS) LiDAR in structurally complex mixed species eucalypt forests, 2021].

Чтобы создать интегрированную методологию, наиболее подходящую для БПЛА-лидара, в подходе, разработанном в исследовании [Individual tree detection and crown delineation from unmanned aircraft system (UAS) LiDAR in structurally complex mixed species eucalypt forests, 2021], использованы вариации концепций предыдущих исследований: сегментация по морфологическому водоразделу [Wang, Gong, Biging, 2004], метод расстояния между вокселями (*voxel spacing*) или расстояния между центрами двух вокселей (объемных пикселей) вдоль каждого из трех пространственных измерений X, Y и Z [Wang, Weinacker, Koch, 2008], алгоритм укладки слоев [Layer stacking: A novel algorithm for individual forest tree segmentation from LiDAR point clouds, 2017], кластеризация на основе условных евклидовых расстояний [Bottom-up delineation of individual trees from full-waveform airborne laser scans in a structurally complex eucalypt forest, 2016] и алгоритм связности ветвей (*connectivity of branches*) [Nondestructive estimates of above-ground biomass using terrestrial laser scanning, 2015]. В отличие от большинства методов сегментации, в которых применяется нисходящий подход, здесь представлен альтернативный – восходящий алгоритм. Существующие применения восходящего подхода [A survey of remote sensing-based aboveground biomass estimation methods in forest ecosystems, 2014; Bottom-up delineation of individual trees from full-waveform airborne laser scans in a structurally complex eucalypt forest, 2016] полагаются на показатели интенсивности, отличающие ствол от кроны, в то время как в предложенном методе используется информация о местоположении точек облака [Individual tree detection and crown

delineation from unmanned aircraft system (UAS) LiDAR in structurally complex mixed species eucalypt forests, 2021].

Было предложено исследование [Individual tree detection and crown delineation from unmanned aircraft system (UAS) LiDAR in structurally complex mixed species eucalypt forests, 2021] по оценке количества стволов на 1 га в насаждениях эвкалипта разного видового состава различного возраста и санитарного состояния. Структурная сложность эвкалиптовых древостоев смешанного породного состава заключается в беспорядочно наклоненных стволах и крайне нерегулярной структуре переплетающихся ветвей. Вследствие этого густота древостоев по данным бортового лидара оценивалась с относительной среднеквадратичной ошибкой 48 % [A comparison of probable limit in error values calculated from LiDAR-based models and traditional inventory methods in a native sclerophyll forest in south-easter Australia, 2017].

Первой целью данного исследования было использование БПЛА-лидара для оценки густоты сложного многоярусного эвкалиптового насаждения путем разработки нового восходящего алгоритма сегментации, который дает возможность идентификации беспорядочно ориентированных деревьев.

Вторая цель заключалась в создании экономичного алгоритма сегментации, который мог быть надежно применен к широколиственным насаждениям и условиям, наблюдаемым в высокогорных эвкалиптовых лесах, без необходимости наземных наблюдений.

Третья цель заключалась в разработке методологии стратификации профиля полого на ярусы, что полезно при моделировании лесных пожаров, требующем оценки структуры горючих материалов по ярусам насаждений [Individual tree detection and crown delineation from unmanned aircraft system (UAS) LiDAR in structurally complex mixed species eucalypt forests, 2021].

Исследование проведено в насаждениях эвкалипта разного видового состава на южной стороне Большого водораздельного хребта на юго-востоке штата Виктория в Австралии. Рельеф на участке крутой с глубокими ущельями, а высота над уровнем моря колебалась от 200 до 1 570 м. Был применен многороторный БПЛА *DJI Matrice 600 Pro* с лидарным датчиком *Velodyne VLP-16*, тесно связанным с навигационной системой *Spatial DUAL*, состоящей из двухчастотного приемника Глобальной навигационной спутниковой системы (GNSS) и блока инерциальных измерений (IMU) для точного определения положения и ориентации БПЛА и датчика. Система записывала 66,667 импульсов в секунду в 16 параллельно сканированных слоях вперед и назад от $+15^\circ$ до -15° и по траверсе от -40° до $+40^\circ$. Точность определения местоположения сканера составляла около 3 см, но после учета погрешности положения и ориентации, а также неопределенности, вызванной размером лазерного следа на земле, расчетная погрешность в координатах X , Y , Z при прямой географической привязке составляла около 10 см

[Individual tree detection and crown delineation from unmanned aircraft system (UAS) LiDAR in structurally complex mixed species eucalypt forests, 2021].

Согласно плану полета, требовалось, чтобы аппарат постоянно летел на высоте от 15 до 20 м над верхушками полога, чтобы уменьшить изменчивость плотности облаков точек из-за изменения высоты воздушного судна относительно высоты полога (рис. 95). Диапазон измерений датчика, составляющий 100 м, позволял фиксировать тем более высокую плотность точек, чем ближе аппарат подлетал к верхушкам деревьев и чем ниже были деревья. На каждой траектории полета профиль высоты полога относительно высоты полета определялся с использованием модели высоты полога, сгенерированной на основе данных лазерного сканирования. Конфигурации полета и датчиков, связанные с данными сканирования, были показаны ранее [Jaskierniak, Kuczera, Benyon, 2016]. KML-файл горизонтальной траектории полета был получен с использованием программного обеспечения *Djiflightplanner1*, а профиль максимальной высоты полога вдоль линии полета был рассчитан с использованием буфера длиной 5 м с интервалом 2 м вдоль линии полета. Как показано на рис. 95, через профиль полога каждой линии полета была проведена прямая линия (черная линия на рис. 95, б–г), перемещенная на 20 м вверх (красные линии). Затем была проведена визуальная оценка профиля полога для каждой линии полета, чтобы вручную добавить путевые точки полета и скорректировать их высоты, чтобы аппарат постоянно летел на высоте от 15 до 20 м над верхушками деревьев (зеленые линии). Каждый полет состоял из набора параллельных линий, а угол обзора датчика позволял создавать 2 или 3 смежные линии, перекрывающие каждую сторону линий полета. Конечные путевые точки были импортированы в приложение *Hangar Autopilot app2* для автономной навигации [Individual tree detection and crown delineation from unmanned aircraft system (UAS) LiDAR in structurally complex mixed species eucalypt forests, 2021].

Для определения точной высокоскоростной траектории (20 Гц) для бортового приемника Глобальной навигационной спутниковой системы GNSS БПЛА требовалась двухчастотная базовая станция GNSS. Последующая обработка проводилась с использованием программного обеспечения RTKLIB 3 и требуемых бортовых данных GNSS в файле *rinex*, базовом файле *rinex*, навигационных данных и данных о точном орбитальном положении спутника, доступных через 12–18 дней после полетов, полученных из системы данных динамики земной коры (CDDIS). Данные о тангаже, крене и курсе были получены с помощью пространственного двойного бортового фильтра Калмана. Плечо рычага (*lever-arm*) между основной антенной GNSS и лазерным сканером было точно смоделировано в 3D CAD-модели. Углы визирования между IMU и лазерным сканером были определены экспериментальным путем в ходе специального эксперимента с калибровочными мишенями и перекрывающимися полетными полосами. При применении уравнения лидара были учтены плечо рычага и углы визирования. Для

каждой линии полета был создан специальный файл LAS [Individual tree detection and crown delineation from unmanned aircraft system (UAS) LiDAR in structurally complex mixed species eucalypt forests, 2021].

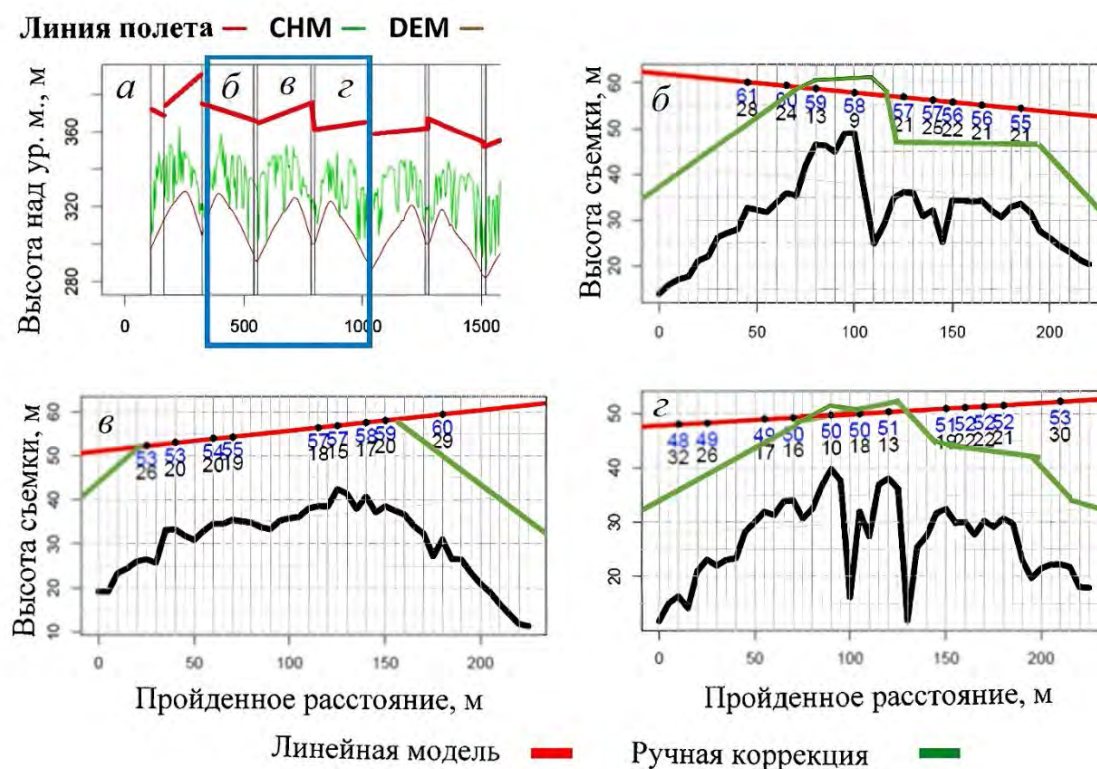


Рис. 95. Профиль полога: а – полученные с помощью БПЛА-лидара модели высоты полога и поверхности земли для вычисления высоты линии полета в диапазоне от 15 до 20 м над верхушками деревьев; б–г – выделены три красные линии полета (обведенные на а синей рамкой), чтобы показать для каждой линии линейную модель и скорректированные вручную высоты, используемые для определения высот путевых точек вдоль каждой линии полета. Синие и черные цифры на каждом локальном максимуме модели высоты полога представляют высоту линейной модели соответственно от точки полета и от модели высоты полога [Individual tree detection and crown delineation from unmanned aircraft system (UAS) LiDAR in structurally complex mixed species eucalypt forests, 2021]

Чтобы удалить необъяснимые выбросы, расположенные заметно ниже уровня земли и высоко над верхушками деревьев в сгенерированном облаке точек, был применен шумовой фильтр. В фильтре использовалось программное обеспечение *Lastools 4* для идентификации изолированных точек с менее чем двумя соседними точками на евклидовом расстоянии 0,1 м в горизонтальной плоскости и 0,3 м в вертикальной плоскости. Затем программное обеспечение *Lastools* было применено к обесшумленному облаку точек, чтобы отделить наземные точки от других точек, которые были дополнительно обработаны посредством нормализации всех значений координат в Z-измерении путем вычитания цифровой модели рельефа (DEM) из облака точек лидара [Individual tree detection and crown delineation from unmanned

aircraft system (UAS) LiDAR in structurally complex mixed species eucalypt forests, 2021].

Траектории полетов были сориентированы по центру тестовых участков размером 60×60 м, где были получены данные о породе, местоположении и диаметре ствола каждого дерева. Сначала была проведена ручная процедура сегментации для повышения точности определения местоположения всех видимых деревьев, измеренных в полевых условиях, в облаке точек с помощью программного обеспечения *CloudCompare5*.

Деревья, идентифицированные в полевых условиях, но пропущенные при ручном сегментировании, были нанесены на карту с указанием расстояния и азимута от ближайшего дерева в ручном сегментировании, и когда деревья, идентифицированные ручной сегментацией, не были идентифицированы в полевых условиях, они были удалены с сегментированной карты деревьев. Автоматизированный алгоритм сегментации был проверен на соответствие измеренной густоте деревьев на тестовом участке [Individual tree detection and crown delineation from unmanned aircraft system (UAS) LiDAR in structurally complex mixed species eucalypt forests, 2021].

Как показано на рис. 96, лидарные точки, связанные с нижним ярусом, были определены с помощью процедуры определения плотности полога, согласно которой его ярусы разделяли по вертикали. Для этой цели в процедуре сначала оценивался вертикальный профиль полога в ячейках сетки (*grid-cell*), а затем в полигонах Вороного. Процедура определения плотности ядра ячеек сетки (*grid-cell kernel density*) включала в себя два этапа: сначала удалялись точки над основанием кроны, а затем точки, представляющие деревья среднего и верхнего ярусов. В процедуре полигона Вороного были удалены точки выброса, пропущенные процедурой ячеек сетки. Предварительный анализ, включающий визуальную оценку плотности ядер ячеек сетки, показал, что разрешение ячеек сетки (GR) равно 3 м при ширине полосы пропускания (BW) 0,4, что является оптимальными значениями параметров для оценки высот с плотностью точек ниже пороговой (Th_{Den}):

$$Th_{Den} = Th_{Gap} Den_{max}, \quad (9)$$

где Th_{Gap} была задана как постоянная, равная 0,2; Den_{Max} – максимальная плотность для ядра ячейки сетки.

Для определения величины Th_{Gap} был проведен анализ методом проб и ошибок, включающий визуальную оценку результатов. На рис. 96, а красной линией показана примерная ячейка сетки, которая использовалась для определения самого длинного диапазона высот с плотностью точек ниже 20-го процентильного значения плотности.

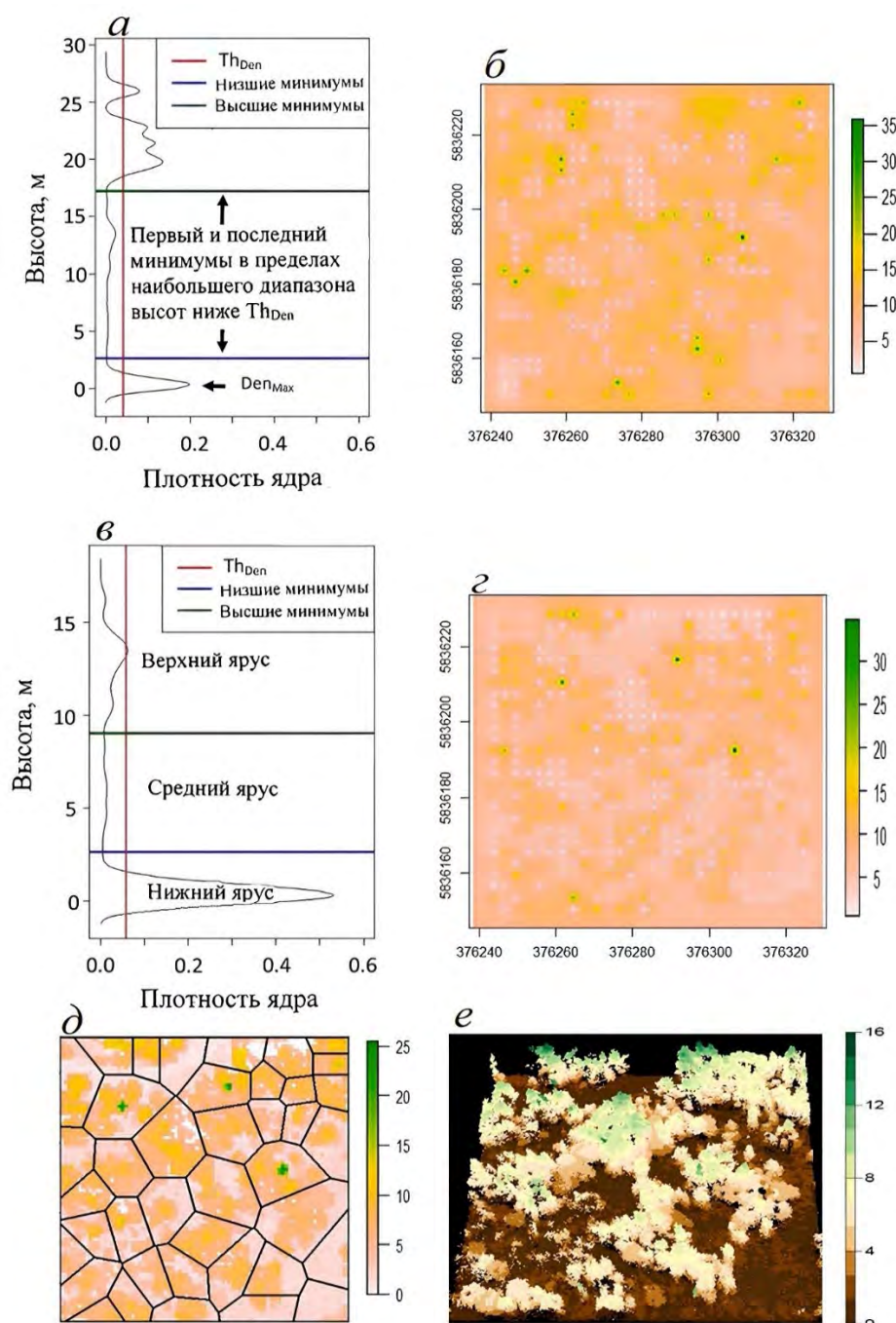


Рис. 96. Модель плотности полога: *a* – пример ячейки сетки (*grid-cell*) с первой плотностью ядра, используемой для удаления точек выше самых высоких минимумов (зеленая линия) в пределах самого длинного диапазона высот низких плотностей точек, т. е. ниже красной линии; *б* – поверхностный слой, созданный для одного участка размером 60×60 м с использованием первой плотности ядра; *в* – вторая плотность ядра, используемая для удаления точек выше самых низких минимумов (синяя линия) в пределах самого длинного диапазона высот низких плотностей точек; *г* – поверхностный слой, созданный из плотности второго ядра; *д* – полигоны Вороного, сгенерированные вокруг локальных максимумов, рассчитанных с использованием фильтрации локальных максимумов (LMF); *е* – конечный нижний ярус с коричнево-зеленой цветовой шкалой для значений высоты. Все шкалы обозначают высоту в метрах [Individual tree detection and crown delineation from unmanned aircraft system (UAS) LiDAR in structurally complex mixed species eucalypt forests, 2021]

Как показано зеленой вертикальной линией на рис. 96, а, для отбора всех точек ниже этого значения высоты использовались самые высокие минимумы в пределах этого диапазона высот. На рис. 96, б представлены максимальные минимумы в пределах наибольшего диапазона высот для всех ячеек сетки одного участка размером 60×60 м, а точки под этим поверхностным слоем были нанесены во время второй процедуры определения плотности ядра (рис. 96 в, г).

Вторая процедура определения плотности ядра проиллюстрирована для того же примера ячейки сетки на рис. 96, в, который также вычисляется с использованием формулы (9), за исключением того, что на этот раз интервал равен 0,1, чтобы определить самый длинный диапазон высот с плотностью точек ниже значений плотности 10-го перцентиля. Как показано синей вертикальной линией на рис. 96, в, были определены самые низкие минимумы в пределах этого диапазона высот, и эти значения высоты для каждой ячейки сетки были затем интерполированы с использованием поверхности, взвешенной по обратному расстоянию (IDW), с разрешением ячейки сетки 0,2 м (рис. 96, г).

Затем ко всей поверхности, взвешенной по обратному расстоянию (IDW), была применена процедура фильтрации локальных максимумов (LMF) с окном поиска GSW ($GSW = 11$ ячеек сетки). Используя локальные максимумы, определенные на каждом участке размером 60×60 м, получена диаграмма Вороного (рис. 96, д) для участка, где точки внутри каждого полигона были нанесены в рамках третьей процедуры определения специфичной для полигона плотности ядра, которая была направлена на удаление ошибочно высоких точек (зеленых зон) из нижнего яруса. Процедура полигона Вороного в основном устраняла препятствия, которые процедура плотности ядра на уровне сетки (рис. 96, а–г) не смогла устранить из нижнего яруса. Предварительный анализ методом проб и ошибок полигональной процедуры Вороного показал, что Th_{Gap} является нечувствительным значением параметра в диапазоне от 0,03 до 0,06, а визуальная оценка удаленных точек показала, что оптимальным является значение 0,04. При использовании постоянного значения Th_{Gap} , равного 0,04, с помощью формулы (9) были рассчитаны характерные для полигонов плотности ядер, чтобы определить самый большой диапазон высот с плотностью точек ниже 4-го перцентиля плотности. Вычисленный Th_{Den} затем использовался для определения и удаления точек, расположенных выше минимумов плотности ядра в пределах данного диапазона высот, если это значение превышало среднее значение высоты всех максимумов LMF, вычисленных для всей площади участка 60×60 м. На рис. 96, е показан пример результирующего неоднородного облака точек нижнего яруса для участка размером 60×60 м [Individual tree detection and crown delineation from unmanned aircraft system (UAS) LiDAR in structurally complex mixed species eucalypt forests, 2021].

Для точек, расположенных над нижним ярусом, стволы основного яруса и связанная с ними морфология ветвей были сгруппированы с использованием их горизонтальных сечений. Упомянутая структура первоначально была сгруппирована с помощью алгоритма морфологического водораздела, а затем для кластеризации структур между срезами применен анализ главных компонент (РСА). Сначала все точки над нижним ярусом были срезаны горизонтально с шагом Sl_H по высоте ($Sl_H = 0,4$ м). Для каждого среза была сгенерирована привязанная к сетке поверхность плотных точек (*gridded point-density surface*) с использованием разрешения ячеек сетки VR (где VR равно 0,2), что также является воксельным разрешением, задействованным ниже. Затем алгоритм водораздела был применен к поверхности с плотностью точек каждого среза для кластеризации ячеек сетки (G_{WS}). Изложенное является примером нового использования алгоритма сегментации водораздела, который чаще всего применялся с использованием значений максимальной высоты в моделях высоты полого. Для каждого кластера G_{WS} предполагалось, что местоположение ячейки сетки с наибольшей плотностью точек соответствует центроиду кластера по оси X–Y (Cl_{Sl}), а среднее значение Z для всех точек в кластере G_{WS} представляет собой высоту центроида кластера Cl_{Sl} [Individual tree detection and crown delineation from unmanned aircraft system (UAS) LiDAR in structurally complex mixed species eucalypt forests, 2021].

Местоположения Cl_{Sl} на всех срезах были затем сгруппированы в кластеры растений (*vegetation clusters* – Cl_{Veg}). На рис. 97, а показан пример кластера с системой индексации ветвей (Br), которая использовалась для группирования ячеек, относящихся к конкретным срезам. Для создания Cl_{Veg} предполагалось, что все Cl_{Sl} в пределах нижнего горизонтального среза на участке представляют начальные местоположения (*seed locations*) Cl_{Veg} , и им присваивалось значение Br , равное единице, для представления начала системы индексации ветвящихся стволов в пределах Cl_{Veg} . По мере продвижения вверх по горизонтальным срезам Cl_{Sl} в пределах каждого предметного среза объединялись с Cl_{Veg} под предметным срезом, если Cl_{Sl} и Cl_{Veg} находились друг от друга в пределах горизонтального евклидова порогового расстояния ($EDT = VR \times 4$ м).

Для любой заданной высоты среза Cl_{Veg} , расположенный непосредственно под предметным срезом, может содержать одно или несколько уникальных значений Br для представления каждой ветви Cl_{Veg} . Определение местоположения вершин каждой ветви потребовалось для вычисления евклидова расстояния между предметным срезом Cl_{Sl} и ветвями, расположенными ниже предметного среза. Определение местоположения каждой ветви зависело от того, сколько Cl_{Sl} содержится в архитектуре соответствующей ветви. Архитектура ветви включала все ответвления и стволы, которые были напрямую соединены между вершиной ветви и начальными местоположениями соответствующего Cl_{Veg} . Если архитектура ветви содержала Cl_{Sl} ,

расположенный менее чем на четыре высоты среза ниже соответствующего среза, то предполагалось, что местоположение ветви по X – Y является самым высоким местоположением Cl_{Sl} в пределах этой ветви. В противном случае применялся анализ главных компонент (РСА) с использованием Cl_{Sl} , расположенного на четыре среза ниже исследуемого среза ($РСА_{Sl} = 4$), чтобы вычислить вектор направления первого главного компонента (PC1) для ветви. Затем PC1 был спроецирован на исследуемый срез, чтобы оценить местоположение ответвления на нем, одновременно учитывая угол наклона и направление ответвления под исследуемым срезом [Individual tree detection and crown delineation from unmanned aircraft system (UAS) LiDAR in structurally complex mixed species eucalypt forests, 2021].

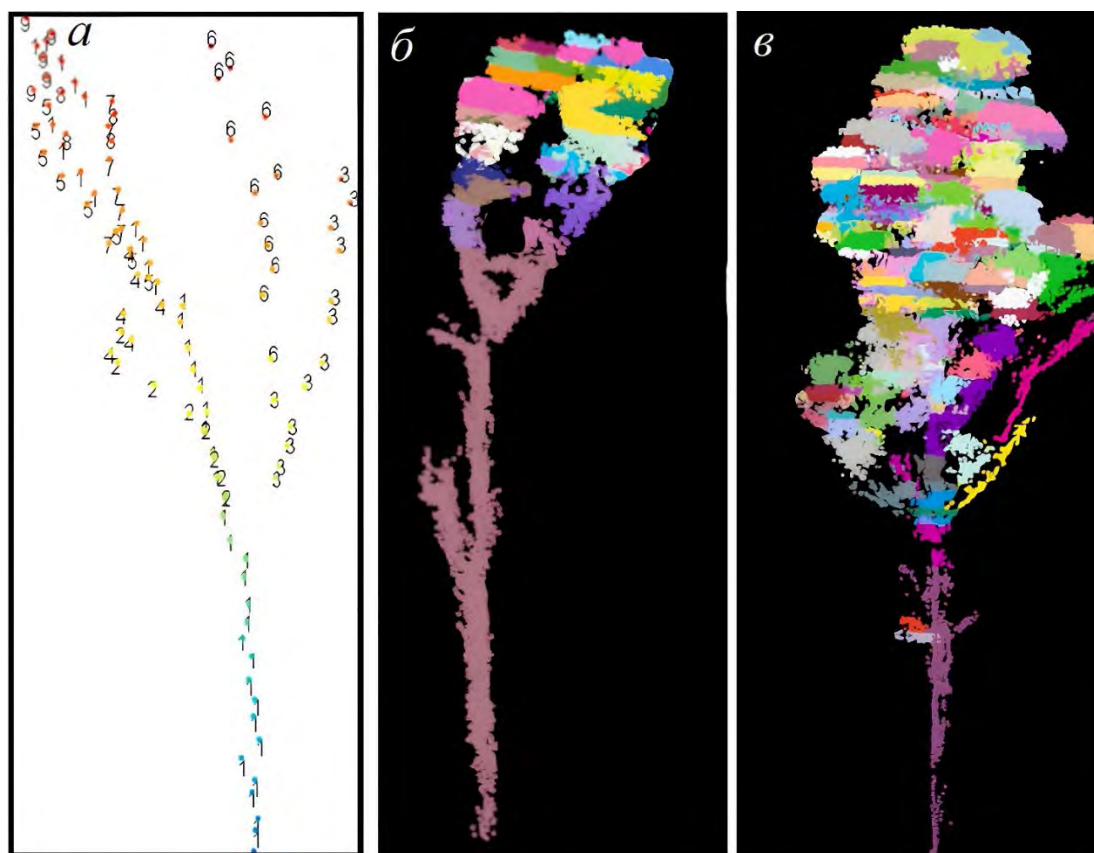


Рис. 97. Примеры группировки кластеров растений: a – Cl_{veg} , состоящий из множества Cl_{Sl} , где каждый Cl_{Sl} пронумерован идентификатором ветви (Br); $б$ – дерево с низкой плотностью полога, отличающейся цветом для каждого P_{veg} ; $в$ – дерево, имеющее густую крону с фрагментированным P_{veg} над ее основанием [Individual tree detection and crown delineation from unmanned aircraft system (UAS) LiDAR in structurally complex mixed species eucalypt forests, 2021]

Если более чем один Cl_{Sl} на высоте среза находился в пределах евклидового порогового расстояния (EDT) местоположения ветви, то каждому Cl_{Sl} присваивалось уникальное значение Br (рис. 97, a), так что: 1) ближайшему Cl_{Sl} к каждой уникальной ветви Cl_{veg} присваивался тот же Br , что и Br ,

представляющий ближайший соответствующий Cl_{Sl} в пределах Cl_{Veg} ; 2) всем остальным Cl_{Sl} присваивалось новое уникальное значение Br для представления новой разветвленной ветви в соответствующем срезе. Если Cl_{Sl} в рассматриваемом фрагменте не были назначены ни одному Cl_{Veg} , поскольку они были изолированы от всех существующих Cl_{Veg} на расстояние, превышающее EDT, то изолированный Cl_{Sl} формировал новый Cl_{Veg} , и ему для обозначения начала нового Cl_{Veg} присваивалось значение Br , равное единице [Individual tree detection and crown delineation from unmanned aircraft system (UAS) LiDAR in structurally complex mixed species eucalypt forests, 2021].

Облако точек каждого участка было классифицировано по уникальным идентификаторам Cl_{Sl} , Br и Cl_{Veg} в ходе описанной выше процедуры кластеризации. Используя облака точек, связанные с каждым Cl_{Veg} (P_{Veg}), было показано (рис. 97, б), как объединенные точки, связанные с каждым Cl_{Sl} , образуют более полный P_{Veg} для представления стволов, соединенных с ветвями у основания кроны. Показано также (рис. 97, в), что в эвкалиптовых насаждениях с густым пологом крона часто чрезмерно сегментирована [Individual tree detection and crown delineation from unmanned aircraft system (UAS) LiDAR in structurally complex mixed species eucalypt forests, 2021].

Объединение кластеров облака точек (P_{Veg}) для формирования более полных кластеров деревьев требует больших вычислительных ресурсов, и по этой причине в остальной части рабочего процесса P_{Veg} были вокселизированы с разрешением VR ($VR = 0,2$ м). Каждый вокселизированный P_{Veg} (V_{Veg}) затем был сгруппирован с помощью алгоритма подключения вокселей, при котором два вокселя, расположенные на расстоянии $2 \times VR$ друг от друга, считались принадлежащими к одному и тому же кластеру вокселей (V_{Cl}). Это приводило к тому, что каждый V_{Veg} имел один или несколько кластеров V_{Cl} в пределах V_{Veg} [Individual tree detection and crown delineation from unmanned aircraft system (UAS) LiDAR in structurally complex mixed species eucalypt forests, 2021].

На рис. 98 наглядно показана эффективность алгоритма сегментации деревьев в насаждениях с различным вертикальным разделением нижнего, среднего и верхнего ярусов, а также деревьев с беспорядочно наклоненными стволами и крайне неравномерной переплетенной структурой кроны. Сравнение рис. 98, а, б и ж, з показывает, что плотность точек вдоль вертикальных профилей уменьшается с разной частотой, что является уникальной характеристикой БПЛА-лидара, затрудняющей разработку надежного алгоритма сегментации деревьев в широком диапазоне типов насаждений и условий съемки.

Доля числа стволов с истинно положительным результатом сегментации (TP) на всех участках составляла от восьми до девяти деревьев из десяти (среднее значение $TP = 0,85$), при этом наихудший вариант был на трех

участках ($TP = 0,35$) и наилучший вариант – тоже на трех участках ($TP = 1,0$).



Рис. 98. Пример сегментации деревьев с типичными лесными условиями с использованием красного цвета для обозначения неклассифицированных точек низкой плотности, коричнево-зеленой цветовой шкалы для обозначения точек нижнего яруса и всех остальных цветов для обозначения обнаруженных деревьев: а – переплетающийся полог (IC), а также подавленные (S) и деревья среднего яруса (MS); б – наклоненные деревья (L) и соприкосновения основания кроны верхнего яруса с нижним ярусом (CB) и (MS); в – деревья IC, S и MS; з – деревья IC и сухостойные (D); д – деревья MS, L и S; е–з – снижение плотности точек по профилю полога (PD) в условиях CB, S, D и IC [Individual tree detection and crown delineation from unmanned aircraft system (UAS) LiDAR in structurally complex mixed species eucalypt forests, 2021]

На рис. 99, по-видимому, были пропущены мелкие деревья, поскольку доля истинно сегментированной численности стволов составляла 85 %, тогда как по показателю площади сечения – 87 % [Individual tree detection and crown delineation from unmanned aircraft system (UAS) LiDAR in structurally complex mixed species eucalypt forests, 2021].

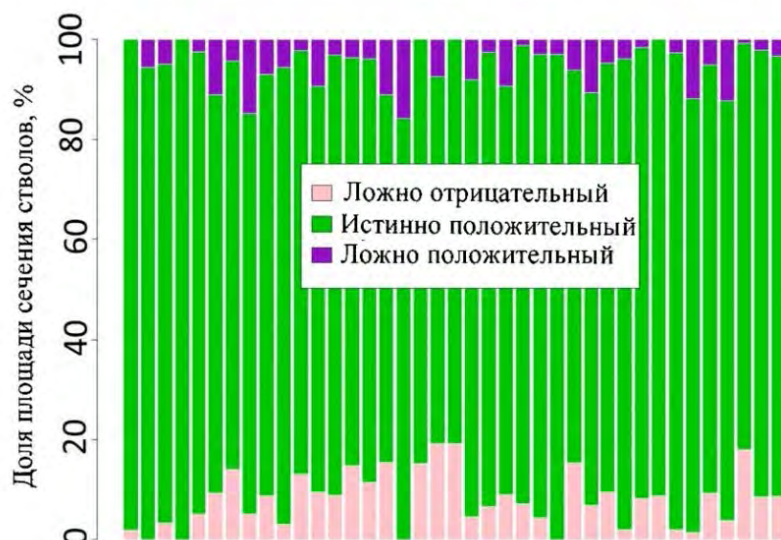


Рис. 99. Процентное распределение площади сечений стволов между деревьями разной корректности сегментирования: истинно положительный (87 %), ложноотрицательный (8 %) и ложноположительный (5 %) результаты, что связано соответственно с корректной сегментацией (идеальная сегментация), ошибкой пропуска (заниженная сегментация) и ошибкой завышения (чрезмерная сегментация). Участки показаны в порядке увеличения густоты деревьев слева направо [Individual tree detection and crown delineation from unmanned aircraft system (UAS) LiDAR in structurally complex mixed species eucalypt forests, 2021]

Резюмируя вышеизложенное, можно констатировать, что настоящим исследованием разработан алгоритм сегментации деревьев, учитывающий структурную сложность эвкалиптовых высокоствольных насаждений смешанного породного состава с использованием БПЛА-лидара с плотностью точек, на два порядка превышающей соответствующий показатель бортового лидара. Важным фактором, учитываемым при съемке с помощью БПЛА-лидара на малых высотах полета с большим углом обзора, является то, что плотность точек вдоль отдельных стволов и ветвей сильно различается из-за имеющейся окклюзии и особенностей рельефа, которые влияют на угол зенита датчика относительно земли. Изменчивость плотности точек еще больше возрастает из-за мешающих факторов, связанных с летными характеристиками, такими как высота и скорость полета БПЛА, а также скорость ветра. Поэтому был представлен новый восходящий алгоритм сегментации деревьев, достаточно надежный при использовании фиксированного набора постоянных значений параметров для сегментации данных БПЛА-лидара [Individual tree detection and crown delineation from unmanned aircraft system (UAS) LiDAR in structurally complex mixed species eucalypt forests, 2021].

Чтобы преодолеть трудности, связанные с сильно изменяющимся распределением плотности точек вдоль вертикального профиля полого и в пространстве, была вначале применена процедура кластеризации водоразделов

к горизонтальным срезам точек. В этом новом подходе к определению водораздела использована плотность точек, а не высота полога. Каждый сегментированный кластер определен на основе показателя плотности, относящегося к ближайшему окружению и находящегося в пределах определенного диапазона высот среза, который, соответственно, учитывает изменчивость плотности точек в горизонтальном и вертикальном пространстве [Individual tree detection and crown delineation from unmanned aircraft system (UAS) LiDAR in structurally complex mixed species eucalypt forests, 2021].

Попытка использовать кластеризацию на основе условных евклидовых расстояний [Bottom-up delineation of individual trees from full-waveform airborne laser scans in a structurally complex eucalypt forest, 2016] для объединения кластеров водораздела на основе вертикальной связи оказалась безуспешной вследствие сложной структуры смешанных эвкалиптовых насаждений. В лесах с густыми наклоненными стволами подход, использованный ранее [Bottom-up delineation of individual trees from full-waveform airborne laser scans in a structurally complex eucalypt forest, 2016], увеличивал ошибку пропуска при применении больших окон поиска (т. е. большого евклидового порогового расстояния - EDT) и увеличивал ошибку завышения при использовании небольших окон поиска, в то время как анализ главных компонент (РСА) учитывал наклоны ствола и ветвей, чтобы обеспечить более целенаправленное окно поиска с небольшим EDT. Процедура РСА была важным дополнением к алгоритму, поскольку EDT представлял высокочувствительный параметр, который должен быть как можно меньше при использовании алгоритма, обладающего пространственной информацией о структуре полога [Individual tree detection and crown delineation from unmanned aircraft system (UAS) LiDAR in structurally complex mixed species eucalypt forests, 2021].

Основная проблема, связанная с процедурой РСА, заключалась в том, что она чувствительна к выделяемым кластерам водоразделов, которые присваиваются неправильной морфологии ветвей, и это влияет на прогнозируемую траекторию стволов и ответвлений для срезов, расположенных выше исследуемого среза. Процедура РСА также затруднена для относительно горизонтальных ветвей, поскольку вычисленное местоположение окна поиска может находиться далеко от исследуемой ветви. По этой причине было необходимо исправлять допущенные ошибки, используя процедуру подключения вокселей. Разрешение вокселей ($VR = 0,2$ м) является очень чувствительным параметром модели. Чтобы сохранить информацию в густом насаждении, он должен быть небольшим, и это было достигнуто путем ограничения связности вокселей с помощью рамок [Individual tree detection and crown delineation from unmanned aircraft system (UAS) LiDAR in structurally complex mixed species eucalypt forests, 2021].

При всей экономичности предложенной системы моделирования основное ее ограничение заключается в том, что деревья с относительно низкой плотностью точек вдоль стволов могут быть пропущены. Например,

на рис. 100 красным цветом показаны пропущенные воксели низкой плотности (VE). На рис. 100, *а* изображен древостой высокой густоты с небольшими пропущенными деревьями с низкой плотностью вокселей вдоль стволов. На рис. 100, *б* показан древостой низкой густоты с пропущенным стволом (под номером 5 212), который имеет низкую плотность вокселей VE вдоль профиля ствола.

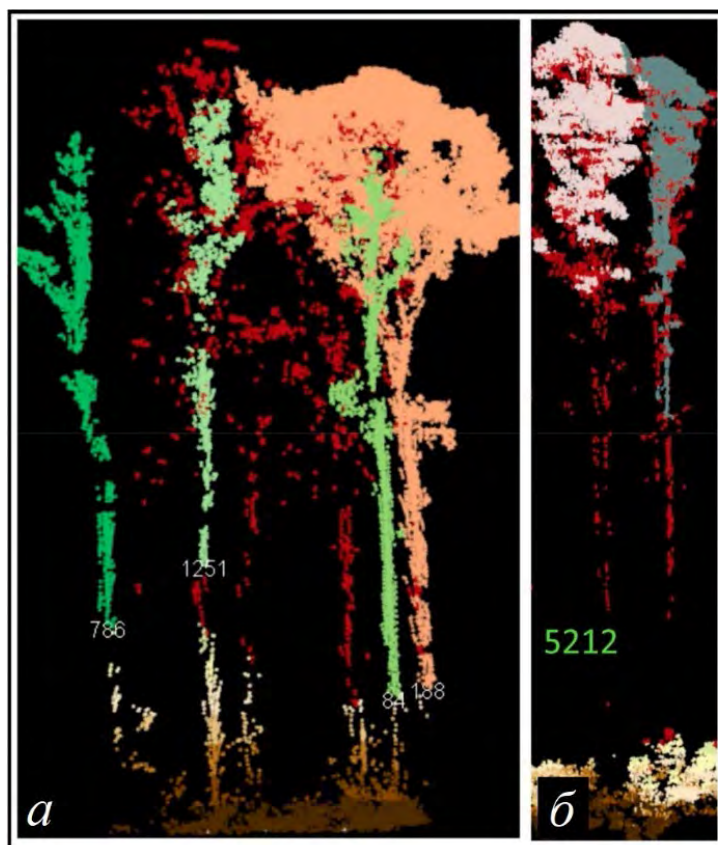


Рис. 100. Примеры пропущенных деревьев из-за низкой плотности точек (выделены красным) вдоль стволов: *а* – небольшие пропущенные деревья эвкалипта в густом насаждении; *б* – насаждение низкой густоты с деревьями высотой 70 м (дерево 5 212 пропущено). Нижний ярус представлен в цветовой гамме от коричневого до кремового, а остаточные воксели (VE) показаны красным [Individual tree detection and crown delineation from unmanned aircraft system (UAS) LiDAR in structurally complex mixed species eucalypt forests, 2021]

Таким образом, для прогнозирования густоты деревьев как ключевого параметра, необходимого для оценки суммарного испарения при лесном гидрологическом моделировании, на 39 тестовых участках смешанных высокоствольных эвкалиптовых насаждений на юго-востоке Австралии были собраны данные сканирования БПЛА-лидара. Сложные структурные характеристики эвкалиптовых насаждений с наклонными стволами и переплетающимися кронами, а также уникальное распределение плотности точек БПЛА-лидара обусловили необходимость нового подхода к оконтуриванию

деревьев и их крон в пологе. Чтобы сначала стратифицировать профиль полога и вычленив из него нижний ярус, был предложен новый восходящий алгоритм сегментации на использовании показателя плотности ядра. Полог над нижним ярусом расчленялся горизонтальными срезами с последующим применением процедуры кластеризации морфологического водораздела по точечным показателям плотности в пределах каждого среза. Затем был применен анализ основных компонентов (РСА) для кластеризации стволов и ветвей между срезами, за которым последовала процедура воксельного связывания, группирующая фрагментированные скопления крон. Эффективность модели оценивалась по 2 790 местоположениям деревьев, измеренным в полевых условиях, и в результате был получен средний показатель *F-score*, равный 0,91, учетная густота составила в среднем 94 % от фактической, а доля числа стволов с истинно положительным результатом сегментации (*TP*) на всех участках составила 85 %. На основе предложенного алгоритма повышенный уровень структурной детализации насаждений, получаемый с помощью БПЛА-лидара, может быть применен для оценки густоты в смешанных многоярусных насаждениях. Высокая детализация БПЛА-лидара обладает значительным потенциалом для оценки экосистемных функций на уровне лесного участка, которую можно масштабировать до уровня ландшафта, дополнительно используя как аэрофотосъемку, так и спутниковые данные [Individual tree detection and crown delineation from unmanned aircraft system (UAS) LiDAR in structurally complex mixed species eucalypt forests, 2021].

2.5. Оценка биомассы деревьев по лазерным метрикам

В смешанных насаждениях Южной Африки на 30 пробных площадях, каждая размером 0,071 га, были проведены измерения надземной биомассы всех деревьев и их структурных переменных с GPS-привязкой каждого дерева. С помощью бортового лидара были оценены площадь горизонтальной поверхности кроны (далее – площадь кроны) и максимальная высота дерева, а непосредственно на пробных площадях измерены диаметр стволов на высоте груди, высота дерева и базисная плотность древесины. Были рассчитаны по названным независимым переменным значения биомассы деревьев и сопоставлены с фактическими значениями, полученными в результате их сплошной рубки [Colgan, Asner, Swemmer, 2013]. Результаты сопоставления двух вариантов оценки биомассы показаны на рис. 101.

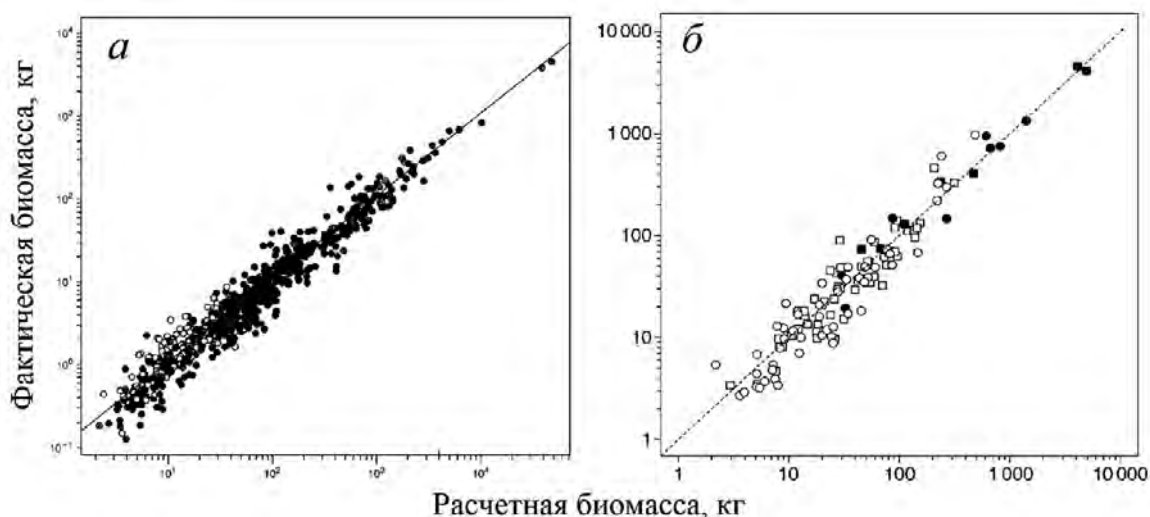


Рис. 101. Соотношение фактической биомассы, измеренной на пробных площадях, с расчетной биомассой, оцененной по двухфакторным моделям, рассчитанным: *а* – по фактическим замерам диаметра ствола, высоты дерева и базисной плотности древесины ($R^2 = 0,98$); *б* – по лидарным метрикам, представленным площадью кроны и верхней высотой дерева ($R^2 = 0,88$) [Colgan, Asner, Swemmer, 2013]

Меньшая адекватность модели (рис. 101, *б*), по сравнению с (рис. 101, *а*), авторы объяснили тем, что: 1) в модели (рис. 101, *а*) учтено 707 деревьев против 62 деревьев в модели (рис. 101, *б*); 2) в модели (рис. 101, *а*) использован диаметр ствола, а в модели (рис. 101, *б*) – размер кроны, обладающий меньшей объяснительной способностью, по сравнению с диаметром ствола; 3) в модели (рис. 101, *а*) учтено варьирование базисной плотности по породам, в отличие от модели (рис. 101, *б*), где базисная плотность не учтена.

Однако оценки биомассы на единице площади на основе названных моделей показали, что точность биомассы, оцененная на 1 га по моделям, рассчитанным по лидарным метрикам, не уступает точности биомассы, рассчитанной по независимым переменным, измеренным наземным способом. Определение биомассы путем сплошной рубки деревьев обеспечивает необходимый стандарт, с которым можно сравнить косвенные методы оценки биомассы. Полученные результаты относятся к лесным сообществам открытой структуры, и при исследовании сомкнутых насаждений могут возникнуть проблемы с идентификацией высоты отдельных деревьев и площади крон вследствие взаимного перекрытия [Colgan, Asner, Swemmer, 2013].

Выводы по главе 2

Разбиение горизонтальной проекции лесного полога на составляющие его проекции крон связано с процедурой сегментации. Сегментация изображения представляет область компьютерного зрения, включающую в себя

разбиение изображения на множество составляющих его областей. Сегментацию отдельных деревьев с помощью воздушного (бортового, БПЛА) лидарного сканирования связывают с двумя подходами в зависимости от применяемой модели: это сегментация деревьев по растровой модели высоты полого и непосредственно по лазерному облаку точек.

Первый подход основан на построении растровой модели высоты полого насаждения по облакам точек с последующей сегментацией крон деревьев. Сегментация крон на основе модели высоты полого выполняется несколькими методами. Из них были рассмотрены три, наиболее распространенных: локальных максимумов, «растущей зоны» и морфологического водораздела.

Сегментация по алгоритму локальных максимумов на испытательном полигоне на юге Швеции в насаждениях ели европейской, сосны обыкновенной и березы повислой объяснила 98 % изменчивости высот деревьев и 58 % изменчивости диаметров крон, полученных в полевых условиях. Сегментация крон в насаждениях разного видового состава на юго-востоке США по названному методу с переменным размером окна показала, что вероятность обнаружения дерева зависела от его относительной высоты и расстояния до ближайшего дерева и составила 71 % от всех деревьев на пробных участках.

Сегментация по алгоритму «растущей зоны» в хвойных насаждениях на испытательном полигоне Калккинен в Финляндии выявила наличие стандартной ошибки определения высоты деревьев 1,8 м (9,9 %), меньшей, в сравнении с традиционной наземной оценкой. В ельниках Норвегии, согласно названному алгоритму, доля корректно обнаруженных деревьев по 1, 2, 3 и 4 классам Крафта составила соответственно 93, 63, 38 и 19 %. В целом, установлено, что предложенный метод лазерной оценки занижает высоту лидирующих и завышает высоту подчиненных деревьев. Значит, при высокой (86 %) объяснительной способности лазерных оценок высоты дерева объяснительная способность лазерных оценок ширины кроны и высоты основания кроны существенно ниже – соответственно 27 и 1 %.

Сегментация по алгоритму морфологического водораздела, контролируемая маркерами, позволяет частично избежать проблемы избыточной сегментации. Сравнение результатов сегментации с эталонными деревьями показало, что идентифицированы правильно около 87 % деревьев дугласии и около 62 % деревьев граба. При сегментации крон дуба синего (*Quercus douglasii* H. & A.) в Калифорнии по тому же методу было выяснено, что ключевую роль в разделении изображения на значимые объекты играют формы маркеров и функции сегментации, и показано, что точность обнаружения деревьев составила 64,1 %. В естественных насаждениях Канады по названному алгоритму были оконтурены правильно около 73 % крон деревьев смешанного породного состава, 69 % хвойных деревьев и 65 % лиственных деревьев.

В целом, при сегментации деревьев по растровой модели высоты полага результаты обнаружения в хвойных насаждениях лучше, чем в лиственных, но остаются проблемы при обнаружении очень мелких и угнетенных деревьев. При использовании растровой модели на точность сегментации влияет неопределенность, вносимая методом интерполяции, и при этом не используются преимущества полной трехмерной структуры, присущей лидарному облаку точек.

Второй подход, основанный на сегментации деревьев непосредственно по лазерному облаку точек, в значительной степени лишен недостатков первого. Различают нисходящий (*top-to-bottom*) и восходящий (*bottom-to-top*) методы сегментации профиля деревьев. Согласно нисходящему методу, выполняется последовательная сегментация отдельных деревьев из облака точек при использовании относительного расстояния между деревьями. Деревья сегментируются на основе порогового значения расстояния (фиксированного или адаптивного), правила минимального расстояния и горизонтальной проекции формы кроны. В смешанных хвойных насаждениях США доля правильно идентифицированных деревьев составила при низкой густоте 86 %, а при высокой – от 71 до 74 %. Восходящий метод оконтуривания деревьев основан на информации об интенсивности сканирования, полученной из облака точек лидара, и на сегментации деревьев в зависимости от относительного расстояния между точками облака. В дубово-березовых насаждениях США доля правильно идентифицированных деревьев составила в среднем 84 %, что практически совпадает с показателями точности нисходящего алгоритма, реализованного в хвойных насаждениях. Однако наличие подлеска на участках сильно влияет на получаемый результат.

На примере густых смешанных насаждений с сомкнутым пологом в США было выполнено сравнение точности существующих методов сегментации деревьев и установлено, что общая точность варьировала от 51 до 59 %, а точность на уровне участка – от 27 до 90 % и в значительной степени зависела от доли хвойных пород в составе. В целом, расхождения в точности оконтуривания крон обусловлены различиями в их архитектуре, а не методами сегментации лидарных данных. Даже при настройке параметров ни один из методов не обеспечил точности выше 51–59 %. Сравнительный анализ методов в лесах субтропического муссонного климата на юге Китая с участием в составе лесов как хвойных, так и лиственных пород, в том числе с наличием нижнего яруса, показал варьирование точности обнаружения деревьев от 86 % на участках простой морфоструктуры до 62 % на участках сложной структуры. В лиственных насаждениях на северо-востоке Китая установлено, что сегментация данных БПЛА-лидара объяснила изменчивость высот, измеренных в полевых условиях, в облиственном, безлиственном состояниях и в сопряженном их варианте соответственно на 77, 83 и 87 %.

Вышеизложенные методы сегментации были основаны на анализе облаков точек, фиксирующих отражения лазерных импульсов от поверхности полога и от земли, а структура профиля полога не исследовалась. Поскольку реальные насаждения часто представлены сложными многоярусными структурами, для их анализа более перспективно применение полноволновых лидаров. Идентификация лиственных и хвойных деревьев по данным полноволнового лидара составила от 93 до 95 %, что существенно выше результата использования данных о первом/последнем импульсе (80 %). Предложенный метод кластерного анализа оказался полезным для фильтрации и выделения нижнего яруса под пологом насаждения. Применение полноволнового лидара позволяет одновременно сегментировать вертикальные и горизонтальные структуры лесного полога. Вследствие сложной структуры лесного полога применен многомасштабный подход, при котором моды вычисляются с использованием адаптивной полосы пропускания ядра, оптимизированной для напочвенного покрова, подлеска и верхнего яруса. В хвойных насаждениях итальянских Альп в наборе данных с высокой плотностью сигналов была получена более высокая частота обнаружения (97,2 %), чем в наборе данных с низкой плотностью (92,2 %), благодаря лучшей характеристике трехмерной структуры насаждения.

Описанные методы оконтуривания деревьев касались данных, полученных бортовыми лидарами. Хотя плотность сигналов при бортовом лидарном сканировании обычно ограничена 10 точками/м², миниатюризация датчиков и быстроразвивающиеся технологии, связанные с беспилотными летательными аппаратами (БПЛА), позволили увеличить плотность точек лидара на два порядка. Сегментация данных полноволнового БПЛА-лидара в густых эвкалиптовых насаждениях смешанного породного состава с различным вертикальным разделением нижнего, среднего и верхнего ярусов, а также деревьев с беспорядочно наклоненными стволами и крайне неравномерной переплетенной структурой кроны, показала, что доля числа стволов с истинно положительным результатом сегментации на всех участках составила в среднем 85 %, с варьированием от 35 до 100 %. Повышенный уровень структурной детализации насаждений, получаемый с помощью БПЛА-лидара, может быть применен для оценки густоты в смешанных многоярусных насаждениях. Высокая детализация полога БПЛА-лидаром обладает значительным потенциалом при оценке экосистемных функций на уровне лесного участка, которую можно масштабировать до уровня ландшафта.

Оценки биомассы на единице площади на основе аллометрических моделей показали, что точность биомассы, оцененная на 1 га по моделям, рассчитанным по лидарным метрикам, не уступает точности биомассы, рассчитанной по независимым переменным, измеренным наземным способом.

Определение биомассы путем сплошной рубки деревьев обеспечивает необходимый стандарт, с которым можно сравнить косвенные методы оценки биомассы. Полученные результаты относятся к лесным сообществам открытой структуры, и при исследовании сомкнутых насаждений могут возникнуть проблемы с идентификацией высоты отдельных деревьев и площади крон вследствие взаимного перекрытия.

ГЛАВА 3. НАЗЕМНАЯ ЛАЗЕРНАЯ ОЦЕНКА МОРФОСТРУКТУРЫ И БИОМАССЫ ДЕРЕВЬЕВ

Наземная лазерная оценка морфоструктуры и биомассы деревьев включает в себя сканирование диаметра ствола и его сбега, архитектурный анализ деревьев на языках кодирования, алгоритм автоматической сегментации деревьев и крон полога, идентификацию древесных видов по текстуре коры, оценку квалиметрических показателей древесины и биомассы деревьев по лазерным метрикам.

3.1. Оценка диаметров и сбега ствола дерева

Лазерное сканирование открывает новые возможности в лесном деле. Быстрый сбор данных с высоким разрешением и точностью позволяет получать стандартную информацию о лесных насаждениях, а также параметры, описывающие такие характеристики деревьев, как диаметр ствола, сбег, количество ветвей и т. д. Набор необработанных отсканированных данных содержит большое количество точек. Каждая точка сканирования относится к одному из отраженных объектов, таких как земля, ствол или крона дерева. Для изучения параметров этих объектов необходима классификация точек сканирования. Кроме того, в наборе исходных данных содержится большое количество неверных точек. По этой причине поэтапное разделение начинается с предварительной фильтрации необработанного облака точек. Для получения искомых параметров в результирующем наборе данных используется несколько методов (рис. 102).

В Германии было проведено исследование диаметров и сбега ствола деревьев на основе датчика сканера *IMAGER 5003*, определяющего расстояния до объекта по фазовому сдвигу непрерывной волны [Aschoff, Thies, Spiecker, 2004]. Принцип измерения расстояний лазером непрерывного действия по фазовому сдвигу волны был изложен ранее [Усольцев, 1998]. Пробные площади были отсканированы с разных точек обзора. Расстояние между позициями сканеров составляло 10 и 15 м. Это гарантировало, что зоны различных сканирований будут перекрываться. Для регистрации облаков точек применены искусственные мишени, которые также использованы для привязки площадей сканирования к национальной системе координат Германии. Каждое отсканированное облако точек модифицировано в тахеометрической системе с помощью преобразования шести параметров. В качестве мишеней использованы бумажные листы формата А4. Максимальное расстояние от сканера до мишени, на котором можно точно определить ме-

стоположение центра мишени, ограничено 20 м. Поэтому область за пределами этого расстояния являлась экстраполируемой. Остаточные ошибки регистрации наиболее велики в экстраполированных областях. В частности, эта проблема проявлялась в верхней части стволов и крон деревьев. Чтобы свести ее к минимуму, мишени устанавливались на более высоком уровне над землей. Из-за рискованной досягаемости расстояние обзора в вертикальном направлении часто выходило за пределы максимального диапазона обзора расстояний до мишеней.

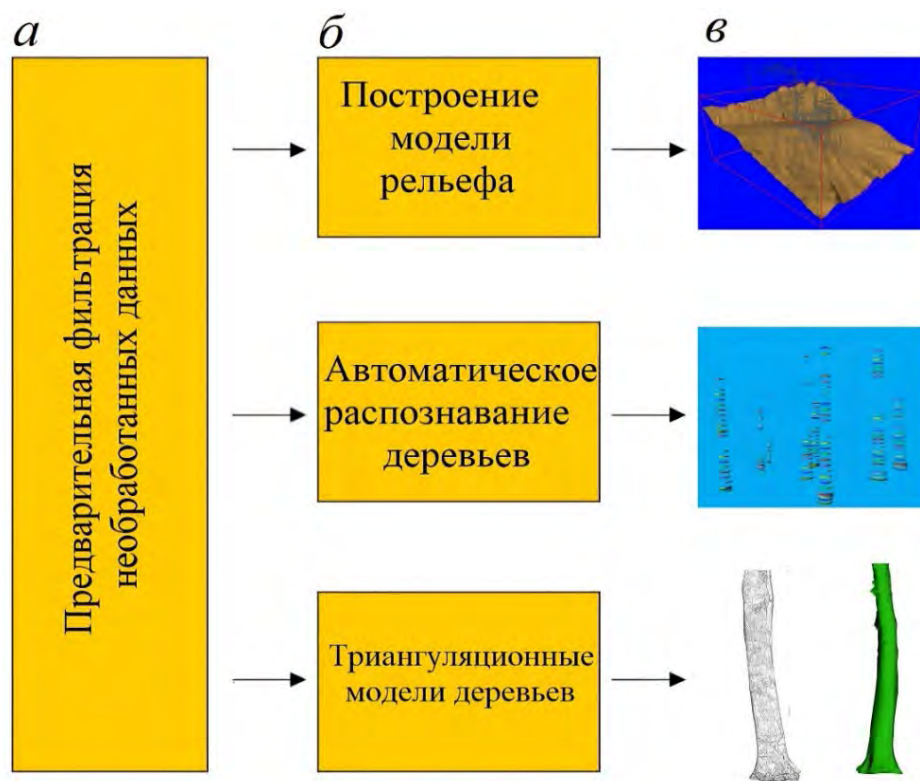


Рис. 102. Последовательность обработки данных лазерного сканирования в лесном насаждении: *а* – необработанные данные, полученные с помощью лазерного сканера, отображаются в виде изображения диапазона и интенсивности, а также в 3D-формате; *б* – поэтапное разделение облака точек с помощью фильтров; *в* – извлеченные параметры и модели [Aschoff, Thies, Spiecker, 2004]

Из-за проблемы неоднозначности облако необработанных точек содержало большое количество неправильных точек. Однако дальние обнаруженные точки имели меньшую интенсивность, по сравнению с ближними. По этой причине большинство отраженных точек за пределами интервала неоднозначности имели низкую интенсивность. Эта разница в интенсивности использована в качестве исходного фильтра путем определения минимального порогового значения интенсивности. Другой причиной появления неправильных точек являлось расхождение лазерного луча. Даже при диаметре следа 3 мм на расстоянии 1 м и расхождении луча 0,22 мрад лазерный

луч отражался на разных расстояниях от кромок. Часть луча отражалась на переднем плане, а другая – на заднем. Вычисленная точка сканирования находилась примерно посередине [Staiger, Ettel, 2003]. Для устранения этих неправильных точек использованы направление сканирования и направление между соседними точками. Каждая точка сканирования проверялась на наличие угла между направлением на сканер и восемью соседними пикселями. Точки сканирования с углом, превышающим 170° по отношению как минимум к одному соседнему пикселю, отфильтровывались. Для удаления изолированных точек использован другой фильтр. Точка считалась изолированной, если на изображении диапазона (*range image*) не было соседнего пикселя на расстоянии менее 1 м.

Чтобы генерировать цифровую модель рельефа (DTM) из необработанных облаков точек, из всего облака выделялся дополнительный набор данных, включающий только точки рельефа местности. Чтобы получить эти точки привязки, на пробной площади натягивалась сетка с размером ячеек 50×50 см. В каждой ячейке сетки выбиралась ордината с наименьшим значением Z , которая предварительно задавалась в качестве точки привязки. Однако не все ячейки сетки содержали точки сканирования на земле. Из-за наличия кустарников и окклюзии деревьев имелось довольно много ячеек без каких-либо точек сканирования или с точками сканирования, которые не являлись частью рельефа местности (рис. 103, *а*), и эта проблема связана не только с густотой деревьев, но и с уклоном рельефа. Для фильтрации точек, которые не принадлежат земле, использовано несколько фильтров. В качестве исходного фильтра устанавливалось максимальное значение Z -ординаты и точки выше него удалялись. Другой фильтр проверял наличие исключающего конуса вокруг центра сканера с заданным углом. Точки сканирования внутри конуса также исключались из набора наземных точек.

Оба метода позволяют устранить большое количество ошибок. Однако был по-прежнему необходим визуальный тест при ручной коррекции. Точки, которые явно не относились к поверхности рельефа, удалялись из набора данных с помощью функции стирания в 3D-режиме (рис. 103, *б*). Наконец, точки рельефа сопоставлялись с треугольной нерегулярной сеткой (TIN) с помощью триангуляции Делоне. Размер сетки 50×50 см для выбранных точек рельефа был слишком велик для однородной поверхности. По этой причине результирующая форма имела больше треугольников, чем необходимо. Поэтому треугольная сетка автоматически сокращалась в зависимости от углового отклонения соседних областей. Заданное отклонение угла определяет, какие треугольники подлежат объединению.

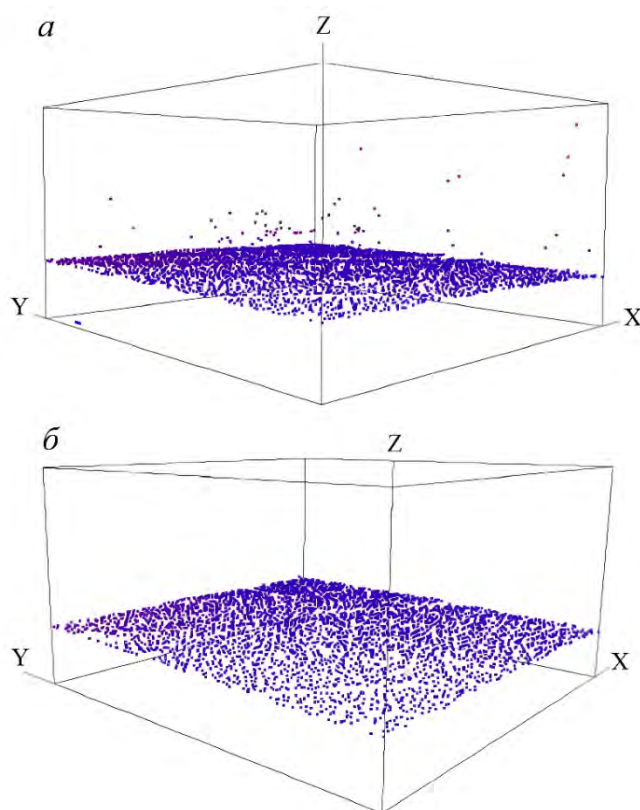


Рис. 103. Для извлечения цифровой модели рельефа местности (DTM) применен стандартный растровый формат: *а* – предварительно отфильтрованные наземные точки с использованием обычного растра размером 30×30 м и сетки размером 50×50 см; *б* – результирующие отфильтрованные наземные точки, полученные в результате интерактивной коррекции [Aschoff, Thies, Spiecker, 2004]

Для стандартного анализа лазерных данных необходим автоматический процесс локализации деревьев, который выполняется методом их идентификации с помощью преобразования Хафа [Pitas, 2000; Automatic determination of forest inventory parameters using terrestrial laser scanning, 2003]. В горизонтальном слое, вырезанном из отсканированного облака точек, сечение ствола дерева отображается в виде окружности или ее части. Чтобы вырезать слои из деревьев на заданном уровне рельефа, они должны находиться на изохронном расстоянии от него. Для этого использована модель поверхности рельефа. Даже при использовании методов фильтрации для устранения неправильных точек в необработанных данных на результат обработки отдельного слоя также влияли ошибки и артефакты. Для получения достоверной информации о деревьях слои вырезались на разных уровнях, а результаты обработки слоев на разных уровнях затем объединялись с целью улучшения результатов. Имеет значение также сбег ствола, который анализировался с использованием разных слоев. Толщина слоев составляла 10 см, они расположены в диапазоне высот от 1 до 20 м над землей. Особый интерес представлял диаметр на высоте 1,3 м над землей. Для правильного получения этого значения извлекались дополнительные слои на высоте 1,2 и 1,4 м (рис. 104).

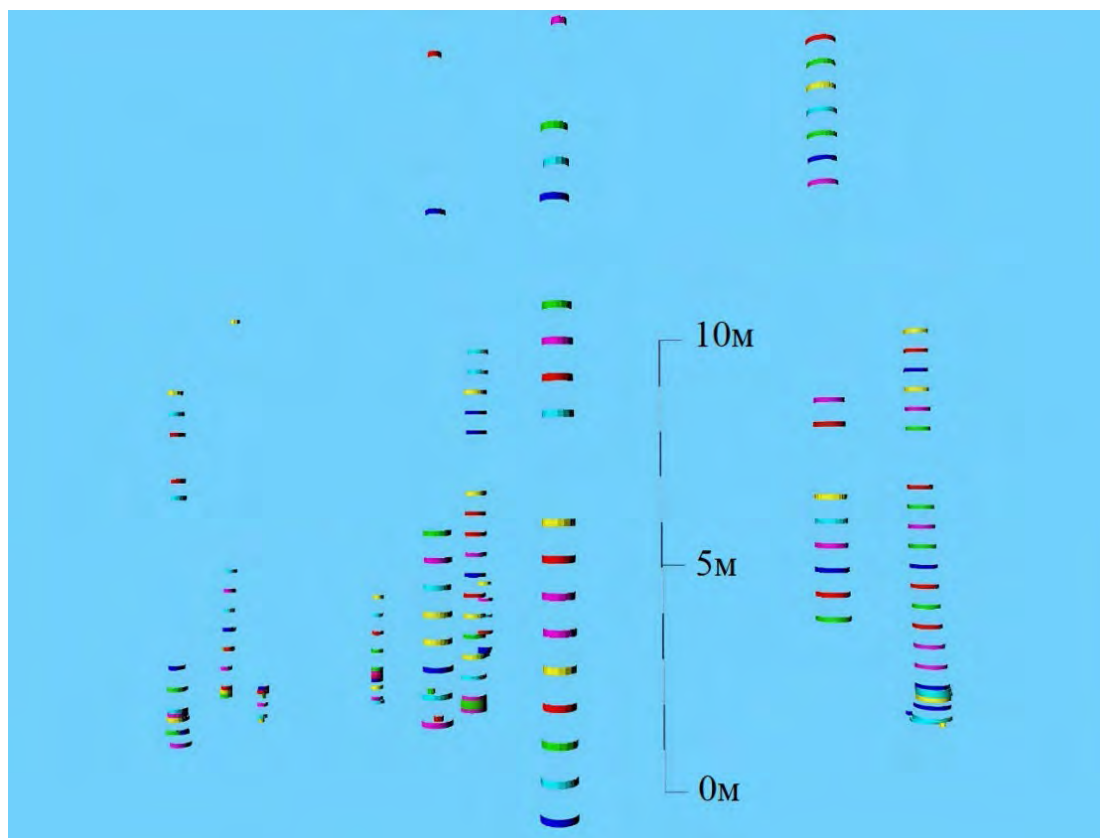


Рис. 104. Идентификация кругов стволов по слоям толщиной 10 см в перспективе [Aschoff, Thies, Spiecker, 2004]

Чтобы использовать стандартные методы распознавания образов, слои регистрировались обычным растром с размером ячейки 1×1 см. Для обнаружения кругов (соответствующих сечениям ствола) на этом растровом изображении использовалось преобразование Хафа, для которого требуется заданный диаметр. Поскольку диаметр неизвестен до запуска алгоритма, вводилось исходное значение диаметра, равное 100 см, с последующим уменьшением диаметра с шагом в 10 см. В результате положения стволов и их диаметры имели низкую точность, и для повышения ее применен алгоритм аппроксимации точек окружностью (*circle approximation*)⁹. Определенный круг Хафа расширялся на 10 %, чтобы обеспечить идентификацию всех пикселей, которые могли быть частью ствола. Для точного определения окружности на выбранных пикселях использован алгебраический алгоритм, который минимизирует алгебраическое расстояние между точками контура и результирующей окружностью.

⁹ Данная сборка содержит функции для аппроксимации точек окружностью и линиями. Может быть полезной для определения центров окружностей, их диаметров, а также линий при избыточных данных.

Не все обнаруженные круги представляли собой сечения ствола дерева, некоторые являлись результатом проявления шумовых точек или точек сканирования кустарников и крон деревьев. Для устранения «шумовых» кругов использован пошаговый метод. На первом этапе исследовано положение и размеры нижней 7-метровой части деревьев. Все обнаруженные окружности накладывались друг на друга. Окружности, которые принадлежали одному и тому же сечению, являлись окружностями одного и того же дерева. Чтобы уменьшить количество ошибок, было необходимо как минимум пять окружностей на одном сечении. На втором этапе исследовалась верхняя часть деревьев высотой более 7 м. Поскольку ветви практически не влияли на распознавание, в верхней части были использованы только круги, чтобы определить положение уже обнаруженных деревьев. Для этого использовано то же преобразование Хафа и алгоритм аппроксимации точек окружностью (*circle approximation*), что и на первом шаге.

Точная модель ствола дерева создана путем триангуляции его поверхности. Для триангуляции точки объекта были отделены от полного облака точек. Для выделения деревьев в облаке точек использовано несколько комбинированных методов. Исходное облако точек фильтровалось для устранения ложных точек из-за проблемы неоднозначности и расхождения лазерного луча. В результирующем изображении диапазона (*range image*) было устранено большинство ошибок. Чтобы выделить отдельный ствол дерева, был использован метод «растущей зоны». Наконец, посредством интерактивного мониторинга обрабатывались данные с помощью инструментов селекции. Для создания всеобщей модели дерева требовалось как минимум два ракурса. Чтобы свести к минимуму ошибки в тангенциальной области облаков точек, обычно использовалось три или четыре ракурса дерева. Облако точек одного дерева с четырьмя ракурсами достигало величины до 800 000 точек (рис. 105, а). Для обеспечения хорошей триангуляции столь большое количество точек сканирования сокращалось, и обычно для ствола дерева длиной 8 м использовалось около 50 000 точек (рис. 105, б). Для триангуляции точек сканирования был применен алгоритм «силовой корки» (*power crust*) – это алгоритм, который строит поверхность на основе диаграммы Вороного [Amenta, Choi, Kolluri, 2001] (рис. 105, в). Полученная триангуляция обеспечивала высокую точность расчета объема ствола дерева.



Рис. 105. Триангуляция точек дерева с помощью алгоритмов «силовой корки»: *a* – облако точек дуба в количестве 800 000 точек; *б* – облако точек, уменьшенное до 50 000 точек сканирования; *в* – сгенерированная триангуляция [Aschoff, Thies, Spiecker, 2004]

Крона дерева предоставляет информацию о фактическом состоянии дерева как с экологической, так и с экономической точек зрения. Возможны интерактивные измерения в облаке точек, которые позволяют исследовать крону дерева. Для стандартного применения необходима автоматическая реконструкция кроны дерева, методы которой разрабатываются [Gorte, Pfeifer, 2004].

3.2. Архитектурный анализ деревьев на языках кодирования

Одной из целей архитектурного анализа является выявление эндогенных процессов роста и отделение их от пластичных реакций вследствие внешних воздействий. Он основан на изучении того, как функционирует меристема каждой оси и как устанавливаются иерархические отношения между осями. Растение представляет модульный организм, состоящий из элементарных объектов или строительных единиц, и архитектура растения обычно определяется как геометрическая и топологическая организация этих единиц. Он представляет собой выражение равновесия между эндогенными процессами роста и экзогенными ограничениями, создаваемыми окружающей средой [Barthélemy, Caraglio, 2007].

В то время как термин «архитектура растения» относится к структурному выражению процесса роста данного вида, представляется важным описать трехмерную структуру кроны или корневой системы отдельного

растения, включая как топологическое расположение компонентов растения, так и их структурные геометрические характеристики [Godin, 2000]. Представление об архитектуре растения может содержать по крайней мере один из следующих типов информации: информация о декомпозиции, описывающая состав растения из нескольких компонентов, топологическая информация, описывающая, какие компоненты связаны с другими, и отражающая понятие иерархии между компонентами ветвящейся системы, и геометрическая информация, описывающая формы и пространственное расположение компонентов, рассматриваемых независимо друг от друга. Топология растений может быть использована для решения проблем распределения ассимилятов, в то время как геометрические представления могут быть полезны для получения точных описаний поверхности растений в приложениях, изучающих взаимодействие между кроной или корневой системой и микросредой [Godin, 2000].

Как правило, архитектурный анализ легко проводится на растениях небольшого размера, которые могут быть проанализированы непосредственно. Напротив, архитектура более крупных растений может быть исследована только с помощью неинвазивных качественных наблюдений, проводимых с уровня земли, или с использованием «деструктивных» методов для получения более точного анализа данных [Barthélémy, Caraglio, 2007]. Прогресс в анализе растений с помощью наземного лазерного сканирования обеспечил возможность анализа морфоструктуры деревьев и древостоев [Automatic determination of forest inventory parameters using terrestrial laser scanning, 2003; Three-dimensional reconstruction of stems for assessment of taper, sweep and lean based on laser scanning of standing trees, 2004; Hosoi, Omasa, 2006; Henning, Radtke, 2006; Omasa, Hosoi, Konishi, 2007], а также корневых систем [Gärtner, Denier, 2006].

Несмотря на ряд исследований, данные наземных лазерных сканеров практически не использовались в сочетании с языками кодирования архитектуры растений. Эти сложные трехмерные визуализации, характеризующиеся огромными объемами данных (гигабайтами), могут быть преобразованы в стандартизированную информацию, которая затем может быть интерпретирована исследователями как значимая информация.

В Италии было предпринято исследование [Building a topological and geometrical model of poplar tree using portable on-ground scanning LIDAR, 2008] пригодности портативного наземного сканирующего лидара *IMAGER 5003* в сочетании с программами *JRC 3D Reconstructor* и *AMAPmod* для анализа основных характеристик древостоев и архитектуры деревьев в 14-летнем насаждении тополя *Populus canadensis* (Moench) и для картографирования топологии и геометрии наземных структур дерева путем объединения трехмерной цифровой информации в многомасштабные графические представления дерева (MTG) [Godin, Caraglio, 1998; Godin, Costes, Sinoquet, 1999a] с использованием программного обеспечения *AMAPmod* [Godin, Caraglio, 1998; Godin, Costes, Sinoquet, 1999a; Godin, Guedon, Costes, 1999b;

Godin, 2000]. Данные, собранные в ходе прямой таксации древостоя и «деструктивного» анализа основных архитектурных характеристик деревьев, были сопоставлены с косвенными измерениями, выполненными с использованием лидара. Этот метод позволил проанализировать вертикальную и горизонтальную структуру древостоя, оценить морфологию стволов и ветвей модельных деревьев на разной высоте полога, а также создать и проверить топологические и геометрические модели деревьев [Building a topological and geometrical model of poplar tree using portable on-ground scanning LIDAR, 2008].

В масштабе осей архитектура тополя может быть описана архитектурными элементами (ствол, ветви, отростки и короткие оси), которые составляют его архитектурную единицу как конкретное выражение архитектурной модели [Barthélémy, Caraglio, 2007]. Исследование деревьев *Populus nigra* (Linnaeus) показало, что их рост соответствует модели Рауха, а архитектура растения характеризуется моноподиальным стволом, акротонным ветвлением и ритмичным ростом [Hallé, Oldeman, Tomlinson, 1978; Barthélémy, Caraglio, 2007]. В целом, молодые деревья тополя развиваются в соответствии с архитектурной моделью, но каждый вид выражает свои особые архитектурные особенности через архитектуру осей [Building a topological and geometrical model of poplar tree using portable on-ground scanning LIDAR, 2008]. Взрослые деревья формируют крону путем реитерации, т. е. процесса архитектурной перестройки, посредством которого дерево приспосабливается к окружающей среде, полностью или частично дублируя первоначальную структуру [Hallé, Oldeman, Tomlinson, 1978]. Реитерации, как правило, предшествует архитектурная трансформация, характеризующаяся наличием разветвлений стволов и развитых ортотропных ветвей [Barthélémy, Caraglio, 2007].

В данном исследовании использована лазерная измерительная система LARA53500, способная выполнять измерения на расстоянии от 0,40 до 54 м, обеспечивая точность в миллиметровом диапазоне [Building a topological and geometrical model of poplar tree using portable on-ground scanning LIDAR, 2008]. Система основана на методе передачи модулированного лазерного излучения методом разности фаз: 1) интенсивность передаваемого лазерного излучения модулируется синусоидальным сигналом (метод непрерывной волны с амплитудной модуляцией); 2) свет, отраженный в обратном направлении от объекта, регистрируется фотодиодом. Время прохождения от датчика до объекта и обратно прямо пропорционально фазовому сдвигу между передаваемым сигналом и регистрируемым отраженным светом и зависит от частоты модуляции и дальности действия объекта. Угол расхождения луча составлял 0,22 мрад, а диаметр луча на расстоянии 1 м составлял 3 мм.

Интенсивность передаваемого сигнала модулировалась одновременно двумя различными синусоидальными частотами. Учитывая, что с помощью

простого метода определения расстояния (одиночные синусоидальные частоты) невозможно точно определить расстояние до объекта (проблема неоднозначности), использование двух различных синусоидальных частот увеличивает интервал неоднозначности (т. е. диапазон измерения) длиной до 53 м и позволяет достичь высокой точности. Приемник измеряет расстояние и коэффициент отражения одновременно, так что они непосредственно соответствуют одной точке данных в пространстве (попиксельное соответствие) [Building a topological and geometrical model of poplar tree using portable on-ground scanning LIDAR, 2008].

Измерение фазового сдвига проводилось в сверхвысоком режиме (время измерения 15 мин на 1 скан) с негауссовой случайной ошибкой менее 5 мм, постоянной на всем диапазоне сканирования. Диапазон сканирования составлял около 1 Гб в несжатом формате. Диапазон измерения прибора в два раза превышал расстояние между лазерным сканированием и верхушкой анализируемого дерева. Чтобы снизить проблему окклюзии, были проведены сканирования в безлистном состоянии и в четырех разных точках обзора вокруг каждого дерева (на расстоянии 5–10 м от ствола, чтобы обеспечить достаточную зону перекрытия) [Building a topological and geometrical model of poplar tree using portable on-ground scanning LIDAR, 2008].

Изображения отражений (рис. 106, *а*) были импортированы с использованием программного обеспечения *JRCReconstructor* версии 1, позволявшего быстро просмотреть содержимое и определить интересующую рабочую область. Затем были импортированы сканы диапазона (*range scans*), готовые к обработке. Облака точек, сгенерированные при лазерном сканировании, содержали большое количество некорректных точек. Шум был вызван проблемой неоднозначности или дивергенцией лазерного луча. В процессе фильтрации некорректные точки были автоматически идентифицированы, и отфильтрованные изображения были подвергнуты последующей обработке. Предварительная обработка была выполнена названной программой с применением набора алгоритмов для извлечения информации, необходимой при обработке результатов сканирования расстояний. Перед сканированием было позиционировано до девяти наземных контрольных целей, т. е. квадратных мишеней определенной шаблонной формы (рис. 106, *а*); при этом два перекрывающихся изображения совмещались, чтобы идентифицировать наземные контрольные цели на обоих снимках [Building a topological and geometrical model of poplar tree using portable on-ground scanning LIDAR, 2008].

Окончательная регистрация была произведена с использованием четырех предварительно зарегистрированных сканирований, доступных для каждого дерева (рис. 106, *б*); после этого этапа сканирование было преобразовано из нескольких локальных систем координат в одну глобальную систему координат. Алгоритм выполнял трехмерное преобразование путем итеративного уточнения, которое сводило к минимуму расстояние между двумя

регистрируемыми геометрическими фигурами; кроме того, он позволял регистрировать два изображения с разным пространственным разрешением, поскольку не требовал прямого сопоставления точек, обеспечивая высокоточное выравнивание сканов диапазона [Building a topological and geometrical model of poplar tree using portable on-ground scanning LIDAR, 2008].



Рис. 106. Исходные данные, полученные в результате лазерного сканирования, представлены в виде: *а* – изображения отражающих мишеней, позиционированных до измерений на участке; *б* – общего трехмерного изображения, сканирование расстояний на котором было выполнено в четырех разных точках вокруг каждого дерева; отверстия, видимые на *б*, представляют положение лазера во время сканирования [Building a topological and geometrical model of poplar tree using portable on-ground scanning LIDAR, 2008]

У 200 деревьев на площади 1 га были измерены диаметры на высоте груди и рассчитаны их высоты по ранее выведенному уравнению связи с диаметром ствола [Chiarabaglio, Coaloa, 2002]. Были срублены три типичных дерева и были измерены архитектурные характеристики ствола и ветвей; ствол и ветви были срезаны с интервалом 1 м и были измерены два ортогональных диаметра нижней части. Ствол, ветви первого и второго порядков были закодированы, а также измерены углы крепления ветвей [Building a topological and geometrical model of poplar tree using portable on-ground scanning LIDAR, 2008].

Чтобы исследовать пригодность наземного лазерного сканирования для получения значимой информации об архитектурных характеристиках древостоев и деревьев, было проанализировано трехмерное изображение древостоя, реализованное с помощью программного обеспечения *JRC 3D*

Reconstructor. Измерения поперечных сечений были проведены с использованием трехмерной модели в горизонтальных виртуальных плоскостях (20×20 м), расположенных через каждый метр, начиная с уровня земли. Исходя из этих измерений, были рассчитаны сумма площадей сечений и средняя высота древостоя. Подобно прямому измерению, архитектурные характеристики ствола и ветвей были проанализированы в трехмерной структуре, отображаемой на экране компьютера. Для измерения длины ветвей первого и второго порядка, углов крепления ветвей, 1-метровых отрезков ствола и диаметров прикрепленных ветвей на высоте до 20 м от земли были использованы сканы диапазона [Building a topological and geometrical model of poplar tree using portable on-ground scanning LIDAR, 2008].

Архитектура дерева также может быть представлена формальной моделью, называемой *многомасштабным графическим представлением дерева* (MTG) [Godin, Caraglio, 1998]. MTG представляет топологическую модель, которую можно рассматривать как набор простых графических изображений, показывающих последовательность и ветвящиеся связи между компонентами дерева и его представлениями на разных уровнях детализации – междоузлий, узлов роста, осей [Godin, Costes, Sinoquet, 1999a]. В MTG геометрия компонентов дерева, относящаяся как к их форме, так и к положению в пространстве может быть объединена с топологической информацией путем вставки в трехмерное цифровое изображение дерева [Building a topological and geometrical model of poplar tree using portable on-ground scanning LIDAR, 2008].

В данном случае «топология» деревьев была получена вручную путем разбивки на модули первого, второго и третьего порядков ветвления и путем анализа в трехмерной отображаемой на мониторе структуре существующих связей между компонентами в разных масштабах. «Геометрия» деревьев была получена путем ручной оцифровки в трехмерной отображаемой на мониторе структуре координат компонентов растения. Наконец, для создания, моделирования и анализа трехмерных виртуальных деревьев вся топологическая и геометрическая информация была закодирована в формате MTG и показана с использованием геометрического модуля *PlantGL* и графического инструментария с открытым исходным кодом [Building a topological and geometrical model of poplar tree using portable on-ground scanning LIDAR, 2008].

При сканировании древостоя регулярное расположение деревьев на плантации и безлистное состояние уменьшили проблемы, связанные с окклюзией лазерного луча. Сканы диапазона были отфильтрованы и автоматически интегрированы с помощью программного обеспечения *JRC 3D Reconstructor V. 1*. Вручную выполнялись только процессы регистрации сканов диапазона (рис. 107). Относительно большой разброс ошибок регистрации объяснялся главным образом более низким разрешением изображений и наличием нижнего яруса. В целом, с использованием инструментов, предоставляемых программным обеспечением, были определены с приемлемой точностью средний диаметр стволов, сумма площадей

сечений и высота древостоя [Building a topological and geometrical model of poplar tree using portable on-ground scanning LIDAR, 2008].

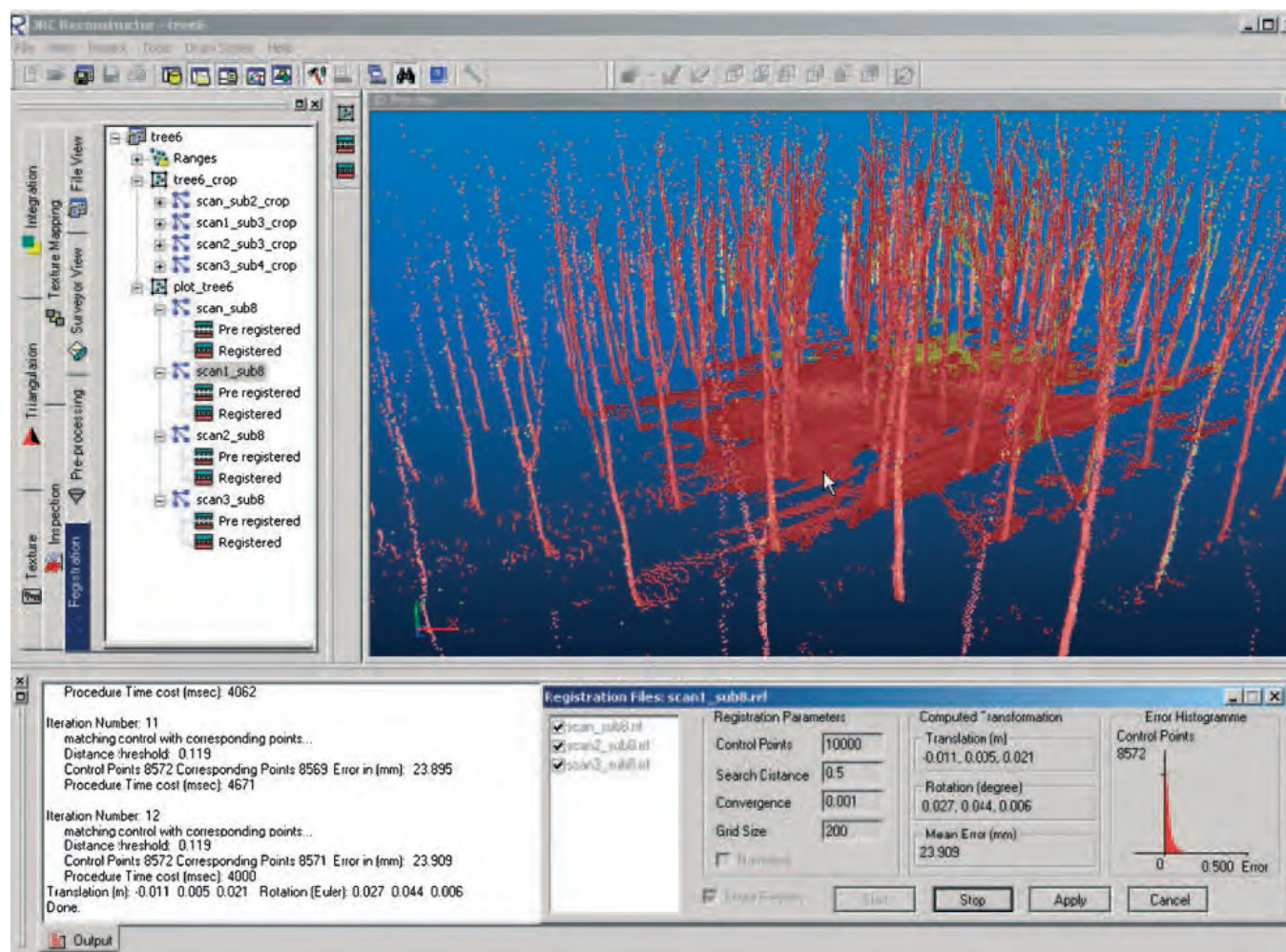


Рис. 107. Итеративный процесс регистрации ближайшей точки. Программное обеспечение *JRC 3D Reconstructor* позволяет найти трехмерное преобразование путем итеративного уточнения, которое минимизирует расстояние между двумя регистрируемыми геометрическими фигурами. Используя в качестве эталона три других предварительно зарегистрированных сканирования, изображение было зарегистрировано после 12 итераций [Building a topological and geometrical model of poplar tree using portable on-ground scanning LIDAR, 2008]

Три человека в течение двух недель непрерывно анализировали основные архитектурные характеристики трех срубленных тополей (номера 1, 5 и 6). Их диаметры ствола на высоте груди, оцененные также с помощью *JRC 3D Reconstructor*, составили соответственно 41, 25 и 29 см, а общая высота – соответственно 30, 27 и 28 м. Было обнаружено хорошее соответствие ($R^2 = 0,93$) между прямыми и косвенными измерениями диаметров отрезков ствола и ветвей (рис. 108 и 109). Косвенные измерения позволили также проанализировать архитектуру верхних частей крон деревьев. Извлеченная топологическая и геометрическая информация были закодированы в формате MTG (рис. 110). В процессе проверки геометрические модели деревьев были сопоставлены с результатами сканирования; программное обеспечение *JRC 3D Reconstructor* показало наличие ошибок в диапазоне от 10 до 20 см для ствола и от 10 до 49 см для ветвей (рис. 111).

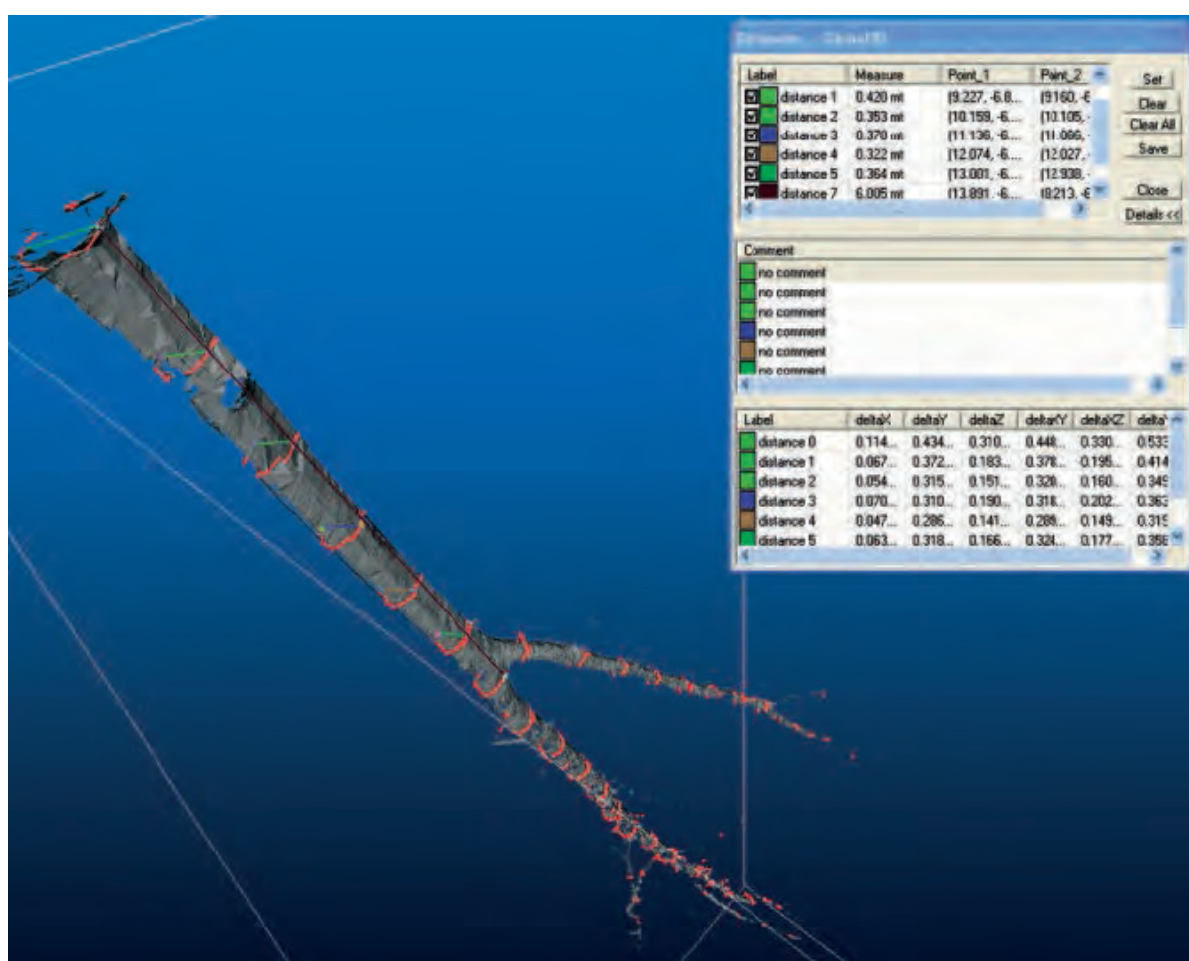


Рис. 108. Трехмерное изображение дерева и положения косвенных измерений диаметров сегментов ствола и ветвей [Building a topological and geometrical model of poplar tree using portable on-ground scanning LIDAR, 2008]

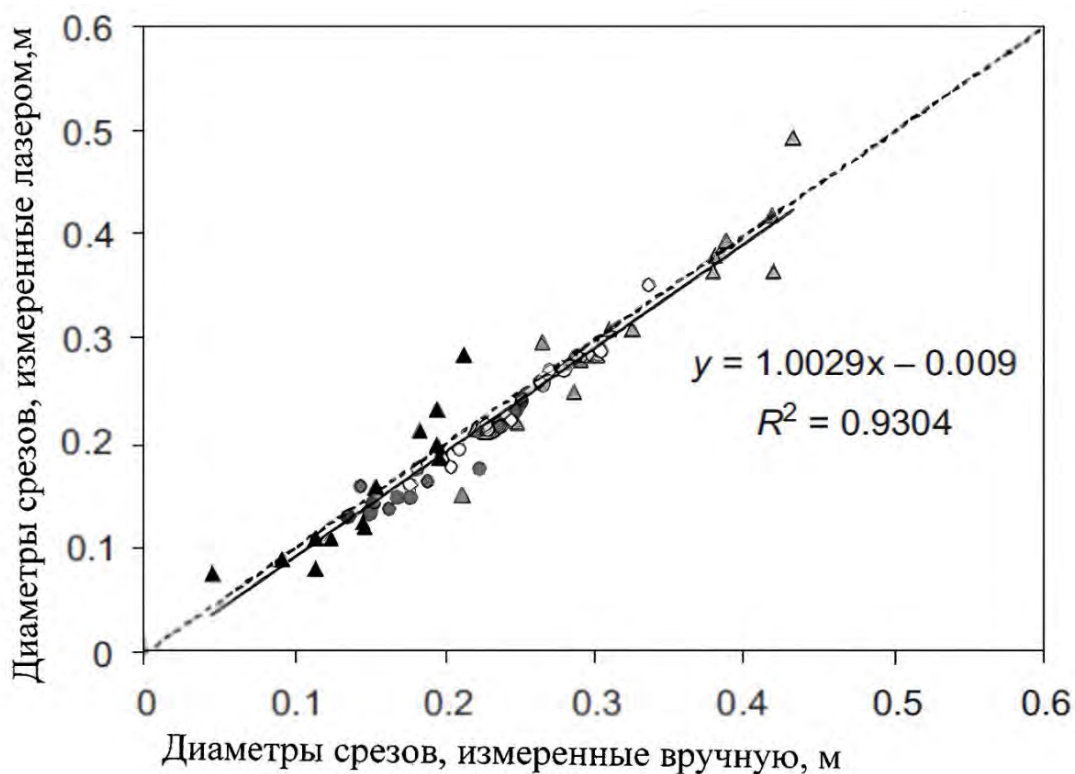


Рис. 109. Соотношение измеренных вручную и оцененных лазером диаметров срезов ствола и ветвей трех модельных деревьев [Building a topological and geometrical model of poplar tree using portable on-ground scanning LIDAR, 2008]

Таким образом, с помощью наземного лазерного сканирующего устройства, установленного на штативе, была получена информация о структуре полога 14-летних тополей в высоком разрешении. Программное обеспечение *JRC 3D Reconstructor* было весьма полезным и позволяло легко анализировать наземные лазерные сканирующие изображения. Эта методология позволила с высокой точностью исследовать структурные и архитектурные характеристики отдельного дерева и всего древостоя. Более того, используя данные дальномерного сканирования, *JRC 3D Reconstructor* и *AMAPmod*, стало возможным создавать и проверять топологические и геометрические модели (MTG) деревьев тополя [Building a topological and geometrical model of poplar tree using portable on-ground scanning LIDAR, 2008].

При многомасштабном представлении топологии и геометрии основные ограничения были связаны с качеством и полнотой данных сканирования. Хотя в нижней части полога можно было разложить оси на подкомпоненты и точно измерить форму и положение компонентов деревьев, в верхней части полога исходные данные сканирования были неполными, поэтому была применена другая стратегия аппроксимации для оцифровки систем ветвления, включающая фиксацию только конечности двух главных осей [Building a topological and geometrical model of poplar tree using portable on-ground scanning LIDAR, 2008].

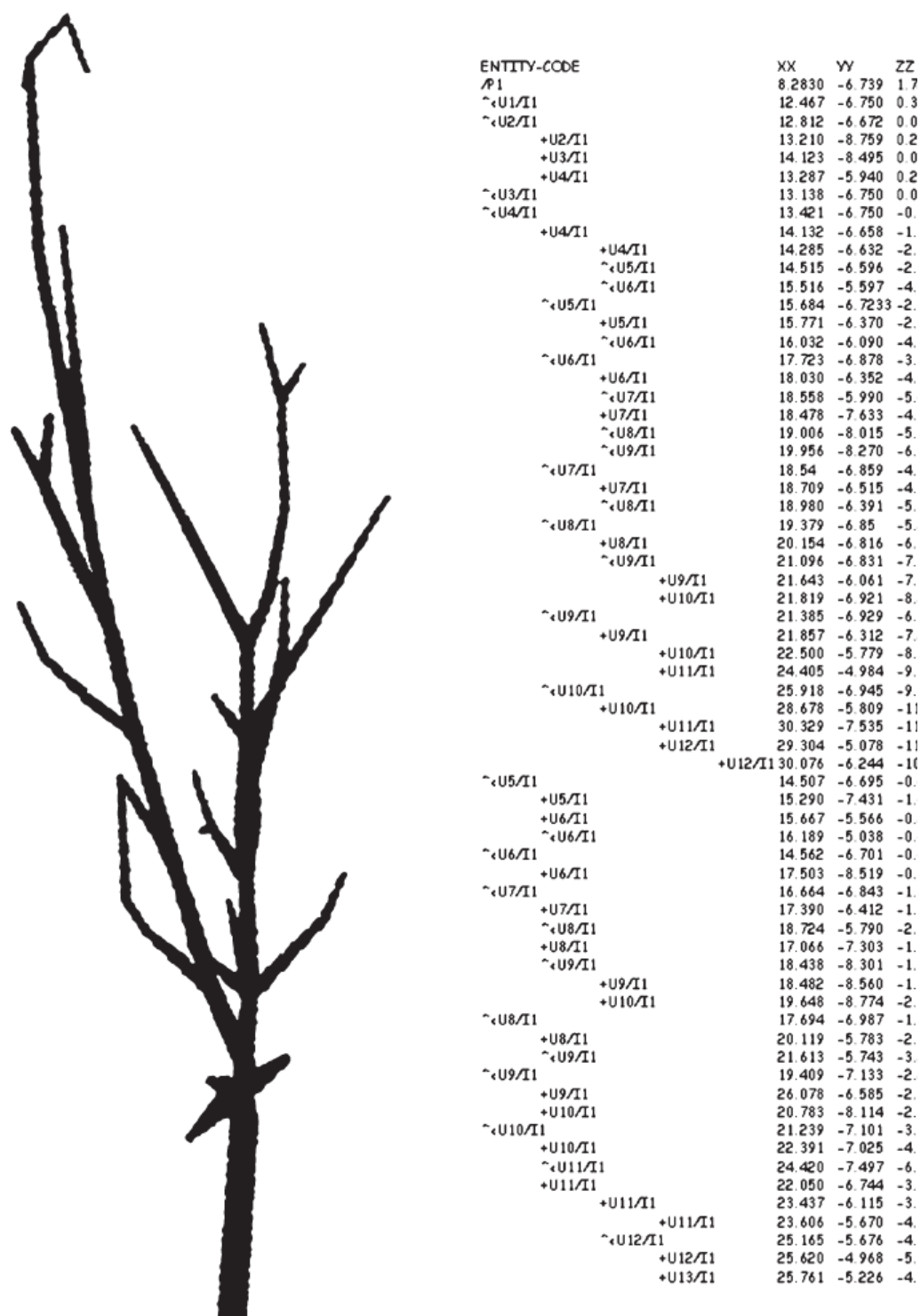


Рис. 110. Геометрическая модель дерева, созданная с помощью программного обеспечения *AMAPmod*; координаты X–Y–Z, размер и порядок ветвления каждого сегмента были закодированы в строках с использованием формата многомасштабного графического представления дерева (MTG) [Building a topological and geometrical model of poplar tree using portable on-ground scanning LIDAR, 2008]

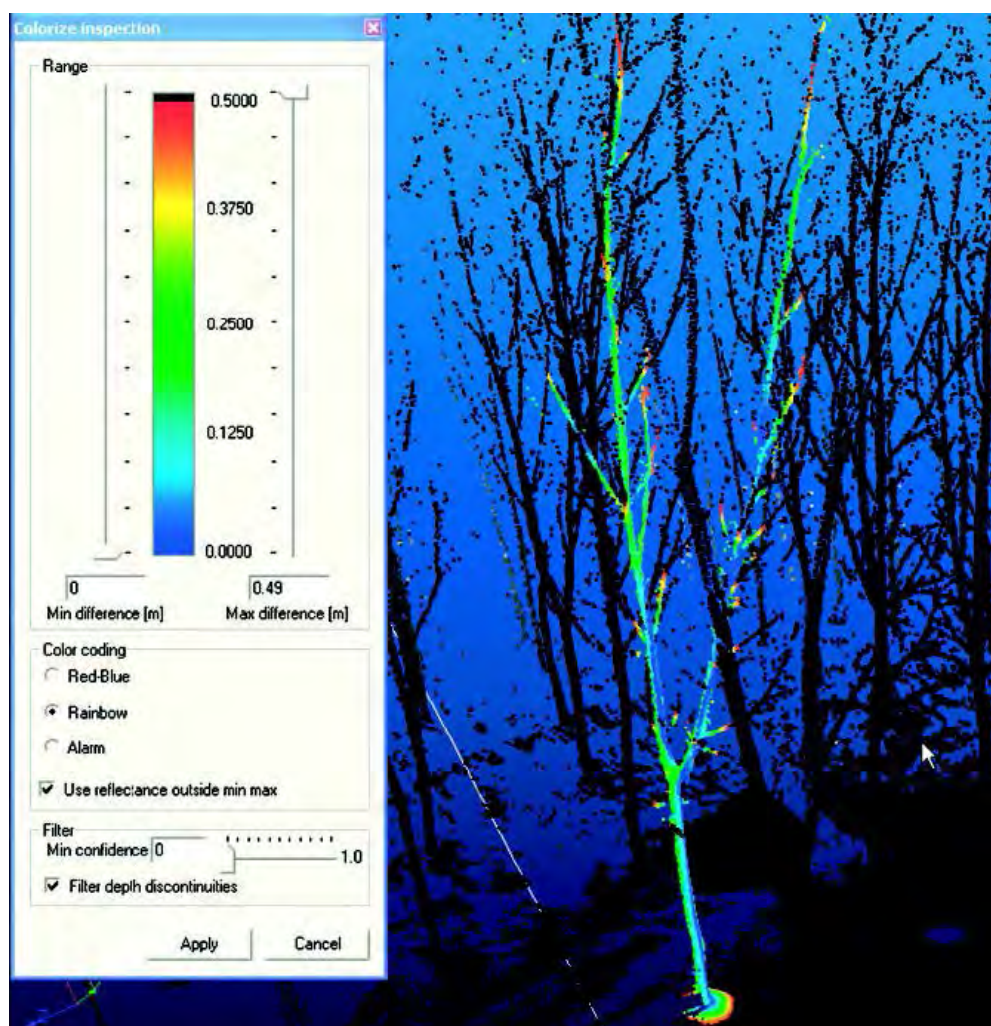


Рис. 111. Процесс проверки геометрической модели тополя, созданной с помощью *AMAPmod*; цветная легенда, используемая программным обеспечением *JRC 3D Reconstructor*, отображает минимальные и максимальные различия между геометрической моделью и облаками точек [Building a topological and geometrical model of poplar tree using portable on-ground scanning LIDAR, 2008]

Основными источниками ошибок при создании моделей многомасштабных графических представлений дерева были комбинированный эффект перекрытия, неопределенность диапазона и угол расхождения лазерного луча. Использование нескольких зарегистрированных снимков, полученных в безлистном состоянии, значительно уменьшило окклюзию. И хотя была использована выборка из исходных снимков, автоматическая регистрация данных сканирования позволила создать трехмерную информационную систему о насаждении и получить трехмерные изображения структуры полога с приемлемым уровнем точности. Для одновременной работы с несколькими сканерами необходимо использовать высокопроизводительное аппаратное и программное оборудование [Building a topological and geometrical model of poplar tree using portable on-ground scanning LIDAR, 2008].

Наземные контрольные объекты, используемые при регистрации снимков, были основополагающими для объединения нескольких снимков и минимизации помех. Точность регистрации была удовлетворительной, о чем свидетельствует средняя погрешность 30 мм. Комбинированный эффект окклюзии, неопределенности диапазона и расхождения лазерного луча повлиял на анализ и измерение более мелких ветвей, расположенных в верхней части кроны. Этот эффект следует тщательно учитывать при сборе данных об архитектуре деревьев, особенно если данные будут использоваться для представления сложных объектов в функционально-структурных моделях. Измерения с более высоких позиций, например, с подмостков или выдвижного штатива, позволят лучше оценить верхнюю часть полога [Hosoi, Omasa, 2007].

Подобное исследование было выполнено в плантациях оливковых деревьев (*Olea europaea* L.) в Кордове, Испания [Field characterization of olive (*Olea europaea* L.) tree crown architecture using terrestrial laser scanning data, 2011]. Применена интеллектуальная лазерная система определения морфологии крон деревьев *ILRIS-3D*. Сканирование крон деревьев осуществлялось *ILRIS-3D*-сканерами, установленными как на штативе, так и на платформе на высоте 12 м над землей для регистрации крон в надире (рис. 112).

Для углубленного анализа были отобраны 24 оливковых дерева с различными структурными особенностями. Высота дерева, ширина (диаметр) кроны и высота крепления кроны были основными параметрами структуры дерева, которые были извлечены из облаков точек *ILRIS-3D*-сканеров. Одновременное сканирование (*cross-validation*) крон в двух разных ракурсах позволило оценить названные три структурные характеристики дерева с высокой точностью: изменчивость показателей, оцененных *ILRIS-3D*-сканером в фронтальном ракурсе и в надире, совпала для названных трех показателей соответственно на 97, 96 и 86 % (рис. 113). Заниженный показатель при оценке высоты крепления кроны объясняется меньшей доступностью его регистрации в надире, по сравнению с регистрацией в фронтальном ракурсе [Field characterization of olive (*Olea europaea* L.) tree crown architecture using terrestrial laser scanning data, 2011].

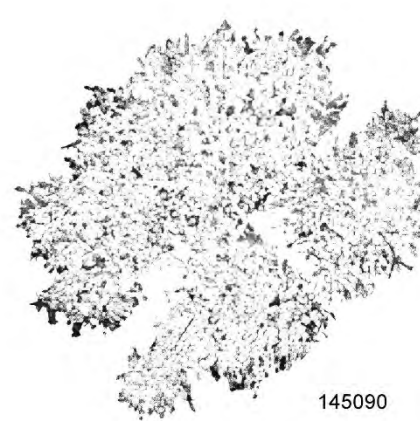
Полученные результаты свидетельствуют о возможности систем наземного лидарного сканирования заменить существующие трудоемкие и отнимающие много времени «ручные» подходы. Однако в сомкнутых насаждениях достижение показанной здесь точности будет проблематичным вследствие взаимного перекрытия крон и наличия нижнего яруса. Существует также чисто техническая проблема, связанная с трудностями выдвижения платформы поверх полога. Тем не менее в сомкнутом насаждении дзельквы японской (*Zelkova serrata* (Thunberg) Makino) путем подобного наземного лазерного сканирования полога в двух ракурсах удалось вычленивать ярусы фотосинтезирующих тканей, скелетной части полога и подлеска [Hosoi, Omasa, 2007].

a



137853

б



145090

Рис. 112. Фотоизображение и облака точек кроны оливкового дерева, полученные с помощью *ILRIS-3D*-сканеров, установленных: *a* – на штативе; *б* – на платформе (в надирином ракурсе) [Field characterization of olive (*Olea europaea* L.) tree crown architecture using terrestrial laser scanning data, 2011]

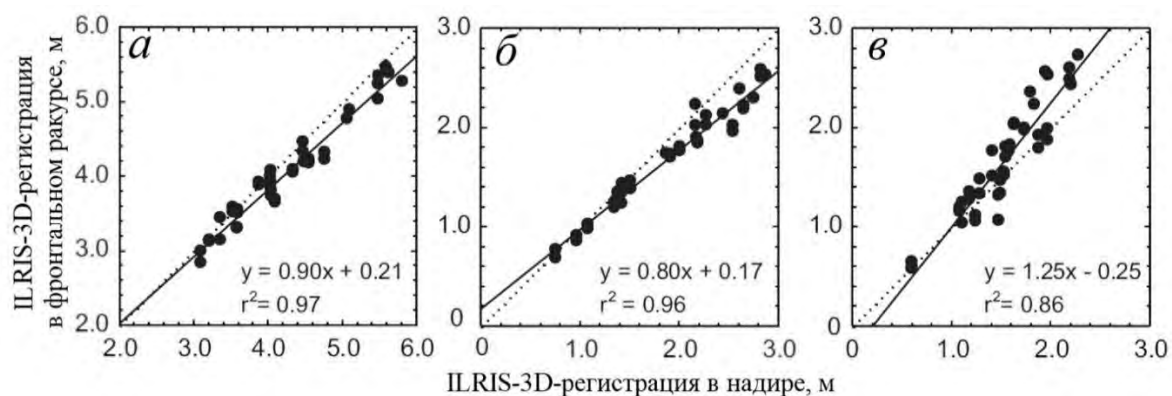


Рис. 113. Соотношение результатов лидарных измерений, полученных в фронтальном ракурсе и в надире: *a* – высоты дерева; *б* – ширины кроны; *в* – высоты крепления кроны [Field characterization of olive (*Olea europaea* L.) tree crown architecture using terrestrial laser scanning data, 2011]

Описанные методологии, хотя и не полностью автоматизированы, позволяют определять структуру древостоя и архитектуру деревьев, а также создавать их топологические и геометрические модели. Сочетание наземного и воздушного лазерного сканирования даст возможность построить полную трехмерную модель деревьев, а многомасштабные представления архитектуры деревьев могут быть полезны при функционально-структурном моделировании и для оценки наземной биомассы лесных насаждений [Building a topological and geometrical model of poplar tree using portable on-ground scanning LIDAR, 2008].

3.3. Алгоритм автоматической сегментации деревьев и крон полога

Технология наземного лазерного сканирования (TLS) имеет большие перспективы для сбора пространственной информации в лесах благодаря высокой точности измерений, оперативному зондированию и высокому уровню детализации [van Leeuwen, Nieuwenhuis, 2010]. Наземное лазерное сканирование дает возможность получать уровни детализации, далеко превосходящие возможности бортового лазерного сканирования [A fine-scale architectural model of trees to enhance LiDAR-derived measurements of forest canopy structure, 2012; Highly accurate tree models derived from terrestrial laser scan data: A method description, 2014], и, таким образом, может использоваться для количественного описания лесного покрова на уровне отдельных деревьев, включая подрост [3D-laser scanning: A non-destructive method for studying aboveground biomass and growth of juvenile trees, 2011].

Результатом предварительной обработки данных наземного лазерного сканирования являются зарегистрированные и выровненные облака точек, ориентированных в трехмерном пространстве с точностью до миллиметра. Этот специфический формат данных требует специальных методов обработки. Из-за больших объемов данных и их высокого информационного потенциала автоматизированная обработка облаков точек наземного лазерного сканирования имеет решающее значение. За последние десятилетия было внедрено множество алгоритмов, причем ранние исследования были сосредоточены на основных параметрах деревьев, таких как высота дерева, диаметр ствола и его положение [Automatic forest inventory parameter determination from terrestrial laser scanner data, 2008], а более поздние работы касались сравнительно сложных вопросов, таких как форма и размеры кроны [Crown modeling by terrestrial laser scanning as an approach to assess the effect of aboveground intra- and interspecific competition on tree growth, 2013], распространение света внутри крон [How neighborhood affects tree diameter increment – New insights from terrestrial laser scanning and some methodical considerations, 2015] и оценка древесной биомассы [Nondestructive estimates of above-ground biomass using terrestrial laser scanning, 2015]. Разработка не-

скольких приложений для извлечения различных параметров дерева из облаков точек наземного лазерного сканирования, например, *SimpleTree* [SimpleTree – An efficient open source tool to build tree models from TLS clouds, 2015], *CompuTree* [CompuTree: a collaborative platform for use of terrestrial LiDAR in dendrometry, 2025] или *AutoStem* [TreeMetrics, 2015], показала, что использование наземного лазерного сканирования обладает большим потенциалом для оказания помощи лесоведам в детальном анализе деревьев [3D Forest: An application for descriptions of three-dimensional forest structures using terrestrial LiDAR, 2017].

Каждое из этих приложений предназначено для конкретных целей и имеет свои плюсы и минусы. *AutoStem* – это коммерческий продукт, предназначенный для описания деревьев и инвентаризации лесов с точки зрения производства древесины. *SimpleTree* – это приложение с открытым входным кодом, которое оптимально подходит для подробного описания и параметризации отдельного дерева, предоставляя больше параметров, по сравнению с другими приложениями. *CompuTree* выполняет роль платформы для других алгоритмов, связанных с лазерным сканированием, когда доступ к различным параметрам дерева или алгоритмам сегментации можно получить с помощью подключаемых модулей. Однако его графический интерфейс предназначен для продвинутых пользователей, обладающих подробными знаниями базовых алгоритмов, что может быть ограничивающим фактором для многих потенциальных пользователей. Более того, ни один из этих программных пакетов не ориентирован на параметризацию крон деревьев, их пространственное расположение и взаимодействие в реальном трехмерном пространстве, что является очень важным вопросом с точки зрения лесной экологии [3D Forest: An application for descriptions of three-dimensional forest structures using terrestrial LiDAR, 2017].

В связи с этим представленное [3D Forest: An application for descriptions of three-dimensional forest structures using terrestrial LiDAR, 2017] программное приложение *3DForest* для описания 3D-структуры леса посредством параметризации отдельных деревьев и их крон не зависит от конкретной платформы и имеет простой в использовании графический интерфейс (GUI), подходящий для неспециалистов в обработке данных наземного лазерного сканирования. Это бесплатное решение с открытым входным кодом для вычисления параметров дерева – положение дерева, диаметр ствола, высота дерева, огибающая ствола, проекция дерева – на плоскость и параметры кроны, такие как: центр тяжести кроны, отклонение положения кроны, высота основания кроны, размеры кроны (высота, длина, ширина), объем кроны и поверхность с использованием выпуклой или вогнутой оболочки, а также объема и положения взаимных перекрытий крон. Это приложение также дает возможность создавать детальную цифровую модель рельефа (DTM) исследуемого участка [3D Forest: An application for descriptions of three-dimensional forest structures using terrestrial LiDAR, 2017].

Чтобы лучше продемонстрировать рабочий процесс *3DForest* и его результаты, ниже приведен пример обработки данных наземного лазерного сканирования на основе небольшого лесного участка (20×40 м) (рис. 114).

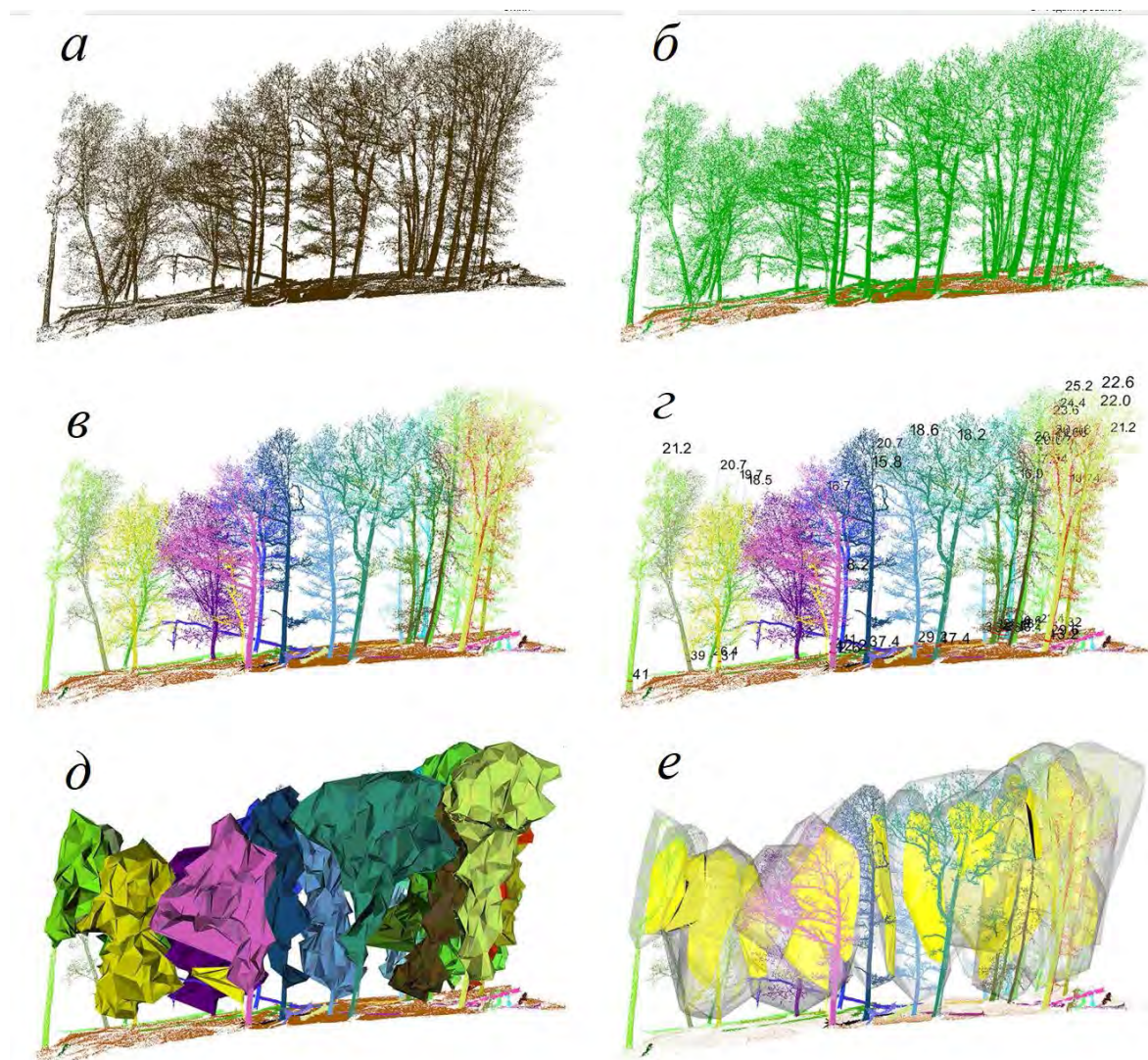


Рис. 114. Демонстрация рабочего процесса в программном приложении *3DForest* на участке 20×40 м: *a* – данные наземного лазера, импортированные в *3DForest* (т. е. базовое облако точек) в преддверии сегментации; *б* – автоматически сегментированное облако точек рельефа (коричневый цвет) и облако древесного яруса (зеленый цвет) с использованием метода поиска октодерева (*octree*), уточненные путем ручной настройки; *в* – выделенные цветом деревья, сегментированные из облаков точек; *г* – диаметры ствола и высоты деревьев выделенные для каждого дерева; *д* – контуры крон деревьев; *е* – кроны, представленные трехмерными выпуклыми контурами, и их взаимные перекрытия, выделенные желтым цветом [3D Forest: An application for descriptions of three-dimensional forest structures using terrestrial LiDAR, 2017]

Перед импортом в приложение *3DForest* данные, полученные с нескольких позиций сканера, настраиваются и регистрируются в программном обеспечении, обычно поставляемом с наземным лазерным сканером.

В рабочем процессе приложения *3DForest* импортированное облако точек перед сегментацией, называемое *базовым облаком* (рис. 114, а), разделяется затем на две составные части: точки, представляющие поверхность рельефа и древесный ярус (рис. 114, б). Сегментация облака древесного яруса (рис. 114, в) выполняется автоматически с возможностью ручной настройки. Отдельные облака деревьев являются предметом дальнейшей автоматической обработки: извлекаются, например, значения диаметра ствола и высоты дерева (рис. 114, г) или поверхности, объема и других параметров кроны (рис. 114, д). Взаимодействия между кронами количественно оцениваются по перекрытиям выпуклых оболочек (периметров) крон (рис. 114, е) и их параметрам. Все извлеченные параметры дерева одновременно визуализируются в приложении *3DForest-viewer*, что позволяет напрямую проверить их соответствие облакам деревьев. Результаты могут быть экспортированы в виде таблицы извлеченных параметров дерева, изображений вьювера (*3DForest-viewer*) или сегментированных облаков точек для дальнейшего анализа в другом программном обеспечении [3D Forest: An application for descriptions of three-dimensional forest structures using terrestrial LiDAR, 2017].

Правильное определение рельефа местности имеет решающее значение, поскольку большинство параметров дерева связано с расстоянием сенсора от земли. Автоматизированные методы выделения рельефа местности получили широкое развитие в воздушном лазерном сканировании; однако в области обработки данных наземного лазера извлечение рельефа местности в насаждениях рассматривалось лишь в немногих исследованиях [Application of terrestrial laser scanners for the determination of forest inventory parameters, 2006; Brolly, Kiraly, 2009]. В приложении *3DForest* реализованы два метода: 1) сегментация самых низких точек по оси Z на основе поиска в структуре восьмиугольника; 2) вокселизация входного облака и выбор самых низких вокселей по оси Z в качестве рельефа местности [3D Forest: An application for descriptions of three-dimensional forest structures using terrestrial LiDAR, 2017].

Первый метод, использующий поиск по «октодереву»¹⁰ (*octree*), является более сложным и заключается в рекурсивном разбиении трехмерного пространства облака точек на восемь кубов (все оси разделены пополам) до достижения заданного разрешения R (R равно длине ребра куба). Применение слишком грубого разрешения приводит к исчезновению лазерных следов на профиле рельефа, в то время как слишком высокое разрешение – к очень шумному облаку рельефа. Для минимизации шумовых точек используется двухпроходный алгоритм: при первом проходе создается временное грубое суб-облако, содержащее все точки с наименьшими кубами десятикратного разрешения ($10R$). Цель состоит в том, чтобы удалить точки

¹⁰ *Октодереву* (дерево октантов, восьмеричное дерево, англ. *octree*) – тип древовидной структуры данных, в которой у каждого внутреннего узла ровно восемь «потомков». Восьмеричные деревья чаще всего используются для деления трехмерного пространства, рекурсивно выделяя восемь ячеек.

полога из тех мест, где отсутствуют истинные точки рельефа (затененные во время сканирования). Затем выполняется второй проход – новый поиск по октодереву с разрешением R в пределах первого временного суб-облака, и результат сохраняется в новом облаке точек рельефа, в то время как остальное сохраняется как облако точек полога. Поиск по октодереву дает подробные результаты, но с большим количеством шума [3D Forest: An application for descriptions of three-dimensional forest structures using terrestrial LiDAR, 2017].

По второму методу вычисляется центроид (центр тяжести или точка пересечения медиан) для точек в пределах каждого вокселя с заданным разрешением, и создается новое облако точек из центроидов вокселей. Центроиды самых нижних вокселей на оси Z выбираются и сохраняются как облако точек рельефа; остальные классифицируются как облако точек полога. Точки шума на автоматически сегментированном рельефе местности (пни, валежник) удаляются с помощью встроенных фильтров или корректируются вручную. Пропущенные точки в облаке точек рельефа (например, в областях, закрытых стволами во время сканирования) заполняются с помощью интерполяции обратного взвешивания расстояния [3D Forest: An application for descriptions of three-dimensional forest structures using terrestrial LiDAR, 2017].

Для сегментации лесного полога на отдельные деревья (рис. 114, в) был разработан автоматический подход, основанный на расстоянии между точками, минимальном количестве точек, образующих кластеры, а также на угле и расстоянии между центроидами кластеров. На первом этапе сегментации весь полог делится на горизонтальные срезы с заданным пользователем входным расстоянием S (см) (S является основным параметром сегментации и также используется на последующих этапах). Внутри этих срезов создаются кластеры с заданным пользователем минимальным количеством точек N и максимальным расстоянием S между двумя ближайшими точками. Следующим шагом является восстановление оснований деревьев. Для каждого кластера с высотой центроида менее 1,3 м над уровнем земли найдены десять ближайших кластеров на расстоянии до $2S$. Все такие кластеры объединяются в сегменты и тестируются, если они образованы как минимум пятью кластерами и если максимальный размер сегмента составляет не менее 1 м, который будет идентифицирован как дерево. Когда все сегменты протестированы и оценены, использован другой подход, цель которого – добавить больше кластеров в дерево. Кластер добавляется к дереву, если его центр тяжести находится на расстоянии $4S$ от ближайшего центра тяжести дерева, а угол между вектором этих двух центроидов и собственным вектором пяти ближайших центроидов ствола составляет менее 10° . Для невыбранных кластеров проверяется расстояние между точками кластера и точками дерева, и если кластер соответствует условию расстояния S , то кластер присоединяется к дереву. На заключительном этапе все невыбранные точки тестируются, чтобы определить, могут ли они быть присоединены к какому-либо

дереву в соответствии с постепенно увеличивающимся расстоянием (максимум до 3S). Автоматически сегментированные деревья могут быть визуально проверены и при необходимости скорректированы с помощью ручной сегментации. Результирующие отдельные облака деревьев используются для оценки параметров дерева [3D Forest: An application for descriptions of three-dimensional forest structures using terrestrial LiDAR, 2017].

Есть две проблемы, в некоторой степени ограничивающие применение предложенного подхода: 1) в зависимости от типа насаждения на пробной площади после сканирования в облаке точек может быть представлен развитый нижний ярус или густые куртины небольших деревьев. Эти точки могут быть интерпретированы как дерево, хотя на самом деле они должны находиться в облаке невыбранных точек; 2) части дерева (обычно ветви) могут быть совмещены с другим деревом. Эти ограничения частично устраняются при добавлении кластеров к деревьям: в дерево добавляются только самые близкие кластеры, удовлетворяющие условиям сегментации, а затем обрабатываются другие деревья перед добавлением следующего уровня кластеров в то же дерево. Деревья, у которых конец ветви находится ниже ее крепления на стволе, и деревья, перекрывающиеся другим деревом, являются наиболее проблемными. В этих случаях результат сегментации может быть отредактирован вручную, и избыточные части могут быть удалены из некорректно сегментированного дерева и добавлены в правильно сегментированное. Сегментация также может поддерживаться методом косвенной классификации кластеров на основе параметров дерева [Tao, Wu, Guo, 2015].

Предложенный алгоритм сегментации лучше работает в безлистном состоянии деревьев, особенно в густых насаждениях, где сегментация, как правило, сложнее. В облиственном состоянии будет больше препятствий и, следовательно, больше теней в облаке точек, что обычно приводит к ухудшению сегментации деревьев. С другой стороны, деревья могут быть хорошо сегментированы в облиственном состоянии в разреженных насаждениях [Tao, Wu, Guo, 2015].

Известны еще два автоматизированных метода сегментации деревьев [Fast automatic precision tree models from terrestrial laser scanner data, 2013; [Tao, Wu, Guo, 2015]. Хотя алгоритмы сегментации различаются, ограничения у всех методов общие: неравномерная плотность точек из-за теней и перекрывающихся деревьев и ветвей. В вышеупомянутом источнике [Tao, Wu, Guo, 2015] используется стратегия, состоящая из трех основных частей: нормализация облака точек, обнаружение ствола и оценка его диаметра, и, наконец, сегментация кроны. Стволы обнаруживаются с помощью пространственной кластеризации с учетом густоты и когда все стволы сегментированы, для каждого измеряется диаметр и среднее горизонтальное расстояние до его центра. Затем точки кроны сегментируются на основе взвешенного расстояния до основания дерева и соответствующего диаметра ствола. В другом случае используют два основных принципа – топологию деревьев

и набор полога [Fast automatic precision tree models from terrestrial laser scanner data, 2013]. Сегментация облака точек на стволы и ветви выполняется с использованием больших участков фиксированного размера [3D Forest: An application for descriptions of three-dimensional forest structures using terrestrial LiDAR, 2017].

Затем по сегментированным деревьям приложением *3DForest* вычисляются их параметры: положение дерева, диаметр ствола, высота дерева, образующая ствола и проекция дерева на плоскости. Для определения положения дерева применяются два метода. По первому методу используются все точки на заданной пользователем высоте (по умолчанию 60 см) над нижней точкой дерева и вычисляются средние координаты X и Y . Ордината Z определяется как среднее значение Z из пяти ближайших точек рельефа. По второму методу используется подход, аналогичный описанному ранее [Application of terrestrial laser scanners for the determination of forest inventory parameters, 2006]: применяется рандомизированное преобразование Хафа для определения круглого сечения [Ху, Оја, 1993] в точках дерева на высоте 1,3 м и 0,65 м над нижней точкой облака деревьев. Положение дерева определяется как пересечение вектора, образованного центрами двух расчетных кругов, с моделью поверхности рельефа [3D Forest: An application for descriptions of three-dimensional forest structures using terrestrial LiDAR, 2017].

Для вычисления диаметра ствола (красный цилиндр на рис. 115, а, б) имеются два доступных метода: 1) рандомизированное преобразование Хафа для определения окружности с регулируемым числом итераций (по умолчанию 200) для оценки окружности [Ху, Оја, 1993]; 2) регрессия наименьших квадратов с алгебраической оценкой окружности и геометрическое уменьшение квадратов расстояний до вычисленной окружности [Chernov, Lesort, 2005]. В обоих методах используется подмножество облака точек дерева – горизонтальный срез на расстоянии от 1,25 до 1,35 м над расчетным положением дерева, называемый *облаком диаметров ствола* в среде *3DForest*. Для успешного подбора окружности необходимо, чтобы на этом срезе было не менее четырех точек. Оба метода были протестированы на чувствительность к входным данным и времени вычисления, чтобы найти наилучшее применение и настройку для каждого из них. На данном этапе рабочего процесса *3DForest* доступно ручное редактирование, т. е. удаление всех точек, не представляющих диаметр ствола [3D Forest: An application for descriptions of three-dimensional forest structures using terrestrial LiDAR, 2017].

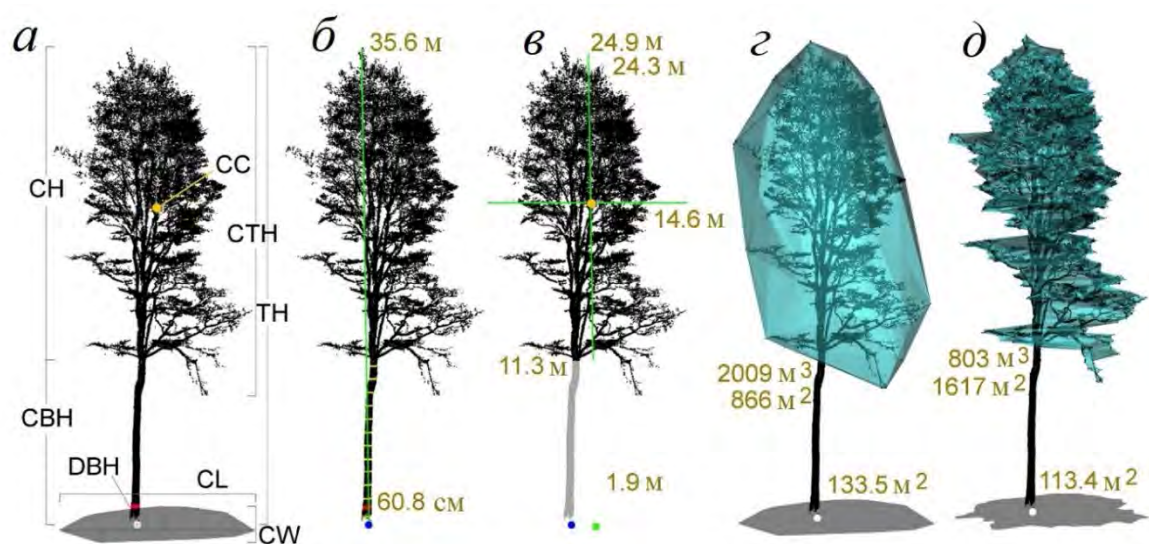


Рис. 115. Извлечение и визуализация параметров дерева из облака точек деревьев:
 а – визуализация параметров дерева (CBH – высота основания кроны, CH – высота кроны, CTH – общая высота кроны, CL – длина кроны, CW – ширина кроны, CC – центр тяжести кроны, DBH – диаметр на высоте груди, TH – высота дерева, белая сфера – положение дерева); б – дерево с вычисленными основными параметрами: положение (синий кружок внизу), диаметр ствола (60,8 см), высота дерева (зеленая линия; 35,6 м) и профиль ствола (желтые цилиндры); в – крона дерева (черное облако) (CTH (24,9 м), CH (зеленая линия; 24,3 м), CL (зеленая линия; 14,6 м), CBH (11,3 м), центр тяжести кроны (оранжевый кружок) и его горизонтальная проекция (зеленый кружок) с указанием расстояния от расположения дерева); г – трехмерная выпуклая оболочка кроны объемом (2 009 м³) и поверхностью (866 м²) и горизонтальная проекция с соответствующей площадью (133,5 м²); д – вогнутый корпус кроны объемом (803 м³) и поверхностью (1617 м²) и его горизонтальная проекция площадью (113,4 м²) [3D Forest: An application for descriptions of three-dimensional forest structures using terrestrial LiDAR, 2017]

Высота дерева (TH) определяется как разница в ординатах Z между самой высокой точкой облака точек дерева и положением основания дерева (вертикальная линия на рис. 115, а и число над деревом на рис. 115, б). По альтернативному методу вычисляется длина дерева как наибольшее евклидово расстояние между любыми двумя точками облака точек дерева. Таким образом, метод подходит для расчета общей длины наклоняющихся деревьев или даже длины валежника [3D Forest: An application for descriptions of three-dimensional forest structures using terrestrial LiDAR, 2017].

Для анализа образующей ствола и его формы использован подход, изложенный ранее [Automatic forest inventory parameter determination from terrestrial laser scanner data, 2008]. Расположение центров стволов и диаметры стволов рассчитываются на разной высоте над основанием дерева, начиная с 0,65 м, затем на 1,3 м, 2 м и затем через каждый следующий метр над поверхностью земли (желтые цилиндры на рис. 115, б). Круги (определяющие локальный центр и диаметр ствола) с помощью алгоритма рандомизированного преобразования Хафа наносятся на горизонтальные 7-сантиметровые

срезы облака точек дерева, обрезанные на соответствующих высотах. Алгоритм останавливается, когда расчетный диаметр становится в два раза больше, чем в обоих предыдущих кругах, что указывает на расширение облака деревьев в крону [3D Forest: An application for descriptions of three-dimensional forest structures using terrestrial LiDAR, 2017].

Приложение *3DForest* может вычислять и визуализировать область проекции дерева на плоскость, используя двумерную выпуклую или вогнутую оболочку облака точек дерева, ортогонально спроецированную на горизонтальную плоскость на высоте расположения основания дерева. Выпуклая оболочка (рис. 115, *а*) вычисляется с использованием алгоритма, изложенного ранее [Preparata, Hong, 1977], а затем вычисляется площадь полученного многоугольника. Поскольку выпуклые формы плохо соответствуют реальной форме многих деревьев «неправильной» формы, была реализована вогнутая плоская проекция (рис. 115, *б*). Вогнутая проекция расширяет алгоритм выпуклой оболочки, используя алгоритм «разделяй и властвуй» (*divide and conquer*) для разделения сторон многоугольника в соответствии с заданной максимальной длиной стороны многоугольника. Уровень детализации или обобщения, а также площадь вогнутого многоугольника могут варьировать в зависимости от максимальной длины стороны, определенной пользователем [3D Forest: An application for descriptions of three-dimensional forest structures using terrestrial LiDAR, 2017].

При сегментации кроны облака деревьев разделяются на ствол и крону дерева. Это можно выполнить вручную или с помощью автоматического выделения. На первом шаге алгоритма автоматического извлечения облако деревьев делится на горизонтальные секции высотой 0,5 м, и их ширина (среднее удлинение по осям X и Y) сравнивается одна за другой, начиная с самой нижней секции. Если три (или более) последовательных среза оказываются шире предыдущего, последний тонкий срез используется в качестве начальной позиции для детального поиска. В качестве первого шага детального поиска круги подгоняются методом наименьших квадратов к двум горизонтальным участкам высотой 10 см. По центрам этих кругов приблизительно определяется положение центра подогнанного круга следующего горизонтального участка высотой 10 см. Подмножество точек для последовательной подгонки окружности ограничено точками радиуса, в два раза превышающего радиус последней подогнанной окружности. При этом для вычисления диаметра рекомендовано избегать использования точек, представляющих нависающие ветви. Если новый (самый верхний) диаметр сечения шире предыдущего менее, чем на 25 %, алгоритм продолжает работу, предсказывая следующий центр ствола по двум последним подогнанным окружностям и вычисляя диаметр следующего сечения. Высота последнего диаметра сечения, соответствующая заданному пределу, считается основанием кроны. Все точки облака деревьев, расположенные выше этого положения, считаются кроной дерева, а также точки, которые были исключены из окружностей подгонки при детальном поиске. Подгонка методом

наименьших квадратов используется здесь из-за более короткого времени выполнения и, в частности, из-за его чувствительности к внешним точкам, которые фактически определяют места прикрепления ветвей к стволу. При использовании ручного разделения все точки ствола под кроной удаляются из облака деревьев вручную. Ордината Z самой высокой точки из удаленных берется в качестве высоты основания кроны [3D Forest: An application for descriptions of three-dimensional forest structures using terrestrial LiDAR, 2017].

С помощью приложения *3DForest* рассчитываются следующие параметры кроны:

- высота основания кроны (CBH) вычисляется как разница между ординатой Z положения основания дерева и ординатой Z основания кроны, полученной в результате удаления кроны (рис. 115, а, в);
- высота кроны (CH) – это разница между ординатой Z основания кроны и координатой Z самой высокой ее точки (рис. 115, а, в);
- общая высота кроны (CTH), представляющая разность между ординатами Z самой высокой и самой низкой точек кроны (рис. 115, а, в);
- длина кроны (CL) как наибольшее расстояние между двумя вершинами выпуклой оболочки плоской проекции кроны (рис. 115, а, в);
- ширина кроны (CW) как сумма двух наибольших перпендикулярных расстояний от оси кроны до вершины выпуклой оболочки (рис. 115, а);
- центр тяжести кроны (CC), который вычисляется по граничным точкам, определяемым двумерными вогнутыми оболочками горизонтальных сечений кроны; положение центра тяжести кроны вычисляется как среднее значение координат пограничных точек (оранжевая точка на рис. 115, а, в); при использовании всех точек кроны это позволяет избежать смещения ее центра тяжести, вызванного различной плотностью облаков точек;
- отклонение положения кроны (CPD), определяемое расстоянием, направлением (азимутальным углом) и наклоном; расстояние и направление измеряются между положением основания дерева и ортогональной проекцией положения центра кроны (зеленый кружок на рис. 115, в); наклон кроны соответствует наклону линии, соединяющей положение основания дерева и положение центра кроны;
- объем кроны и площадь ее поверхности, оцениваемые по ее вогнутому и/или выпуклому трехмерному изображению.

Вогнутое изображение (рис. 115, д) основано на горизонтальных сечениях (срезах) заданной пользователем высоты и вогнутых оболочках. Таким образом, объем кроны равен сумме объемов всех горизонтальных сечений (которые рассчитываются как площади вогнутой оболочки в двумерном сечении, умноженные на высоту сечения). Площадь поверхности рассчитывается с помощью специального алгоритма триангуляции. Триангуляция основана на многоугольниках, созданных вогнутой оболочкой каждой секции (пограничные точки). Верхняя и нижняя части кроны триангулируются путем создания треугольников соответственно между самой высокой и самой

низкой точкой кроны и самыми высокими и самыми низкими гранями многоугольника. Остальная часть триангулируется путем ленточной триангуляции двух последовательных многоугольников [3D Forest: An application for descriptions of three-dimensional forest structures using terrestrial LiDAR, 2017].

Трехмерная выпуклая оболочка, созданная с помощью трехмерной триангуляции Вороного (рис. 115, *г*), является вторым вариантом расчета объема кроны и площади поверхности. Для сокращения времени расчета используются только граничные точки и все точки из двух самых верхних и самых нижних горизонтальных сечений. При необходимости также доступны вычисления с использованием всех точек кроны. Расчет объема кроны также доступен по вокселям заданного пользователем размера; в этом случае объем кроны равен сумме объемов вокселей. Учитываются все воксели, содержащие хотя бы одну точку [3D Forest: An application for descriptions of three-dimensional forest structures using terrestrial LiDAR, 2017].

Наконец, приложение *3DForest* позволяет пользователям вычислять степень перекрытия двух соседних крон (рис. 114, *е*). Перекрытие вычисляется как «логическое И»¹¹ в трехмерном пространстве с использованием объектов, созданных с помощью выпуклой 3D-оболочки. Вычисляются объем и центр объемов перекрытия. В порядке дополнительной информации о конкурентных воздействиях в пологе направление от центра тяжести кроны до центра перекрывающихся объемов выражается горизонтальным азимутом и вертикальным углом; указывается также расстояние в трехмерном пространстве между этими двумя точками.

Сравнение с данными полевой таксации не показало существенной разницы в оценках диаметра стволов или высоты деревьев, полученных с помощью приложения *3DForest*, хотя алгоритм рандомизированного преобразования Хафа оказался достаточно устойчивым к шуму только при оценке диаметра ствола и дал результаты, сопоставимые с традиционными полевыми измерениями.

Полученные результаты были вполне сопоставимы с результатами аналогичного исследования [Tao, Wu, Guo, 2015], несмотря на то, что параметры сканирования и область исследования были другими. Общая точность была сопоставимой (90 % против 93 %). Ошибка пропуска (*recall*) и ошибка завышения (*precision*) также были схожими, но в приложении *3DForest* были получены несколько лучшие результаты по обеим ошибкам (менее 2,5 %), чем в сравниваемом исследовании (5 %).

Таким образом, если для обработки данных воздушного лазерного сканирования имеется несколько программных пакетов (*FUSION*, *TerraScan*, *LiForest*), то для обработки данных наземного лазерного сканирования приложение *3DForest* является одним из немногих программных приложений, специализирующихся на описании деревьев в трехмерном пространстве. Это позволяет пользователям применять данные наземного лазерного ска-

¹¹ *Boolean AND* – один из логических операторов в программировании.

нирования при детальных пространственно-ориентированных исследованиях в области лесной экологии в удобной для пользователя среде. Приложение позволяет генерировать такие стандартные таксационные процедуры, как картирование деревьев, определение диаметра на высоте груди и высоты деревьев, а также предоставляет более сложные параметры дерева: сбег ствола, проекции выпуклых и вогнутых оболочек крон, линейные размеры и объем кроны, площадь ее поверхности, положение центра тяжести кроны и др. Реализованные методы сопоставимы с другими результатами, полученными ранее по автоматической сегментации деревьев [Tao, Wu, Guo, 2015], оценке их параметров [Automatic forest inventory parameter determination from terrestrial laser scanner data, 2008] и параметров кроны [3D-laser scanning: A non-destructive method for studying aboveground biomass and growth of juvenile trees, 2011].

Кроме того, приложение *3DForest* позволяет вычислять перекрывающийся объем двух соседних крон, что обеспечивает превосходную идентификацию и количественную оценку конкуренции деревьев в надземном пространстве [Nondestructive estimates of above-ground biomass using terrestrial laser scanning, 2015; SimpleTree – An efficient open source tool to build tree models from TLS clouds, 2015] или проверку положений теории метаболического масштабирования [Crown plasticity in mixed forests – Quantifying asymmetry as a measure of competition using terrestrial laser scanning, 2011; A general integrative framework for modelling woody biomass production and carbon sequestration rates in forests, 2012] на достоверных фактических данных о кронах деревьев. С другой стороны, приложение *3DForest* пока довольно ограничено в точных оценках биомассы и детальном моделировании отдельного дерева на уровне ветвей и листвы [A fine-scale architectural model of trees to enhance LiDAR-derived measurements of forest canopy structure, 2012; Fast automatic precision tree models from terrestrial laser scanner data, 2013], как это предусмотрено, например, приложением *SimpleTree* [SimpleTree – An efficient open source tool to build tree models from TLS clouds, 2015]. Программное обеспечение *3DForest*, включая входной код, находится в свободном доступе.

3.4. Идентификация древесных видов по текстуре коры

Автоматическое распознавание древесных видов по данным наземного лазерного сканера выполнялось в рамках проекта “Computree” [Towards automated and operational forest inventories with T-LiDAR, 2011]. Инструмент предназначен для использования как в чистых, так и смешанных насаждениях. В большинстве работ в области распознавания видов используются либо только данные бортового зондирования, либо комбинация данных бортового зондирования с данными высокого разрешения в ближнем инфракрасном диапазоне, либо мультиспектральные данные [Ørka, Næsset, Bollandsas, 2009; Tree Species Classification Using Airborne LiDAR – Effects

of Stand and Tree Parameters, Downsizing of Training Set, Intensity Normalization, and Sensor Type, 2010; Heinzl, Koch, 2011; Yao, Krzystek, Neurich, 2012], либо с использованием фотосъемки [Fiel, Sablatnig, 2010]. Были также сообщения об использовании данных наземного лазера в сочетании с гиперспектральными [Tree species classification from fused active hyperspectral reflectance and LIDAR measurements, 2010] или панорамными изображениями [Reulke, Naala, 2004]. В хвойных и лиственных насаждениях Франции было проведено исследование, цель которого состояла в возможности распознавать отдельные виды деревьев на основе только данных наземного лазера, тем самым ограничиваясь анализом интенсивности отраженного лазерного импульса и трехмерного облака точек. Морфологическими характеристиками древесных видов являются форма листьев, общая форма кроны и различия в геометрии поверхности коры (трехмерная геометрическая текстура коры). По особенностям трехмерной геометрической формы коры можно распознать тот или иной древесный вид. Сбор данных осуществлялся зимой по двум причинам [Single tree species classification from Terrestrial Laser Scanning data for forest inventory, 2013].

Первая причина заключается в минимизации окклюзии, вызванной наличием листьев, чтобы иметь возможность реконструировать архитектуру дерева для более точного расчета объема древесины. Вторая причина заключалась в проведении измерений за пределами периода сезонного роста деревьев. Общая форма кроны является еще одной видовой характеристикой дерева. Однако тип ухода за насаждением и его густота делают дерево полиморфным, так что использовать форму кроны в качестве отличительного критерия для распознавания вида было довольно трудно. По-видимому, кора является наиболее характерным отличительным признаком вида, даже если ее морфология изменяется в течение жизни дерева в связи с возрастом, механическими повреждениями и изменениями характера роста из-за ухудшения условий окружающей среды [Single tree species classification from Terrestrial Laser Scanning data for forest inventory, 2013].

Таким образом, предложен метод, согласно которому с целью идентификации видов анализируются геометрические вариации или геометрическая текстура трехмерной поверхности коры. Метод включает два этапа. Вначале создается карта высот, представляющая геометрическую 3D-текстуру участка ствола дерева длиной 30 см на высоте груди. Затем к карте высот применяются методы анализа с несколькими разрешениями для извлечения признаков текстуры коры и видовых характеристик дерева, основанных на комбинации сложных вейвлет-преобразований (*complex wavelet transforms*) и контурного преобразования (*contourlet transform*)¹².

¹² *Contourlet Transform* – метод двухмерного преобразования изображений [Do, Vetterli, 2005]. Суть метода – формирование многомасштабной направленной рамки, которая эффективно приближает изображения, состоящие из гладких областей, разделенных гладкими границами (Contourlet // Wikipedia : [website]. URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Contourlet> (date of accessed: 02.11.25)).

Трехмерная поверхность коры рассматривается как комбинация трехмерной гладкой поверхности, которая отражает основную форму ствола дерева, и трехмерных геометрических вариаций, являющихся существенными характеристиками коры. Чтобы извлечь эти геометрические вариации и представить их в виде карты высот, вначале к 3D-облаку точек коры была применена фильтрация шума, реализованная в программном обеспечении *RapidForm*TM. Затем облако точек объединяется в сетку и сглаживается с помощью алгоритма сглаживания Таубина [Taubin, 2000]. Наконец, вычисляется разница между исходной и сглаженной сетками, в результате чего получается трехмерная карта отклонений, которая преобразуется в карту высот с помощью операции сглаживания [Single tree species classification from Terrestrial Laser Scanning data for forest inventory, 2013].

Цель сглаживания состояла в том, чтобы получить сетку, в которой сохранена основная структура ствола и отфильтрованы все геометрические детали. Таким образом, путем вычисления отклонения между исходной сеткой и сглаженной сеткой получается трехмерная сетка или облако точек, представляющее только геометрические детали коры [Single tree species classification from Terrestrial Laser Scanning data for forest inventory, 2013].

Трехмерная карта отклонений похожа на карту рельефа, но относится к трехмерной поверхности, а не к плоскости. В данном случае трехмерная поверхность – это сглаженная сетка, а рельеф – это отклонение между сглаженной и исходной сеткой. Для каждой вершины рельефа с координатами (X , Y , Z) сглаженной сетки вычисляется отклонение, и его значение присваивается данной вершине. Таким образом, трехмерная карта отклонений представляет собой сглаженную трехмерную сетку со значениями отклонений, присвоенными каждой вершине. На рис. 116 приведен пример трехмерной карты отклонений, где величины отклонений представлены в цветовой гамме.

Следующий шаг – сглаживание трехмерной карты отклонений, состоящее в преобразовании 3D-карты отклонений коры в 2D-карту высот, к которой можно применить алгоритмы анализа 2D-текстур. Это проблема снижения размерности. Двумя классическими методами снижения размерности являются анализ главных компонент и многомерное масштабирование. Однако они не подходят для данной трехмерной карты отклонений, поскольку представляют линейные методы, а трехмерная карта отклонений коры представляет собой нелинейную структуру. Поэтому при использовании метода главных компонент или многомерного масштабирования внутренняя геометрия данных не будет сохранена. Более подходящим решением для выравнивания трехмерной поверхности карты отклонений и преобразования ее в двумерную поверхность является алгоритм *Isomap* для нелинейных преобразований [Tenenbaum, de Silva, Langford, 2000]. Этот нелинейный метод сводит к минимуму пространственные искажения между точками на трехмерной поверхности [Single tree species classification from Terrestrial Laser Scanning data for forest inventory, 2013].

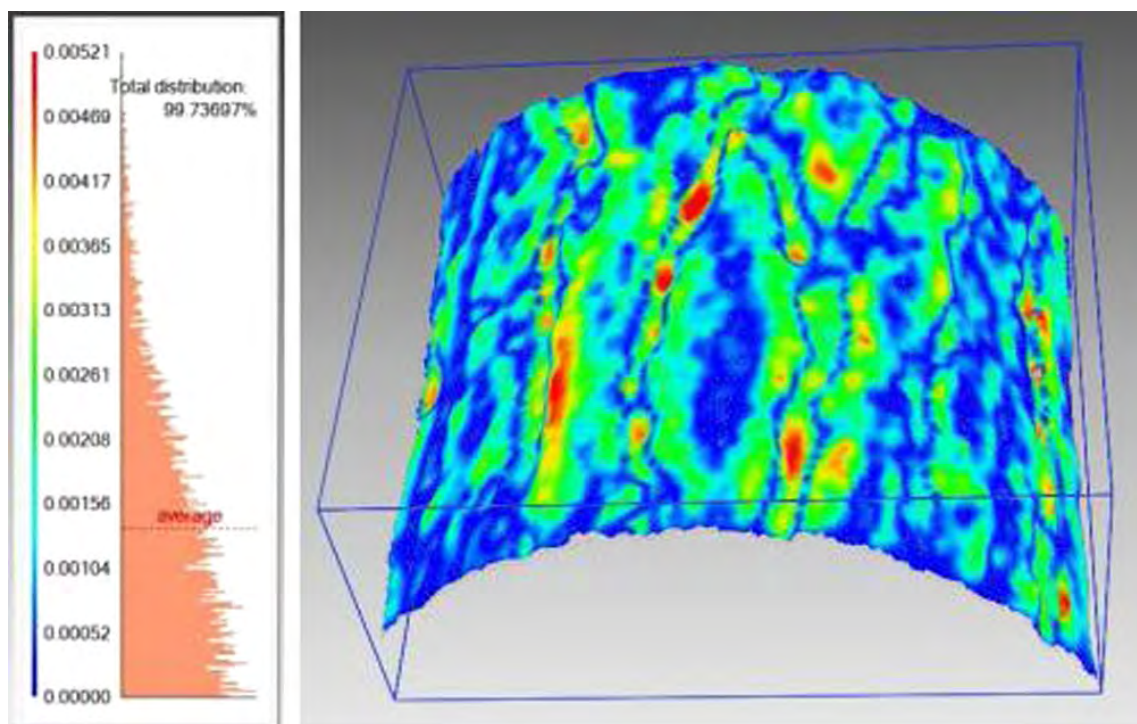


Рис. 116. Пример 3D-карты отклонений
[Single tree species classification from Terrestrial Laser Scanning data
for forest inventory, 2013]

После выравнивания 3D-карты отклонений следующим шагом было преобразование 2D-облака точек в 2D-изображение по высоте профиля коры. Для этого на точки наносилась сетка с фиксированным разрешением по X и Y , равным 1×1 мм. Каждая из ячеек сетки представляла собой пиксель 2D-изображения. Интенсивность пикселя вычислялась путем расчета среднего значения отклонения всех точек, входящих в ячейку, и преобразования его в значение в оттенках серого в диапазоне от 0 до 255. Из-за неравномерности исходного трехмерного облака точек выделенного сегмента ствола и из-за разрешения сетки изображений, превышающего разрешение сканирования, были ячейки, которые не содержали ни одной точки. Чтобы присвоить значения этим ячейкам, выполнялась двумерная бикубическая интерполяция. На рис. 117 в верхнем ряду представлен пример трехмерных треугольных сеток пяти древесных видов, а в нижнем ряду – соответствующие изображения высоты профиля коры. Очевидно, что изображения высоты профиля коры пяти различных видов деревьев демонстрируют разные свойства текстуры. Таким образом, задача классификации пород деревьев была преобразована в задачу классификации двумерных текстур [Single tree species classification from Terrestrial Laser Scanning data for forest inventory, 2013].

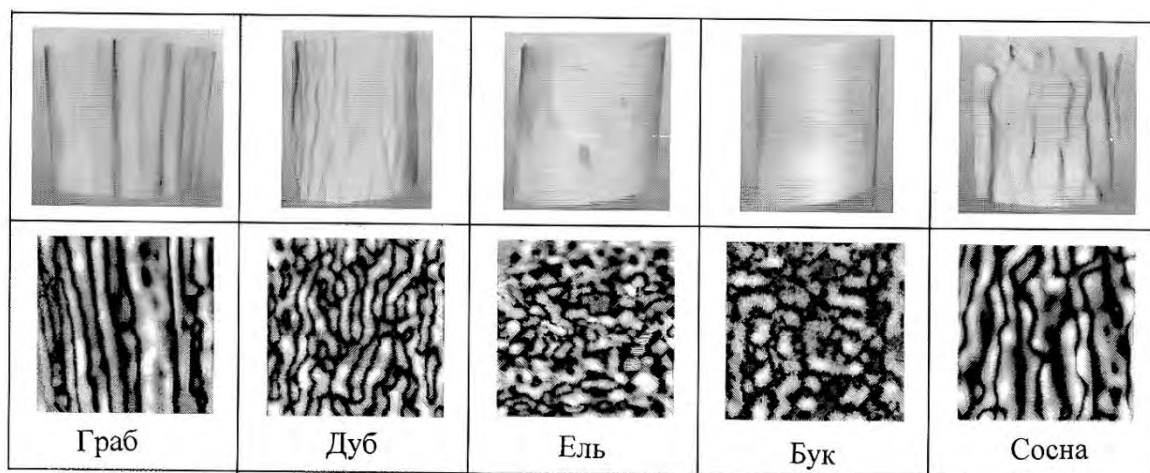


Рис. 117. Примеры трехмерных треугольных сеток (вверху) и карт высот профиля коры (внизу) для пяти древесных видов [Single tree species classification from Terrestrial Laser Scanning data for forest inventory, 2013]

Чтобы извлечь особенности текстуры из изображений высоты профиля коры для классификации текстур, были применены методы анализа текстур в 2D-формате. Из множества предложенных методов анализа текстур [Tuseryan, Jain, 1998] можно выделить четыре категории: структурные, статистические, основанные на моделях и на фильтрации (частотные и пространственно-частотные домены). Распространенные структурные, статистические и основанные на моделях методы анализируют интенсивность пикселей и их пространственное взаимодействие в небольшом окружении. Они используются в основном для анализа микротекстур и не подходят для макротекстур и описания свойств в различных масштабах. Более того, структурные, статистические и основанные на моделях методы могут оказаться неадекватными для естественных изображений, которые могут быть смоделированы с помощью квазипериодических сигналов [Chang, Kuo, 1993]. В данном случае наиболее подходящими были более современные методы анализа с несколькими разрешениями, основанные на вейвлет-преобразованиях и контурном преобразовании. Они позволяют фиксировать кромки и сглаженные контуры в разных направлениях и масштабах и были использованы при изучении классификационных характеристик в комбинации вейвлет-преобразований и контурного преобразования [Single tree species classification from Terrestrial Laser Scanning data for forest inventory, 2013].

Наиболее часто используемым вейвлет-преобразованием при обработке сигналов и изображений является дискретное вейвлет-преобразование (DWT). В стандартном DWT изображение разбивается на приближенное изображение и три детализированных, которые представляют собой вейвлет-коэффициенты мелкого масштаба в трех направлениях: горизонтальном, вертикальном и диагональном. Это достигается с помощью фильтров нижних частот для приближенного изображения и фильтров верхних

частот для детализированных изображений, за которыми следовала повторная выборка по двум операциям. Для получения следующего уровня декомпозиции использовано только приближенное изображение. Обычно декомпозицию представляют в виде бинарного дерева, где узлы соответствуют подпространствам с различной частотно-временной локализацией [Single tree species classification from Terrestrial Laser Scanning data for forest inventory, 2013].

Для анализа текстур в алгоритме дискретного вейвлет-преобразования отсутствуют две очень важные функции – избирательность по направлению и инвариантность к сдвигу. Действительно, названный алгоритм предоставляет информацию о границах только в трех направлениях. Более того, этот алгоритм представляет собой преобразование со сдвигом, которое означает, что между вейвлет-коэффициентами двух идентичных, но сдвинутых по времени сигналов имеется большая разница. В последние годы было предложено несколько модифицированных форм названного алгоритма, которые обеспечивали приближенные преобразования, не зависящие от сдвига, но они отличались высокой избыточностью выходной информации и требовали дорогостоящих вычислений. В отличие от этих модифицированных форм алгоритма, комплексное вейвлет-преобразование с двойным деревом (DT-CWT), представленное ранее [Kingsbury, 2001], обеспечивает приближенное преобразование, не зависящее от сдвига, с ограниченной избыточностью и эффективным временем вычислений. При этом использовались две отдельные декомпозиции или двойных дерева для вычисления значения комплексного преобразования: одно дерево для действительной части и другое для мнимой части. Конструкции фильтров в каждом дереве различны, и они должны удовлетворять определенным характеристикам [Kingsbury, 2001], чтобы преобразование происходило правильно [Single tree species classification from Terrestrial Laser Scanning data for forest inventory, 2013].

В 2D-алгоритме DT-CWT используются шесть вейвлет-фильтров для сбора информации в шести направлениях ($\pm 15^\circ$, $\pm 45^\circ$, $\pm 75^\circ$). Для улучшения направленности, чтобы улавливать текстурные особенности в двенадцати различных направлениях, было предложено совместно с 2D DT-CWT использовать ротированные комплексные 2D-вейвлет-фильтры (2D-RCWF) [Kokare, Biswas, Chatterji, 2007]. Было показано, что эффективность поиска текстурных изображений как с точки зрения точности, так и с точки зрения времени поиска улучшается при использовании совместного метода DT-CWT + DT-RCWF, по сравнению с DT-CWT [Single tree species classification from Terrestrial Laser Scanning data for forest inventory, 2013].

Алгоритм 2D DWT хорошо распознает кромки, но не может передать плавные контуры, присутствующие в естественных изображениях [Do, Vetterli, 2005]. В качестве решения для плавного определения контуров было предложено контурное преобразование, состоящее из двух последовательных этапов: первого этапа многомасштабного разложения по пирамиде

Лапласа, позволяющего получить грубое изображение и набор полосовых или детализированных изображений, за которым следует второй этап, на котором к полосовым изображениям применяется блок направленных фильтров для сбора информации о направлении движения [Single tree species classification from Terrestrial Laser Scanning data for forest inventory, 2013].

Классификация изображений выполнена с использованием классификатора «случайный лес» (*Random Forest*), предложенного Брейманом [Breiman, 2001] для классификации текстур и, следовательно, древесных видов. Данный классификатор состоял из набора деревьев решений. Каждое дерево решений строилось на основе набора векторов признаков, известного как исходные данные, и состоит примерно из двух третей случайно выбранных векторов признаков из обучающего набора с заменой или без замены. Оставшаяся треть, известная как исходные данные, используется для оценки ошибки классификации каждого отдельного дерева и всего «леса» в целом. Дерево выращивалось в полном объеме без обрезки при использовании в каждом узле наилучшего признака из случайного числа признаков, выбранных из данных для разделения узла. Количество деревьев, которые нужно вырастить, являлось параметром классификатора *RF*. Чтобы определить класс тестовой выборки, последняя проходила по всем деревьям. Каждое дерево имеет «голос», и класс, к которому принадлежала выборка, набирал максимальное количество голосов [Single tree species classification from Terrestrial Laser Scanning data for forest inventory, 2013].

Предложенный метод, описанный выше, оценивался на основе набора данных, состоящего из 46 выборок каждого из пяти видов деревьев, представленных на рис. 117. Это соответствовало набору данных из 230 выборок или изображений высоты профиля коры пяти видов деревьев. Было проведено несколько экспериментов, и для каждого применен метод стратифицированной случайной выборки, чтобы сформировать обучающий набор таким образом, чтобы все пять видов деревьев были представлены в равной степени. Две трети выборок использовались в качестве обучающих, а одна треть – в качестве тестовых. Классификация выполнена с применением порта *MatLab*¹³ классификатора «случайный лес» с рекомендуемыми значениями для количества деревьев и количества объектов, необходимых для разделения узла в процессе выращивания дерева решений [Single tree species classification from Terrestrial Laser Scanning data for forest inventory, 2013].

Таким образом, был предложен новый подход к классификации и распознаванию пяти видов деревьев с использованием данных наземного лидара. Метод основан на анализе трехмерной геометрической текстуры коры с множественным разрешением и применением классификатора «случайный лес». Для извлечения текстурных элементов были использованы три преобразования с несколькими разрешениями, и было проведено сравнение их характеристик. Для каждого эксперимента классификатор «случайный

¹³ randomforest-matlab // Coogle Code Archive : [website]. URL: <http://code.google.com/p/randomforest-matlab/> (date of accessed: 02.12.2025).

лес» запускался десять раз, и вычислялись как общая точность, так и стандартное отклонение. Полученные результаты показали, что алгоритм контурного преобразования дает наихудшую общую точность – 80,6 %, по сравнению с остальными тремя (DT-CWT, DT-RCWF и совместное преобразование DT-CWT + DT-RCWF), давшими общую точность соответственно 85,2; 84,7 и 86,9 %. Последние три преобразования также можно считать эквивалентными по производительности. Отмечено также, что сосна и граб – два вида, которые часто ошибочно принимались один за другого. В перспективе авторы планируют добавить больше признаков, оценить значимость каждого и применить методы снижения размерности к пространству признаков, чтобы повысить скорость классификации, сохранив при этом только наиболее значимые признаки [Single tree species classification from Terrestrial Laser Scanning data for forest inventory, 2013].

3.5. Оценка квалитетических показателей древесины по лазерным метрикам

Лазерное сканирование может обеспечить широкий спектр характеристик деревьев и древостоев для предсказания квалитетических показателей древесины с использованием данных как бортового [Predicting wood quantity and quality attributes of balsam fir and black spruce using airborne laser scanner data, 2014; Predictive modeling of black spruce (*Picea mariana* (Mill.) BSP) wood density using stand structure variables derived from airborne LiDAR data in boreal forests of Ontario, 2016], так и наземного [Modeling black spruce wood fiber attributes with terrestrial laser scanning, 2019] лазерных сканеров. Для оценки квалитетических показателей древесины для деревьев ели черной в Канаде были разработаны прогностические модели с использованием данных наземного лазерного сканирования [Modeling black spruce wood fiber attributes with terrestrial laser scanning, 2019]. Структурные характеристики модели высоты полога объяснили 67, 25 и 30 % изменчивости соответственно длины волокон, их угла наклона и модуля упругости, а среднее расстояние между деревьями обеспечило вклад 55 и 48 % в объяснение изменчивости соответственно угла наклона волокон и модуля упругости. В целом, исследование вклада данных наземного лазерного зондирования в оценку свойств древесных волокон показало [Modeling black spruce wood fiber attributes with terrestrial laser scanning, 2019], что более точная оценка параметров дерева, его кроны и непосредственного окружения с использованием средств наземного лазерного зондирования улучшила прогностическую способность полученных моделей для оценки основных свойств древесных волокон ели, по сравнению с возможностями традиционных полевых измерений. Наземное лазерное сканирование предоставляет информацию, выходящую за пределы того, что дает традиционная инвентаризация. Однако

остаются вопросы, требующие оперативного решения, а именно: автоматизация процессов извлечения данных из облака точек на уровне дерева и уменьшение последствий окклюзии (непроходимости сигнала) [Modeling black spruce wood fiber attributes with terrestrial laser scanning, 2019].

В развитие темы и в целях снятия имеющихся неопределенностей в Канаде было проведено исследование данных наземного лазерного сканирования для оценки мелкомасштабных структурных характеристик, связанных со свойствами древесных волокон [Predicting wood fiber attributes using local-scale metrics from terrestrial LiDAR data: A case study of Newfoundland conifer species, 2015]. Задачи состояли в том, чтобы: 1) установить ряд локальных структурных показателей, репрезентативных для мелкомасштабной структуры древостоя, по данным наземного лазерного сканирования; 2) разработать прогностические модели, использующие эти показатели для оценки четырех практически значимых свойств древесных волокон, а именно: плотности древесины, длины волокон, угла микрофибрилл и шероховатости древесины ели черной и пихты бальзамической в Ньюфаундленде.

Исследование было основано на двух основных предпосылках. Во-первых, известна значительная связь между структурными характеристиками насаждений и свойствами древесных волокон [Assessment of standing wood and fiber quality using ground and airborne laser scanning: a review, 2011], показанная также на уровне дерева [Molteberg, Hoibo, 2006; Swenson, Enquist, 2008; What do ecological regions tell us about wood quality? A case study in eastern Canadian white spruce, 2014]. Поэтому идея о том, что структурные характеристики могут быть связаны со свойствами древесных волокон на уровне пробной площади, была логическим продолжением предшествующих исследований.

Вторая предпосылка заключалась в том, что информация о локальной структуре древостоя могла быть извлечена из данных наземного лазерного сканирования и использована для прогнозирования свойств древесных волокон. Эта предпосылка была проверена на основе множественной линейной регрессии [Jacobs, Drew, 2002]. Установление статистических связей между структурными характеристиками, полученными по данным наземного лазерного сканирования, и измеренными свойствами древесных волокон явилось важным шагом в определении структурных показателей, которые нацелены на создаваемые системы бортового лазерного сканирования для поддержки картографирования свойств древесных волокон на крупных ландшафтах [Predicting wood fiber attributes using local-scale metrics from terrestrial LiDAR data: A case study of Newfoundland conifer species, 2015].

Для реализации целей моделирования [Predicting wood fiber attributes using local-scale metrics from terrestrial LiDAR data: A case study of Newfoundland conifer species, 2015] имелась обширная база данных о свойствах древесных волокон, полученных по кернам, взятым с деревьев непосредственно за пределами постоянных пробных площадей. В течение лета

2007–2010 гг. на острове Ньюфаундленд было отобрано 28 участков с преобладанием ели и 24 участка с преобладанием пихты. Один дополнительный участок рассматривался как смешанный вариант, внесший свой вклад в анализ обоих древесных видов. Выбор пробной площади осуществлялся на основе стратифицированной выборки обоих древесных видов с учетом класса высоты, плотности кроны и индекса качества участка в пределах лесного массива. Керны были извлечены на высоте груди у десяти деревьев, отобранных примерно в 10 м от угла пробы, где условия были наиболее репрезентативными для всей пробной площади [Predicting wood fiber attributes using local-scale metrics from terrestrial LiDAR data: A case study of Newfoundland conifer species, 2015]. Керны десяти деревьев на пробе проанализированы на современном оборудовании в лаборатории *FP-Innovations* в Ванкувере [Evaluated – a new resource for the pulp and paper industry in Canada, 2007]. Плотность древесины, грубость волокон и угол микрофибрилл измерялись с помощью *SilviScan*-системы приборов, использующих комбинацию оптической микроскопии, рентгеновской дифрактометрии и денситометрии, а также анализировались изображения для измерения свойств древесины [Downes, Wimmer, Evans, 2002; Schimleck, Evans, Matheson, 2002; From forest to product: New solutions for rapid, comprehensive wood and fibre analyses, 2007; Predicting wood fiber attributes using local-scale metrics from terrestrial LiDAR data: A case study of Newfoundland conifer species, 2015].

Оценки свойств древесных волокон для каждого модельного дерева были рассчитаны как средние значения всех колец, взвешенные по их площади. Затем оценки тех же свойств для пробной площади были рассчитаны как средние значения оценок деревьев, взвешенные по площади сечения модельных деревьев. На 53 пробных площадях было отсканировано наземным лазером *Zoller + Fröhlich Imager 5006i* большинство модельных деревьев с прилегающей к ним территории. В системе использована технология фазового сдвига для измерения расстояния каждого лазерного луча, направленного на диапазон потенциальных объектов, обнаруженных на расстоянии до 80 м. Таким образом были получены миллионы точек на полусферическом поле зрения. Лазерное устройство было установлено в нескольких положениях, чтобы обеспечить сканирование группы деревьев и их окружения с разных точек зрения для уменьшения окклюзии (непроходимости) сигнала [Norkinson et al., 2004]. Изображения получены с помощью четырех сканирований с позиций на внешнем пределе группы деревьев и одного сканирования в центре (рис. 118). Конечное число и положение сканов зависели от наличия просветов в пологе, и его прозрачность обеспечивала просмотр с наименьшим количеством окклюзий. Установка высокого разрешения (разрешение $0,036^\circ$ обеспечивало одну точку через каждые 6,3 мм на сфере радиусом 10 м) позволила системе получить от 30 до 100 млн точек на изображении в зависимости от сложности структуры полога. Из-за проблемы окклюзии и ограничений лазерного зондирования в лесных условиях были

просканированы не все модельные деревья пробных площадей. Тем не менее были идентифицированы все деревья с видимыми кронами.

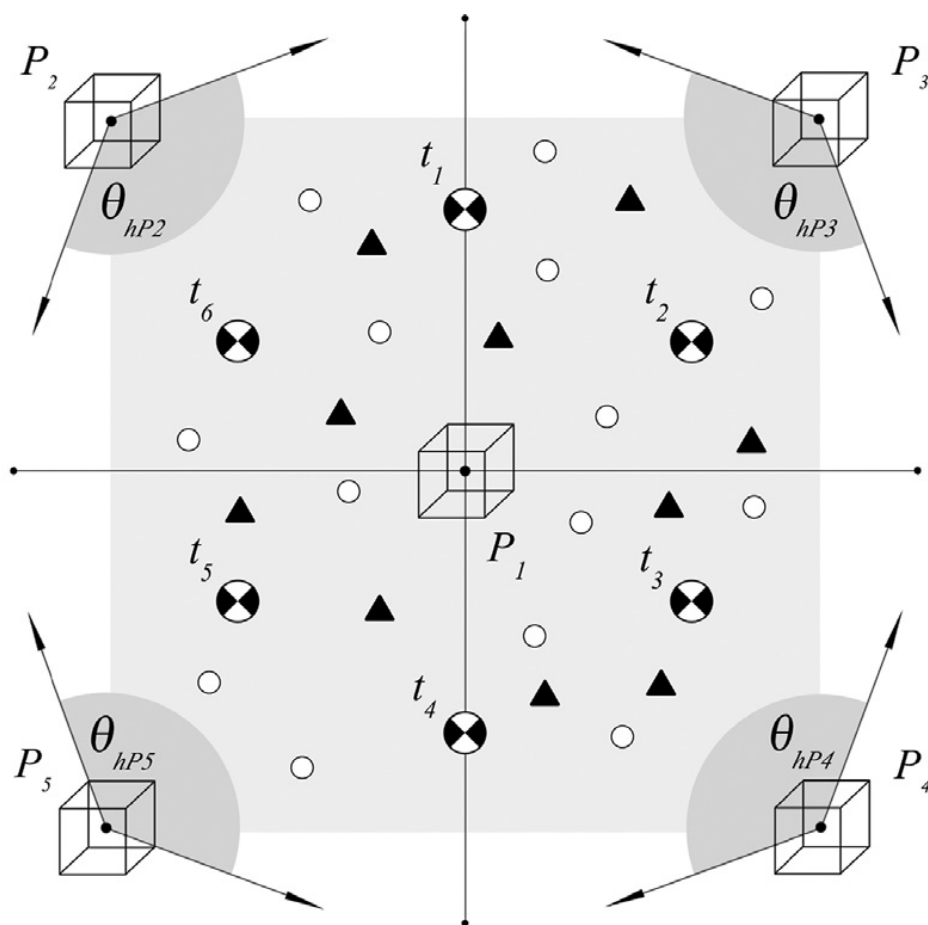


Рис. 118. Общая схема наземного лазерного сканирования [Predicting wood fiber attributes using local-scale metrics from terrestrial LiDAR data: A case study of Newfoundland conifer species, 2015]. Обозначения:

θ_{hPx} – сканер азимутального поля зрения;	▲ – модельные деревья;
P_x – положение сканера;	○ – остальные деревья
⊗ – цель настройки;	

Предварительная обработка данных наземного лазера включала настройку сканирования, удаление шума, разграничение изображений и нормализацию облаков точек. Для восстановления трехмерных изображений требовалась настройка сканирования, которая облегчалась использованием мишеней на всех пробных площадях. Процесс настройки требует наличия хорошей линии визирования между датчиком и целями и достаточно высокой плотности точек для правильной идентификации образа. В естественной лесной среде система *Zoller + Fröhlich Imager 5006i*, работающая с угловым разрешением $0,036^\circ$, обычно обеспечивает максимальное расстояние 12–13 м между датчиком и целью. В итоге получали 3D-изображение деревьев лесного полога на всех пробных площадях [Predicting

wood fiber attributes using local-scale metrics from terrestrial LiDAR data: A case study of Newfoundland conifer species, 2015].

Перед включением в множественные линейные регрессии каждая объясняющая переменная оценивалась отдельно и в сочетании с другими переменными [Tabachnick, Fidell, 1996]. Список перспективных моделей был составлен в соответствии с рабочими гипотезами, где каждая предложенная модель представляла потенциальную связь между переменными отклика. Объясняющие переменные включали четыре структурных переменных насаждения (т. е. структуру полога, конкуренцию, плотность деревьев и местную топографию), гарантирующие их способность предсказывать свойства древесных волокон. Построение полного набора перспективных моделей выполнено по трехэтапной процедуре [Predicting wood fiber attributes using local-scale metrics from terrestrial LiDAR data: A case study of Newfoundland conifer species, 2015]. Во-первых, в рамках каждой структурной переменной рассматривалась модель с одной или двумя переменными. Во-вторых, рассматривались дополнительные модели с использованием комбинаций различных структурных переменных. В-третьих, строилась обобщенная модель, включающая все объясняющие переменные, для сравнения с более простыми моделями [Mazerolle, 2006].

В результате выполненного корреляционного анализа составлен список потенциальных объясняющих переменных, которые далее использованы при разработке перспективных моделей. Вследствие взаимной корреляции были отобраны только шесть из первоначально предложенного набора данных наземного лазерного зондирования [Predicting wood fiber attributes using local-scale metrics from terrestrial LiDAR data: A case study of Newfoundland conifer species, 2015].

Для описания структуры полога из его характеристик были извлечены четыре показателя, относящиеся к размеру и форме ветвей крон деревьев и распределению листвы. В. Кейном с соавторами [Comparisons between field and LiDAR-based measures of stand structural complexity, 2010] был применен индекс Рампля как отношение 3D-изображения к 2D-проекции, который представляет собой безразмерный показатель, характеризующий структурную сложность древостоя на данной площади. Этот показатель характеризовал шероховатость поверхности кроны. Еще одной характеристикой, вычисленной на основе модели поверхности, был индекс отношения объема полога к площади его проекции. Дополнительными характеристиками были средняя высота полога и ее стандартное отклонение [Predicting wood fiber attributes using local-scale metrics from terrestrial LiDAR data: A case study of Newfoundland conifer species, 2015].

Среднее значение высоты древостоя и индекс Рампля были выбраны для наилучшего представления структуры кроны, в то время как отношение ближайших соседей и густота деревьев были сохранены для наилучшего представления о их конкуренции. Из других переменных были выбраны

только стандартное отклонение плотности надземной части и разница в высоте полога, т. к. другие показатели были сильно коррелированы. Поскольку корреляции между структурными переменными были одинаковыми для обоих видов, для моделирования свойств древесных волокон рассматривалась одна и та же структура модели [Predicting wood fiber attributes using local-scale metrics from terrestrial LiDAR data: A case study of Newfoundland conifer species, 2015].

Результаты сравнительного анализа по индексу Акаике [Akaike, 1974] позволили оценить степень адекватности каждой предложенной модели по отношению к остальным. Для каждого свойства древесных волокон по каждому древесному виду модель с самым низким индексом представляла собой «лучшую» из оцениваемых моделей. Эти модели представляли комбинированные структурные характеристики древостоя, включая структуру полога, конкуренцию и местную топографию [Predicting wood fiber attributes using local-scale metrics from terrestrial LiDAR data: A case study of Newfoundland conifer species, 2015].

Выбор модели с использованием индекса Акаике отличается от классических процедур исключения переменных. Во-первых, этот подход минимизирует количество параметров (компромисс между точностью и сложностью модели). Во-вторых, выбор модели не основывается на критериях значимости, а скорее сравнивает несколько рабочих гипотез, которые трудно проверить с помощью традиционного статистического подхода с использованием пошаговой регрессии. В действительности выводы, использующие процедуры исключения переменных, могут отличаться в зависимости от порядка, в котором рассчитываются модели [Mazerolle, 2006]. В-третьих, можно использовать всю информацию из набора перспективных моделей вместо того, чтобы полагаться на одну модель. Хотя не было достигнуто одинакового уровня точности в прогнозировании свойств древесных волокон для обоих древесных видов, полученные результаты подтверждают взаимосвязь между свойствами древесных волокон каждого вида и локальными структурными характеристиками древостоев [Predicting wood fiber attributes using local-scale metrics from terrestrial LiDAR data: A case study of Newfoundland conifer species, 2015].

Полученные результаты также показали, что существует согласованность перспективных моделей в пределах древесного вида. Минимальное значение коэффициента корреляции (0,55) наблюдалось между длиной волокна у ели и плотностью древесины, но для других признаков большинство значений было выше, достигая 0,84 между плотностью древесины и шероховатостью. Угол микрофибрилл у ели имел тенденцию повышения с увеличением значений соотношения ближайших соседей, представляющего собой отношение наблюдаемого расстояния между деревьями к ожидаемому расстоянию для данной пробной площади. Меньшие коэффициенты означали более высокую конкуренцию за пространство между соседними дере-

вьями в предположении, что меньшая конкуренция между деревьями определяет больший угол микрофибрилл и, следовательно, менее плотную древесину. Таким образом, участки, характеризующиеся высокой изменчивостью плотности надземной фитомассы, положительно коррелировали с более высокой длиной волокон [Predicting wood fiber attributes using local-scale metrics from terrestrial LiDAR data: A case study of Newfoundland conifer species, 2015].

Перспективные модели, выбранные для прогнозирования свойств древесных волокон у пихты, имели меньшие показатели адекватности, чем те, которые были выбраны для ели. Все выбранные модели имели от одной до трех структурных независимых переменных. Полученные результаты свидетельствуют о том, что локальные структурные переменные древостоя позволяют прогнозировать свойства древесных волокон [Predicting wood fiber attributes using local-scale metrics from terrestrial LiDAR data: A case study of Newfoundland conifer species, 2015].

Ранее проведенные исследования устанавливали связь между свойствами древесных волокон, с одной стороны, и диаметром ствола, высотой кроны и густотой древостоя, с другой [Liu et al., 2007; Assessment of standing wood and fiber quality using ground and airborne laser scanning: a review, 2011; Prediction of wood quality in small-diameter Douglas-fir using site and stand characteristics, 2013], но полученные результаты были фрагментарны и сосредоточены либо на разных свойствах древесных волокон, либо на разных древесных видах и обычно на локальном уровне, нетипичном для градиентов пространственно распределенных экосистем.

Выполненное исследование [Predicting wood fiber attributes using local-scale metrics from terrestrial LiDAR data: A case study of Newfoundland conifer species, 2015] основывалось на идентификации структурных переменных, извлеченных из облаков точек наземного лазерного зондирования, которые могут служить объясняющими переменными для прогнозирования свойств древесных волокон у ели и пихты. Объяснительная способность моделей достигала 72 % при оценке угла микроволокон и 65 и 62 % соответственно при определении длины волокна и плотности древесины. Их объяснительная способность для пихты была ниже, чем для ели: при оценке угла микроволокон – 63 %, при определении длины волокна и плотности древесины – 36 и 45 %. Полученные результаты показали, что у обоих древесных видов высокая прогностическая способность при оценке свойств древесных волокон может быть достигнута с использованием локальных структурных переменных древостоя, таких как показатели конкуренции деревьев, структура полога и местная топография. Разработка картографических продуктов с переменными регионального масштаба (например, климат и география) в сочетании с возможностями дистанционного зондирования локальных структурных переменных древостоев обеспечивает поддержку мелкомасштабного картографирования [Predicting wood fiber attributes using local-

scale metrics from terrestrial LiDAR data: A case study of Newfoundland conifer species, 2015].

3.6. Оценка биомассы деревьев по лазерным метрикам

В опубликованных картах накопления углерода в тропических регионах на разных континентах [Benchmark map of forest carbon stocks in tropical regions across three continents, 2011; Estimated carbon dioxide emissions from tropical deforestation improved by carbon-density maps, 2012] были показаны существенные различия в отображаемых показателях надземной биомассы, особенно в районах с небольшим количеством полевых (фактических) данных [Uncertainty in the spatial distribution of tropical forest biomass: a comparison of pan-tropical maps, 2013]. Совершенствование полевых методов является ключом к снижению неопределенности в глобальном картографировании биомассы, и необходимо уделять больше внимания ее измерению на пробных площадях вместо оценки надземной биомассы по традиционным аллометрическим уравнениям [High-fidelity national carbon mapping for resource management and redd+, 2013].

Современные полевые методы оценки надземной биомассы лесов, как правило, основаны на аллометрических зависимостях биомассы от диаметра ствола и высоты дерева [Bi, Turner, Lambert, 2004; Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees, 2014]. Этот аллометрический подход может быть эффективным при применении в пределах диапазона исходных данных, но может привести к значительным смещениям при составлении широкомасштабных карт биомассы, особенно за счет крупных деревьев, которые содержат большую часть биомассы, но редко участвуют в построении аллометрических моделей [Rate of tree carbon accumulation increases continuously with tree size, 2014]. Техника наземного лазерного сканирования может служить отличным инструментом для оценки структуры насаждения и трехмерного распределения его компонентов [Implications of sensor configuration and topography on vertical plant profiles derived from terrestrial lidar, 2014]. Она позволяет анализировать структуру насаждения с высокой детализацией и потенциально может уменьшить смещения при расчете надземной биомассы, поскольку позволяет напрямую оценить общий объем ветвящихся структур деревьев, в частности на основе воксельных моделей [Hosoi, Nakai, Omasa, 2013].

В открытых эвкалиптовых насаждениях Австралии были проведены исследования по оценке надземной биомассы 65 деревьев на основе лидарных метрик в сопоставлении с полевыми (фактическими) данными и с аллометрическими моделями [Nondestructive estimates of above-ground biomass using terrestrial laser scanning, 2015]. На основе данных наземного лидара были получены значения высоты дерева, диаметра ствола на высоте груди

и надземной биомассы в два этапа: 1) извлечение отдельных деревьев из зарегистрированного облака точек сканера; 2) получение необходимых параметров для извлеченного дерева.

Метрики деревьев были извлечены из зарегистрированных облаков точек сканера *RIEGL VZ-400* с помощью полуавтоматического подхода. Для сравнения были использованы аллометрические модели, полученные в культурах эвкалипта [Development and testing of allometric equations for estimating above-ground biomass of mixed-species environmental plantings, 2013] с коэффициентами детерминации, варьирующими от 0,93 до 0,98. Их применение к естественным насаждениям в данном исследовании показало, что они занижают надземную биомассу деревьев на 30–37 % по отношению к фактическим (полевым) данным (рис. 119). При 100 %-м соответствии все точки должны были лежать строго на диагональной линии, а не под ней [Nondestructive estimates of above-ground biomass using terrestrial laser scanning, 2015].

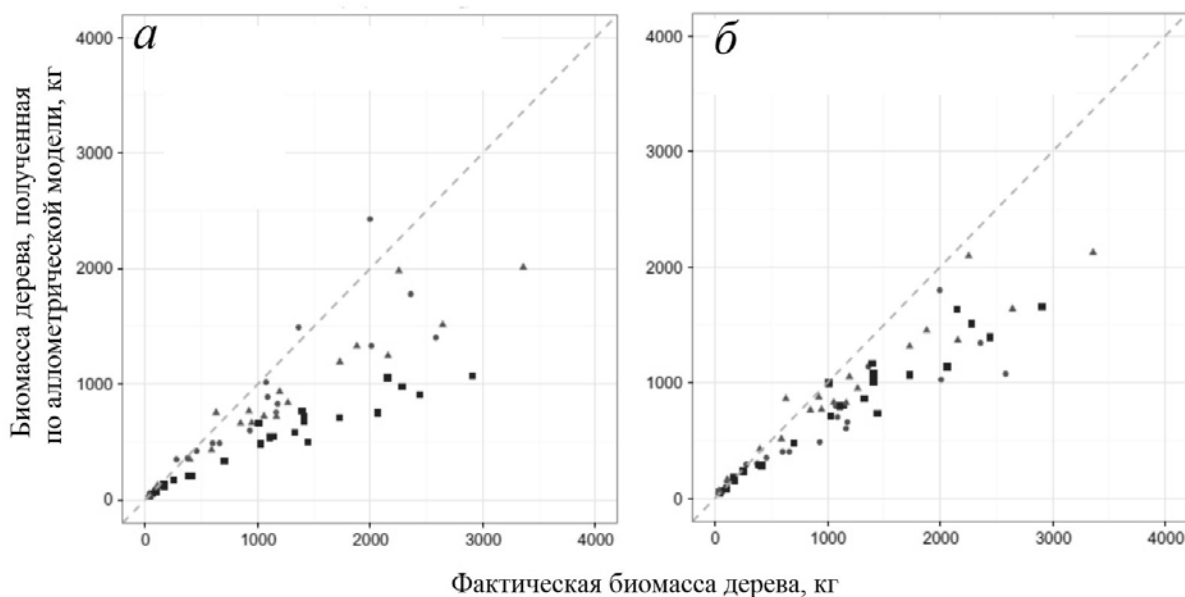


Рис. 119. Соотношение надземной биомассы дерева, полученной на пробных площадях и по аллометрическим моделям, рассчитанным: *а* – по каждому виду эвкалипта отдельно; *б* – по модели, обобщенной для трех видов эвкалипта [Nondestructive estimates of above-ground biomass using terrestrial laser scanning, 2015]

Непосредственно из облака данных наземного лидара с помощью количественных структурных моделей (QSM) определен объем скелетных частей дерева, и на основе этих оценок объема и базисной плотности определена надземная биомасса. QSM – это геометрическая модель, представляющая дерево в виде набора иерархически расположенных цилиндров (структурных сегментов), позволяющая реконструировать 3D-модели деревьев из облаков точек для извлечения значений объема дерева, т. е. скелетных ветвей и ствола [Non-destructive tree volume estimation through quantitative structure

modelling: Comparing UAV laser scanning with terrestrial LiDAR, 2019; Reduced model complexity for efficient characterisation of savanna woodland structure using terrestrial laser scanning, 2023].

Соотношение расчетных и фактических показателей надземной биомассы деревьев показано на рис. 120.

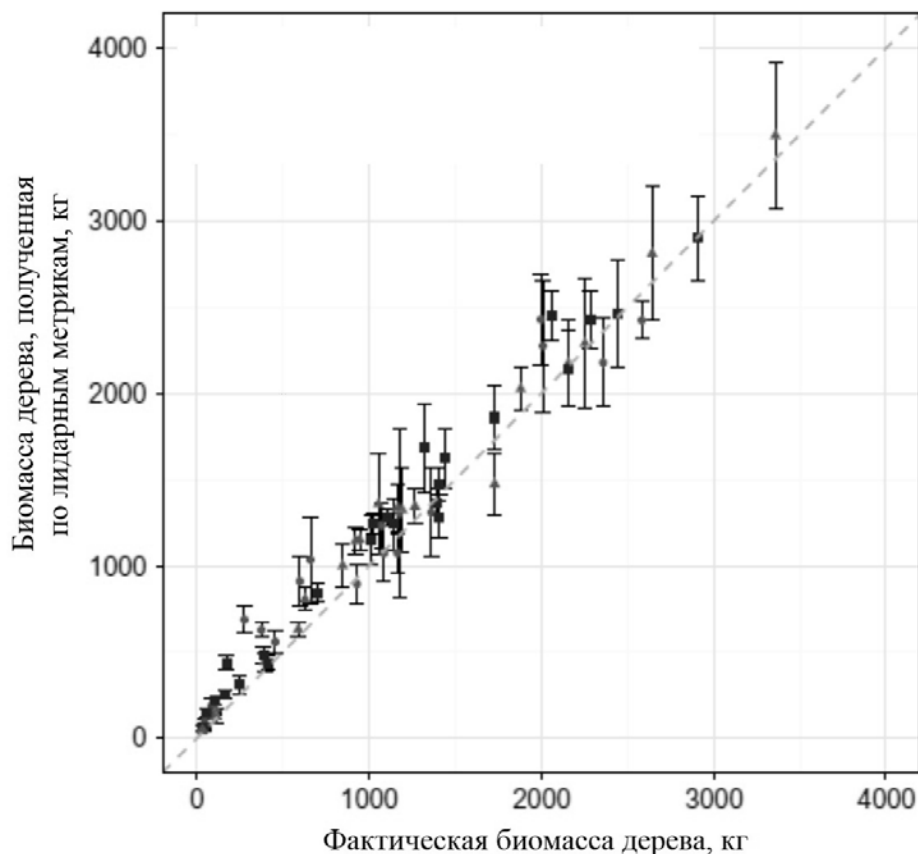


Рис. 120. Соотношение надземной биомассы дерева, фактически полученной на пробных площадях и рассчитанной по лидарным метрикам [Nondestructive estimates of above-ground biomass using terrestrial laser scanning, 2015]

При этом коэффициент соответствия фактическим данным составил 0,98, тогда как коэффициенты соответствия данных, рассчитанных по аллометрическим моделям, как показано на рис. 119, *а*, *б*, были соответственно 0,68 и 0,78. Если общая оценка биомассы по аллометрическим моделям была занижена на 30–37 %, то оценка биомассы, полученная по лидарным метрикам, оказалась несколько завышенной (на 9,7 %), при этом увеличения смещения по мере увеличения диаметра ствола не происходило [Nondestructive estimates of above-ground biomass using terrestrial laser scanning, 2015]. Аналогичный феномен был установлен на примере ели европейской в Финляндии (рис. 121): увеличение смещения биомассы, ранее оцененной по аллометрической модели [Repola, 2009], по мере роста размера дерева и отсутствие смещения при оценке биомассы по облаку точек лидара [Biomass estimation of individual trees using stem and crown diameter TLS measurements, 2011].

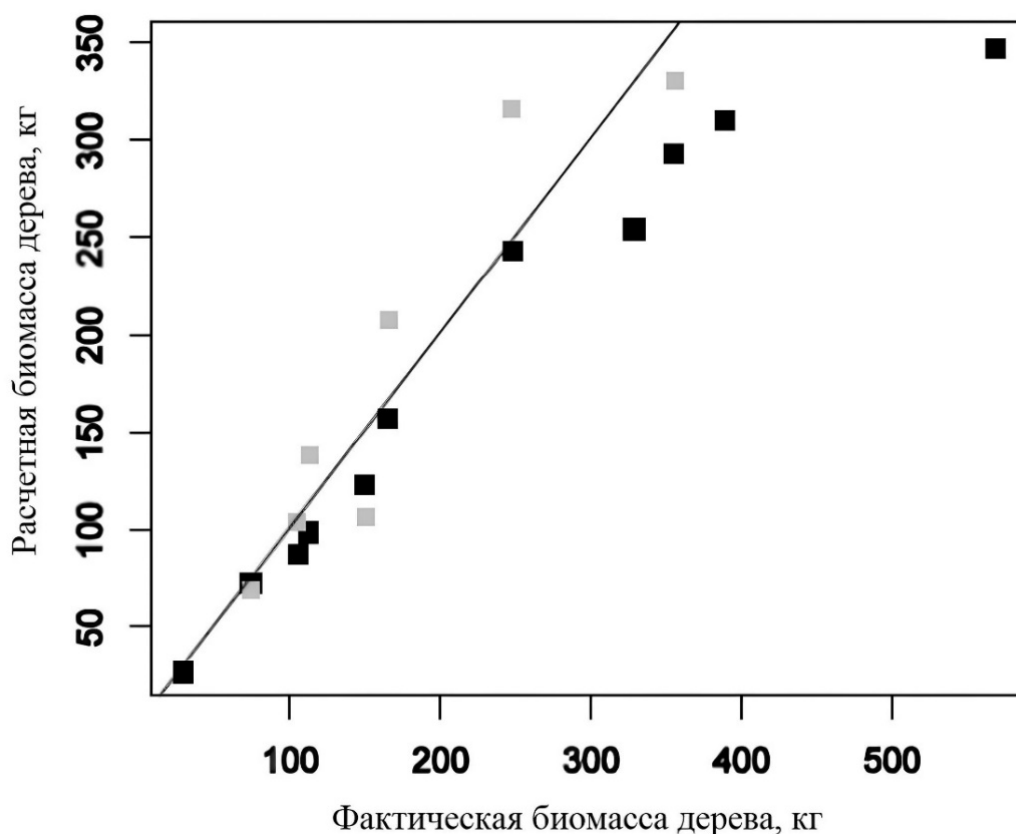


Рис. 121. Соотношение надземной биомассы дерева ели европейской, фактически полученной на пробных площадях и рассчитанной по метрикам наземного лидара (серые квадраты) [Biomass estimation of individual trees using stem and crown diameter TLS measurements, 2011] и по аллометрической модели (черные квадраты) [Repola, 2009]

Аналогичное исследование было выполнено на северо-западе Китая в пойме реки Тарим в насаждениях тополя евфратского, или туранги евфратской (*Populus euphratica* Oliv.) с использованием наземного лидара Riegl VZ-1000 (рис. 122). Если в предыдущей работе [Nondestructive estimates of above-ground biomass using terrestrial laser scanning, 2015] выполнялось сопоставление надземной биомассы, рассчитанной по облакам точек согласно структурной модели QSM, с фактической биомассой, измеренной в полевых условиях, а затем было показано смещение оценок при сопоставлении надземной биомассы, полученной по ранее опубликованной аллометрической модели, с той же фактической биомассой, то в данном исследовании для оценки надземной биомассы применен иной подход [Developing new allometric models for estimating aboveground woody biomass and volume of *Populus euphratica* using terrestrial laser scanning, 2025].

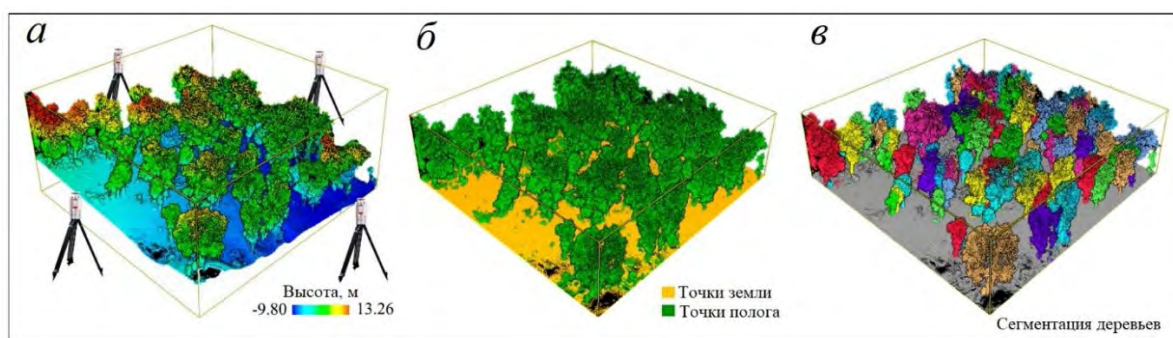


Рис. 122. Схема последовательной обработки облака точек лидара *Riegl VZ-1000* для типичного насаждения тополя евфратского; *а* – облако точек сканера, установленного в четырех позициях; *б* – классификация облака точек и нормализация высот; *в* – результаты сегментации деревьев (обозначены разными цветами) [Developing new allometric models for estimating aboveground woody biomass and volume of *Populus euphratica* using terrestrial laser scanning, 2025]

Целями данного исследования были: 1) получение объемных компонентов и надземной биомассы деревьев тополя с использованием облака точек лидара *Riegl VZ-1000*; 2) разработка новых моделей надземной биомассы, основанных на структурных параметрах дерева, полученных из облака точек лидара; 3) оценка точности вновь разработанных аллометрических моделей наряду с ранее опубликованными, которые были рассчитаны по фактическим полевым замерам. Объемы стволов и ветвей деревьев были реконструированы с помощью продукта *TreeQSM V.2.4.0* [Fast automatic precision tree models from terrestrial laser scanner data, 2013], реализованного в *MATLAB V.2023a*. Скелетные (структурные) части дерева в безлистном состоянии были воспроизведены сканером с четырех позиций с разделением на стволы и ветви по градиентам толщины – первичные, вторичные и третичные (рис. 123). Для перевода полученных значений объема в показатели надземной биомассы использованы ранее полученные на тех же объектах значения базисной плотности древесины [Estimation of annual biomass of individual *Populus euphratica* based on tree-ring data, 2018; The influence of trunk cavity on tree vitality and heartwood/sapwood characteristics of *Populus euphratica* Oliv., 2021].

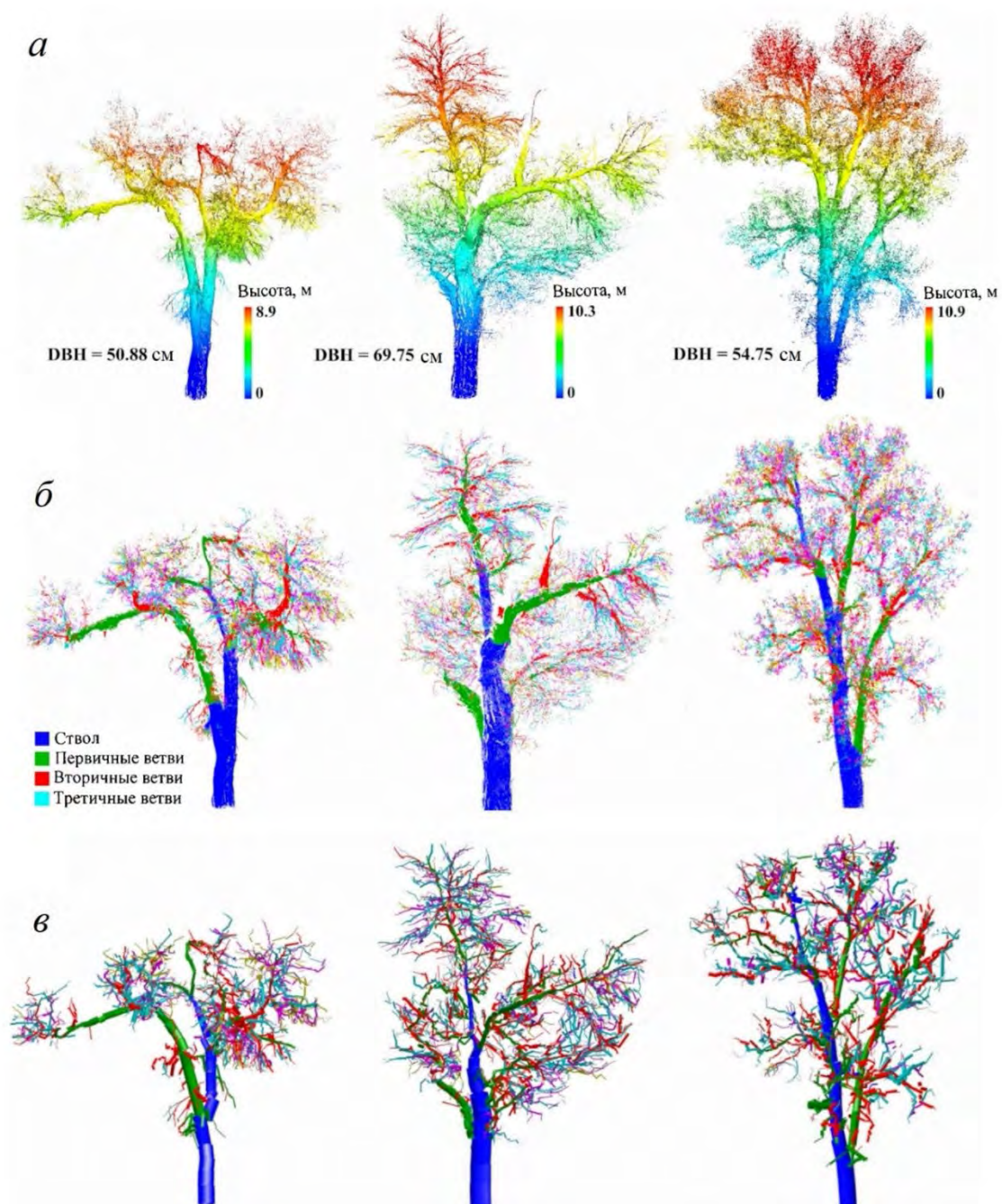


Рис. 123. Оценка объема скелетных элементов деревьев тополя с различной структурой кроны с использованием модели QSM: *а* – исходное облако точек сканера для отдельных деревьев; *б* – сегментация ствола и ветвей с использованием модели QSM; *в* – реконструкция объема скелетных элементов дерева с использованием модели QSM [Developing new allometric models for estimating aboveground woody biomass and volume of *Populus euphratica* using terrestrial laser scanning, 2025]

По полученным сканером облакам точек были разработаны новые аллометрические модели, в которых, в отличие от моделей, представленных в предыдущей работе [Nondestructive estimates of above-ground biomass using terrestrial laser scanning, 2015], и зависимые, и независимые переменные были выявлены по лидарным данным. В частности, зависимая переменная

представлена значением надземной биомассы, определенным по облакам точек с использованием модели QSM, а зависимые переменные оценены непосредственно по облакам точек сканера. Из всех независимых переменных наилучший результат оценки надземной биомассы показала комбинированная переменная как произведение высоты дерева на квадрат диаметра ствола на высоте груди ($R^2 = 0,95$) (рис. 124, а). Для сравнения вместо вновь построенной аллометрической модели использована ранее опубликованная модель той же структуры, полученная по фактическим полевым замерам для тополя в том же районе [Chen, Li, 1984], и результат сопоставления показан на рис. 124, б. Величина коэффициента детерминации ($R^2 = 0,94$), как и в предыдущем случае, показала хорошее соответствие, однако вновь разработанное аллометрическое уравнение для надземной биомассы снизило стандартную ошибку на 40 %, по сравнению с предыдущей моделью, обеспечивая более точную оценку биомассы за счет учета крупных деревьев с диаметром ствола более 34 см.

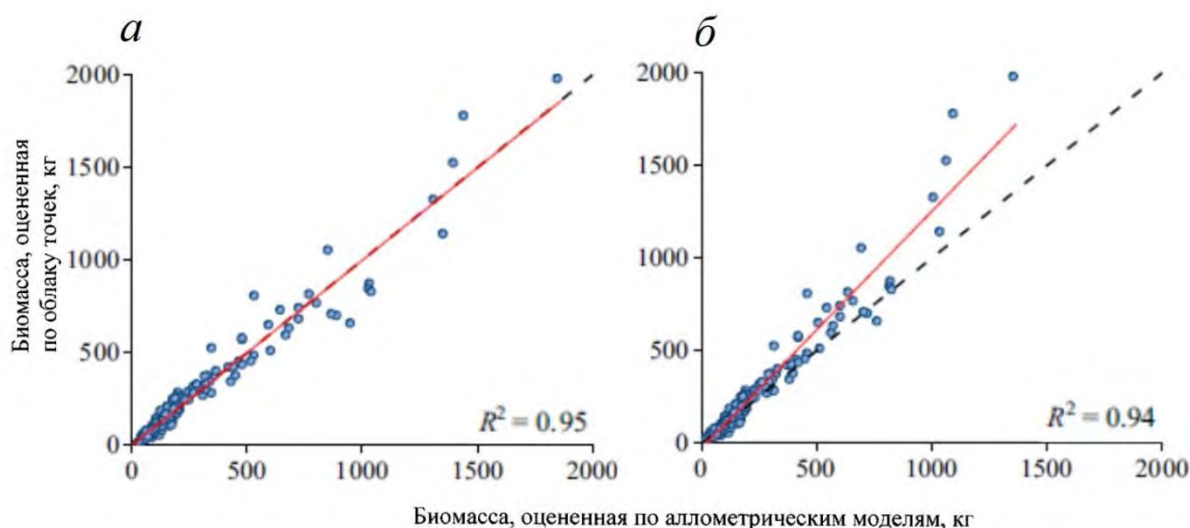


Рис. 124. Сопоставление значений надземной биомассы, полученной по облакам точек сканера и предсказанной аллометрическими уравнениями: а – сравнение надземной биомассы, полученной по облакам точек, с ее оценками по вновь полученному аллометрическому уравнению; б – сравнение надземной биомассы, полученной по облаку точек, с ее оценками по ранее опубликованному аллометрическому уравнению [Developing new allometric models for estimating aboveground woody biomass and volume of *Populus euphratica* using terrestrial laser scanning, 2025]

При сопоставлении рис. 124, а, б очевидно, что, как и в предыдущих работах [Repola, 2009; Biomass estimation of individual trees using stem and crown diameter TLS measurements, 2011; Nondestructive estimates of above-ground biomass using terrestrial laser scanning, 2015], модели, рассчитанные по фактическим полевым результатам, дают заниженные оценки надземной биомассы, по сравнению с ее оценками, полученными по облакам точек наземного сканера. Применительно к тополю евфратскому в данном случае, как и в предыдущих результатах, смещение обусловлено тем, что модели, рассчитанные по полевым замерам, имеют более узкий диапазон применимости: диапазон диаметра ствола, измеренного по облакам точек, был от 5

до 105 см, тогда как в ранее опубликованной модели [Chen, Li, 1984] – от 3 до 34 см. Известно, что аллометрические модели точно предсказывают биомассу только в пределах диапазона имеющихся размеров, включая самые крупные деревья, обработанные на пробных площадях «деструктивным» методом [Error propagation and scaling for tropical forest biomass estimates, 2004; Colgan, Asner, Swemmer, 2013].

Таким образом, использование наземных лидаров позволило измерять деревья в более широком диапазоне их размеров, по сравнению с тем, что ранее было получено путем применения «деструктивного» способа, и в итоге были получены более надежные модели, по сравнению с существующими. Вновь разработанная модель оценки надземной биомассы по облакам лидарных точек существенно повысила ее точность, которая обеспечивает надежный мониторинг лесной биомассы, необходимый для оценки состояния лесных экосистем на региональном уровне.

Наземное лазерное сканирование позволяет не только проверять имеющиеся аллометрические уравнения, но и использовать трехмерные данные облаков точек для разработки и тестирования новых аллометрических соотношений. Это важно, поскольку крупные деревья вследствие сравнительно большей трудоемкости при оценке их биомассы часто игнорируются при расчете аллометрических моделей, что приводит к повышенным смещениям по мере увеличения диаметра ствола. Проведенное исследование также показывает, что измерения наземного лидара могут быть эффективно смоделированы с помощью количественных структурных моделей. Этот метод может быть применен во многих типах насаждений и может быть полезным при калибровке и валидации широкомасштабных карт биомассы.

Выводы по главе 3

Лазерное наземное сканирование открывает новые возможности в лесном деле. Быстрый сбор данных с высоким разрешением и точностью позволяет получать необходимую информацию о лесных насаждениях, а также параметры, описывающие такие характеристики деревьев, как диаметр ствола и кроны, высота дерева, сбег ствола, количество ветвей и т. д. Применение наземных лазеров перспективно при архитектурном анализе деревьев с целью выявления эндогенных процессов роста и отделения их от пластичных реакций вследствие внешних воздействий. Он основан на изучении того, как функционирует меристема каждой оси и как устанавливаются иерархические отношения между осями. Архитектура дерева может быть показана формальной моделью, называемой многомасштабным графическим представлением дерева. При этом лазерные оценки диаметров ствола и ветвей объясняют до 93 % изменчивости их диаметров, измеренных вручную. При сканировании деревьев в двух ракурсах – фронтальном и в надире – соотношение двух их оценок (высоты дерева и ширины кроны) совпадает соответственно на 97 и 96 %.

Наземное лазерное сканирование дает возможность получать уровни детализации, далеко превосходящие возможности бортового лазерного сканирования. Из-за больших объемов данных и их высокого информационного потенциала имеет решающее значение автоматизированная обработка облаков точек наземного лазерного сканирования. Приложение *3DForest* является одним из немногих программных продуктов, который при автоматической регистрации формы крон, их объемов и взаимного перекрытия по трехмерным облакам лазерных точек обеспечил точность 93 %. Наземные лазерные устройства обеспечивают также автоматическое распознавание древесных видов на основе анализа геометрических вариаций или геометрической текстуры трехмерной поверхности коры с использованием классификатора «случайный лес» и алгоритма обработки сигналов на основе комплексного вейвлет-преобразования.

Лазерное наземное сканирование обеспечивает широкий спектр предсказанных характеристик деревьев и древостоев, в том числе квалитетических показателей – плотности древесины, длины волокон и угла микрофибрилл – путем их связи с лазерными оценками структурных характеристик деревьев. Объяснительная способность моделей при оценке угла микроволокон, длины волокна и плотности древесины достигала соответственно 72, 65 и 62 %.

Современные методы оценки надземной биомассы лесов и их углерод депонирующего потенциала обычно основаны на аллометрических зависимостях биомассы от диаметра ствола и высоты дерева. Этот аллометрический подход может быть эффективным при применении в пределах диапазона исходных данных, но может привести к значительным смещениям при составлении широкомасштабных карт биомассы, особенно за счет крупных деревьев, которые содержат большую часть биомассы, но редко участвуют в построении аллометрических моделей. Техника наземного лазерного сканирования служит отличным инструментом для оценки структуры насаждения и трехмерного распределения компонентов его биомассы. Она позволяет анализировать структуру деревьев с высокой детализацией и уменьшить смещения при расчете биомассы, поскольку напрямую оценивает общий объем ветвящихся структур деревьев, в частности на основе структурной модели QSM.

Таким образом, наземное лазерное сканирование позволяет не только проверять имеющиеся аллометрические уравнения, но и использовать трехмерные данные облаков точек для разработки и тестирования новых аллометрических соотношений. Правда, структурная модель QSM не обеспечивает оценки биомассы ассимиляционных органов деревьев, и вышеизложенные результаты относятся к надземной биомассе только скелетной части полога.

ГЛАВА 4. ОЦЕНКА МОРФОСТРУКТУРЫ ДЕРЕВЬЕВ ПОСРЕДСТВОМ СОВМЕСТНОГО СКАНИРОВАНИЯ БОРТОВЫМ И НАЗЕМНЫМИ ЛИДАРАМИ

Оценка морфоструктуры деревьев посредством совместного сканирования бортовым и наземными лидарами включает в себя анализ морфологических показателей дерева при разновременном (несовмещенном) его сканировании бортовым и наземными лидарами, регистрацию морфологических показателей дерева при одновременном (совмещенном) его сканировании бортовым и наземными лидарами, а также наземную и бортовую лидарные оценки морфологии и запаса горючих материалов в кроне, необходимых при моделировании лесных пожаров.

4.1. Оценка морфологических показателей дерева при разновременном (несовмещенном) его сканировании бортовым и наземными лидарами

Традиционные методы исследования параметров леса, таких как высота дерева, высота основания кроны, диаметр на высоте груди и диаметр кроны, требуют проведения трудоемких измерений деревьев с многоступенчатыми схемами выборочного учета [Shivers, Borders, 1996]. Бортовые лазерные сканеры могут использоваться для детального изучения вертикальной и горизонтальной структуры леса посредством сканирования лазерными импульсами [Lefsky, Cohen, 2003], а также позволяют прогнозировать лесную биомассу и запасы углерода. Лазерное сканирование было признано более эффективным и точным инструментом, по сравнению с полевыми исследованиями и оптическими методами дистанционного зондирования [Dubayah, Drake, 2000; Lidar remote sensing for ecosystem studies, 2002].

Однако оценка структурных параметров деревьев на основе импульсно-периодического бортового сканирования страдает от ряда проблем, связанных с влиянием густоты древостоя, перекрытием крон, трудностями с регистрацией верхушек деревьев и нижнего яруса [Characterizing vertical forest structure using small-footprint airborne LiDAR, 2003; Estimating stem volume and biomass of *Pinus koraiensis* using LiDAR data, 2010]. Поэтому оценки высоты деревьев, полученные с помощью бортового сканирования, как правило, несколько занижены, по сравнению с полевыми измерениями. Данные бортового сканирования с минимальными размерами лазерного следа могут оказаться бесполезными при регистрации нижнего яруса [Parker, Harding, Berger, 2004; Quantifying Australian forest floristics and structure using small footprint LiDAR and large scale aerial photography, 2006].

С другой стороны, наземное сканирование лазером непрерывного действия по фазовому сдвигу волны позволяет точно оценивать структуру лесного полога. Однако процедура сбора данных с помощью наземного сканирования является трудоемкой при использовании на обширной лесной территории, вследствие чего она проводилась только на относительно небольших пробных площадях [Automatic determination of forest inventory parameters using terrestrial laser scanning, 2003; Hopkinson et al., 2004; Thies, Spoecker, 2004]. Кроме того, высокий процент лазерных импульсов перехватывается подлеском и нижней частью полога, что сокращает количество импульсов, достигающих верхней части полога [Combining airborne and terrestrial laser scanning technologies to measure forest understorey volume, 2017].

Поскольку геометрия обзора при бортовом сканировании не обеспечивает полной регистрации стволов вследствие перекрытия их пологом, в дополнение к бортовому стали применять наземное лазерное сканирование для наблюдения за вертикальной структурой насаждения из-под полога, когда облака точек смещены в сторону его нижней части, что обеспечивает лучшую сегментацию как нижней части основного полога, так и нижнего яруса [Automatic stem mapping using single-scan terrestrial laser scanning, 2012; International benchmarking of terrestrial laser scanning approaches for forest inventories, 2018].

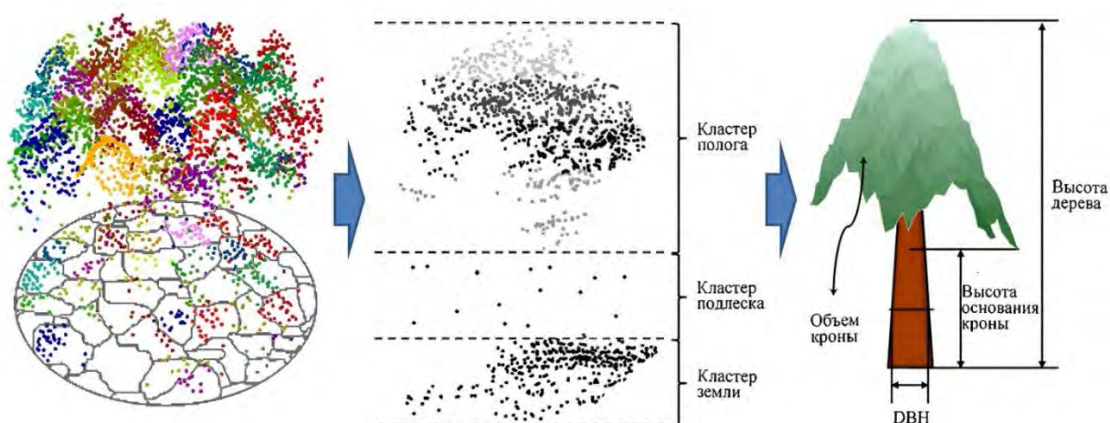


Рис. 125. Схема определения структурных характеристик деревьев бортовым лидаром [Estimating crown variables of individual trees using airborne and terrestrial laser scanners, 2011]

Чтобы преодолеть недостатки двух методов, была предпринята попытка объединить на пробных площадях данные бортового и наземного сканирования, чтобы оценить такие показатели, как высота дерева, высота основания кроны, площадь проекции кроны и ее геометрический объем. Для этого на территории Южной Кореи были выбраны насаждения кедра корейского невысокой сомкнутости, на которых срублены и обработаны 30 модельных деревьев, из них 15 – для расчета аллометрических уравнений и 15 – для их верификации [Estimating crown variables of individual trees using

airborne and terrestrial laser scanners, 2011]. Бортовое сканирование деревьев выполнено лидаром *ALTM 3070* (рис. 125), а наземное – сканерами *GS200 3D* (рис. 126, 127).

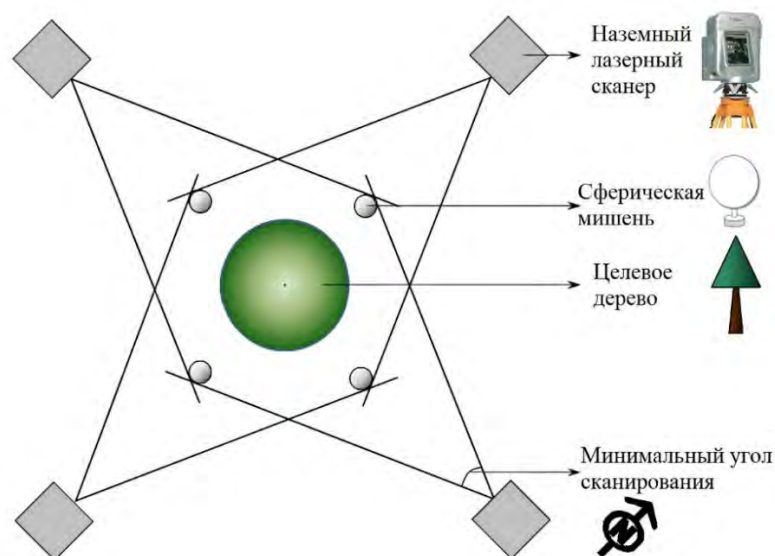


Рис. 126. Схема получения данных наземного лазерного сканирования с четырех направлений [Estimating crown variables of individual trees using airborne and terrestrial laser scanners, 2011]

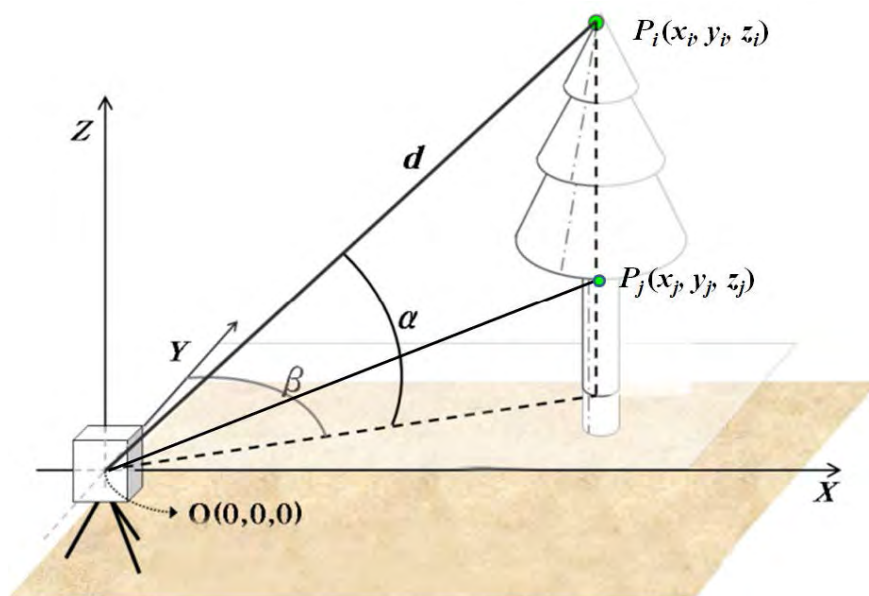


Рис. 127. Схема определения структурных характеристик деревьев наземным лидаром [Estimating crown variables of individual trees using airborne and terrestrial laser scanners, 2011]

По лазерным метрикам, полученным бортовым и наземным сканированиями, рассчитаны парные линейные зависимости [Estimating crown variables of individual trees using airborne and terrestrial laser scanners, 2011]:

$$TLS_i = a + b \, ALS_i, \quad (10)$$

где TLS_i – значение i -го параметра (высота дерева, высота основания кроны, площадь проекции кроны и ее геометрический объем), измеренного наземным лазером; ALS_i – значение того же параметра дерева, измеренного бортовым лазером.

Характеристика полученных регрессий дана в табл. 1.

Таблица 1

Характеристика уравнений [Estimating crown variables of individual trees using airborne and terrestrial laser scanners, 2011]

Параметры дерева	Регрессионные коэффициенты		R^2	RMSE
	a	b		
Высота дерева, м	2,2995	0,8729	0,936	0,602
Высота основания кроны, м	-0,7137	1,1115	0,747	1,874
Площадь проекции кроны, м ²	6,4687	0,9471	0,692	6,843
Геометрический объем кроны, м ³	-196,78	72,623	0,577	31,71

Примечание. R^2 – коэффициент детерминации; RMSE – ошибка уравнения.

Поскольку каждый из двух методов в силу специфики алгоритма имеет ту или иную величину смещения оцениваемого структурного показателя по отношению к фактическому значению, по данным выше упомянутых 30 модельных деревьев были рассчитаны фактические значения высоты дерева, высоты основания кроны, площади проекции кроны и ее геометрического объема, и по ним оценены величины смещений [Estimating crown variables of individual trees using airborne and terrestrial laser scanners, 2011].

В результате расчетные значения высоты дерева, полученные с помощью бортового лазера, оказались ниже по отношению к значениям, полученным наземным лазером, поскольку большинство отраженных импульсов принадлежали не апексу, а соседним верхним ветвям. Расчетные значения высоты основания кроны, полученные на основе бортового лазера, оказались выше, чем полученные на основе наземного сканирования, вследствие перехвата основной части лазерных импульсов не от нижней ветви, а от более длинных, расположенных выше по профилю. Значения площади проекции кроны и ее объема, полученные с помощью бортового лазера, оказались заниженными, по сравнению с данными наземного сканера, из-за эффекта перекрытия горизонтальных проекций крон соседними деревьями, не учтенного при визировании сверху. Результаты исследования показали, что с помощью комбинированной процедуры обработки данных бортового и наземного лазерного сканирования были получены более точные оценки параметров исследуемых деревьев, чем при независимом использовании данных только бортового сканирования [Estimating crown variables of individual trees using airborne and terrestrial laser scanners, 2011].

4.2. Оценка морфологических показателей дерева при одновременном (совмещенном) его сканировании бортовым и наземными лидарами

Исследования выявили потенциальную возможность анализа морфоструктуры полога путем совмещения данных бортового и наземного лазерных сканирований [Comparing canopy metrics derived from terrestrial and airborne laser scanning in a Douglas-fir dominated forest stand, 2010]. Было показано [Chasmer, Hopkinson, Treitz, 2004], что при бортовом зондировании более высокий процент лазерных импульсов попадает в верхнюю часть кроны, при этом возврат импульсов из нижней части кроны и нижнего яруса ограничен. С другой стороны, при наземном сканировании большее количество импульсов отражается от нижней части полога, но меньшее – от верхней части. Эта взаимодополняемость вызвала растущий интерес к использованию наземных лидаров в дополнение к преимуществам бортового лидара [Geo-referencing forest field plots by co-registration of terrestrial and airborne laser scanning data, 2014], и, таким образом, к совмещению результатов бортового и наземных сканирований.

Однако исследования в этой области были ограничены отчасти из-за сложных предваряющих условий регистрации [Marker-free registration of forest terrestrial laser scanner data pairs with embedded confidence metrics, 2016]. Для получения данных с помощью наземных лидаров основным ограничением является необходимость позиционирования контрольных мишеней для регистрации многоракурсных сканирований, что часто требует длительной ручной доработки, хотя были разработаны методы без применения маркеров [Thevenaz, Unser, 2000; Marker-free registration of forest terrestrial laser scanner data pairs with embedded confidence metrics, 2016].

В связи с этим был предложен новый автоматизированный метод объединения данных бортового и наземных лидаров для точной характеристики трехмерной структуры крон отдельных деревьев [A novel automatic method for the fusion of ALS and TLS LiDAR data for robust assessment of tree crown structure, 2017]. Предлагаемый метод разделен на три основные фазы: 1) предварительная обработка; 2) сегментация данных наземных лидаров на основе результатов сегментации данных бортового лидара; 3) автоматическая регистрация и объединение результатов сканирования данных бортового и наземных лидаров (рис. 128).

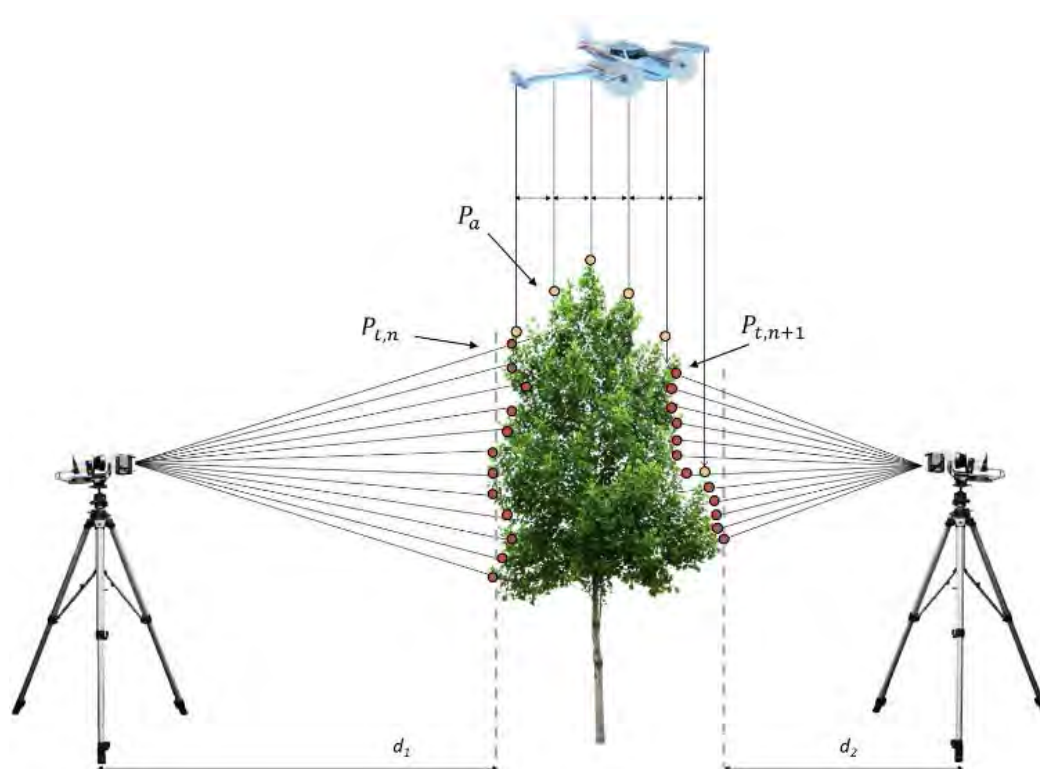


Рис. 128. Визуальное представление различных частей профиля кроны одного и того же дерева, отсканированного с помощью бортового лидара и с двух ракурсов наземных лидаров. Из-за различных точек обзора облака точек лидарного и бортового сканеров не могут быть сопоставлены напрямую [A novel automatic method for the fusion of ALS and TLS LiDAR data for robust assessment of tree crown structure, 2017]

Исследования проведены на Тихоокеанском юго-западе США в дубовой саванне, где доминирующими видами являются дуб голубой (*Quercus douglasii* Hook. & Arn.), дуб вислосерный (*Quercus wislizeni* A.DC.) и сосна серая (*Pinus sabiniana* Douglas ex D.Don). Для каждого древесного вида у 27 деревьев традиционным наземным способом были измерены высота дерева, диаметр на высоте груди и ширина кроны [A novel automatic method for the fusion of ALS and TLS LiDAR data for robust assessment of tree crown structure, 2017].

Предварительная обработка данных была направлена на извлечение растровых моделей высоты крон из данных воздушного и наземных лидаров в дополнение к изображению сегментации крон, полученному из данных бортового лидара. Благодаря всестороннему единообразному отбору сигналов с верхней части кроны деревьев, обеспечиваемому бортовой лидарной системой, обнаружение и оконтуривание отдельных крон деревьев выполняется на основе данных бортового лидара. Поскольку было необходимо оценить эффективность объединения данных бортового и наземного лидаров, в данном случае кроны были оконтурены вручную на модели высоты крон, полученной по данным бортового лидара. Полученный результат сегментации использован для передачи сегментации в модели высоты крон,

оцененных по данным наземного лидара. В конце этого этапа сегментированные кроны регистрировались в общей системе координат и объединялись непосредственно в трехмерном пространстве облака точек [A novel automatic method for the fusion of ALS and TLS LiDAR data for robust assessment of tree crown structure, 2017].

На втором этапе сегментация по протоколу наземного сканирования направлена на автоматическое оконтуривание крон по данным наземного лидара с использованием преимуществ данных бортового лидара. Данные наземного сканирования обычно требуют трудоемкой ручной сегментации кроны, основанной на визуальной инспекции трехмерного облака точек в боковом ракурсе, при которой горизонтальная структура насаждения обычно не регистрируется [Paris, Valduga, Bruzzone, 2016]. Немногие исследования были посвящены сегментации деревьев с использованием наземного лидара [Côtéa, Fournier, Egli, 2011; Segmentation of individual trees from TLS and MLS data, 2017], причем в большинстве исследований эксперименты проводились в городских посадках, характеризующихся почти полным отсутствием перекрытия крон [Lin, Hyuppa, 2012; A voxel-based method for automated identification and morphological parameters estimation of individual street trees from mobile laser scanning data, 2013].

В данном исследовании результат сегментации, полученный на основе данных бортового лидара, адаптируется и применяется к данным наземного лидара с целью точного определения границ крон, видимых при наземном сканировании, тем самым используя преимущества данных бортового сканирования в плане их доступности. Другими словами, благодаря тщательной регистрации верхнего полога в ракурсе надидра результат сегментации по данным бортового лидара является более точным, чем любой результат, автоматически полученный на основе данных наземного лидара. Чтобы использовать эту взаимодополняемость, требуется пространственное согласование данных двух лидаров. Однако вместо того, чтобы регистрировать все сканирования наземного лидара непосредственно в данных бортового сканера, предпочтение отдается раздельному согласованию данных бортового лидара с каждым из облаков точек наземного лидара при каждом его ракурсе сканирования. Это условие позволяет сохранить форму крон, измеренную наземным лидаром, и адаптировать результат сегментации крон по данным бортового сканера к профилю крон с высоким разрешением, измеренному наземным лидаром. Причем, согласно предложенному способу, не полигоны крон, оконтуренных в данных бортового сканера, накладываются на данные наземного лидара, а, скорее, результаты сегментации сопоставляются с наземными данными благодаря евклидову преобразованию, примененному к сегментированному изображению данных бортового сканера, чтобы обеспечить его соответствие данным сканирования наземного лидара [A novel automatic method for the fusion of ALS and TLS LiDAR data for robust assessment of tree crown structure, 2017].

Из-за различных точек обзора облака точек наземных ракурсов ($P_{t,1}, \dots, P_{t,n}, \dots, P_{t,N}$) и облака точек воздушного ракурса (P_a) относятся к разным частям контура кроны и, таким образом, не могут быть автоматически зарегистрированы (рис. 128) [A simple technique for co-registration of terrestrial LiDAR observations for forestry applications, 2012]. Эта проблема была решена ранее несколькими способами [Geo-referencing forest field plots by co-registration of terrestrial and airborne laser scanning data, 2014]. Здесь представлен новый подход, использующий тот факт, что для определенных лесных условий, например для открытого лесного полога, измеренная его структура (т. е. пространственное распределение деревьев) одинакова в данных как воздушного, так и наземного лидара. Правда, это не всегда так, особенно при сомкнутом пологом, когда сигналы наземного сканирования не достигают его верхней части. Однако предложенный метод может быть адаптирован к случаю с сомкнутым пологом путем рассмотрения дополнительных структурных особенностей, поскольку два типа данных представляют одну и ту же структуру полога [A novel automatic method for the fusion of ALS and TLS LiDAR data for robust assessment of tree crown structure, 2017].

В насаждении открытой структуры, как в данном случае, для определения соответствующих параметров регистрации можно воспользоваться корреляцией между двухмерными профилями высот, измеренными бортовым и наземным сканерами. Другими словами, использовано согласованное представление пространственного распределения крон с целью совместить данные бортового и наземного сканеров посредством регистрации изображений на основе корреляции между соответствующими моделями высоты полога [A novel automatic method for the fusion of ALS and TLS LiDAR data for robust assessment of tree crown structure, 2017].

На заключительном этапе выполняется слияние сегментированных вершин в трехмерном пространстве облаков точек. Выравнивается облако точек бортового сканера, а затем облака точек наземных сканеров в общей системе координат, т. е. в системе координат данных бортового лидара. Полное представление горизонтальной структуры полога, предоставляемое данными бортового лидара, дает возможность автоматически регистрировать результаты сканирования наземных лидаров без необходимости позиционирования контрольных объектов (мишеней) на местности в процессе сбора данных (рис. 129). Аналогичным образом оценивается евклидово преобразование на плоскости, которое позволяет регистрировать каждую модель полога наземного сканера в модели полога бортового сканера. Таким образом, рассматриваемое преобразование является обратным предыдущему [A novel automatic method for the fusion of ALS and TLS LiDAR data for robust assessment of tree crown structure, 2017].



Рис. 129. Пример регистрации наземных сканов в системе координат данных бортового лидара. Для одной и той же лесной площади отображается ложное цветное представление модели высоты полога для: *а* – данных бортового лидара; *б* – объединения исходных сканирований наземных лидаров; *в* – объединения зарегистрированных сканирований наземных лидаров. Для каждого сканирования наземного лидара вычисляется наилучшее евклидово преобразование, чтобы оно соответствовало горизонтальной структуре полога, представленной в данных бортового лидара [A novel automatic method for the fusion of ALS and TLS LiDAR data for robust assessment of tree crown structure, 2017]

Полученное преобразование применяется к каждой оконтуренной трехмерной кроне, принадлежащей наземному сканированию, таким образом записывая данные в систему координат бортового сканирования. В конце этапа регистрации предлагаемый способ выполняет объединение облаков точек бортового и наземного сканирований для каждой кроны (в соответствии с зарегистрированными сегментированными картами бортового и наземного сканирований) для создания набора конечных объединенных трехмерных сегментированных облаков точек. На рис. 130 показан наглядный пример результата, полученного при объединении трехмерных облаков точек, сегментированных по данным бортового и наземного сканирований [A novel automatic method for the fusion of ALS and TLS LiDAR data for robust assessment of tree crown structure, 2017].

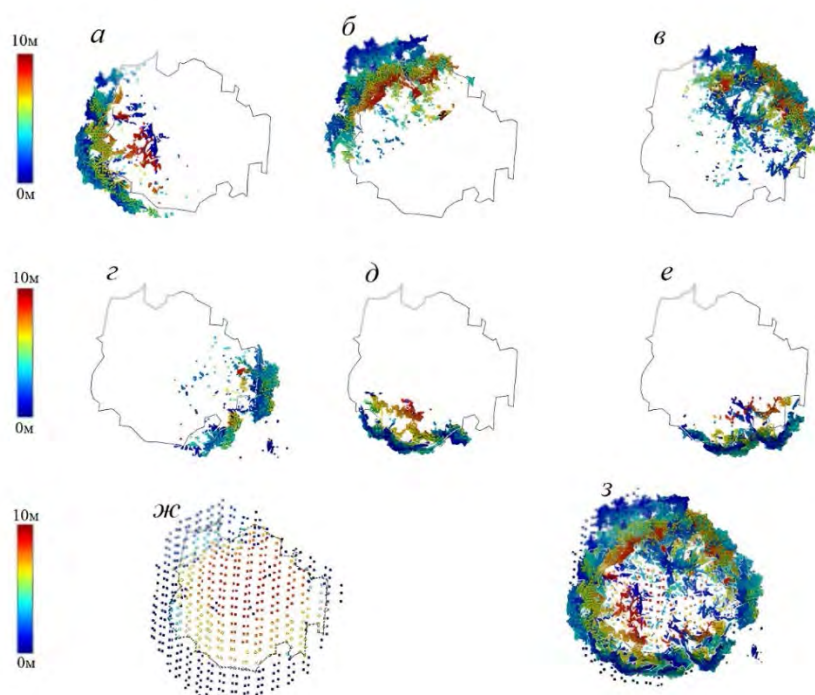


Рис. 130. Пример результата, полученного при объединении трехмерных облаков точек, сегментированных по данным бортового и наземного сканирования. Для одной и той же кроны показаны виды сверху для: *а–е* – данных наземного сканирования; *ж* – данных бортового сканирования; *з* – совмещенных данных [A novel automatic method for the fusion of ALS and TLS LiDAR data for robust assessment of tree crown structure, 2017]

Предложенный анализ совмещенных данных сканирования деревьев бортовым и наземными лидарами в сопоставлении полученных результатов с фактическими наземными замерами морфологии тех же деревьев показал наличие высоких значений коэффициента детерминации для высоты дерева и ширины кроны – 0,99 и 0,86 соответственно (рис. 131).

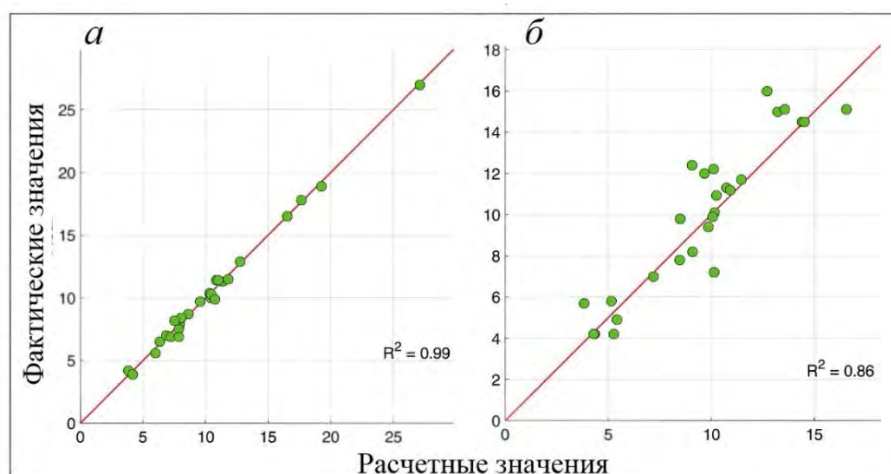


Рис. 131. Соотношение фактических параметров кроны и параметров, полученных на основе совмещенного набора лазерных данных: *а* – высоты дерева; *б* – ширины [A novel automatic method for the fusion of ALS and TLS LiDAR data for robust assessment of tree crown structure, 2017]

Новизна предложенного метода состоит в следующем:

- 1) данные бортового сканирования используются для автоматической регистрации данных наземного сканирования, полученных с нескольких позиций; при этом облака точек наземного лидара автоматически регистрируются в облаке точек бортового лидара путем максимизации нормализованной взаимной корреляции между общей моделью высоты полога бортового лидара и каждой из локальных моделей высоты полога наземных лидаров за счет оптимизации параметров евклидова преобразования на плоскости;
- 2) эффективность оконтуривания кроны по данным наземного сканирования, выполненного с использованием результатов сегментации данных бортового сканера;
- 3) повышенная точность моделирования структуры полога после объединения облаков точек, полученных бортовым и наземными лидарами.

Благодаря использованию двух взаимодополняющих источников данных предложенный способ не требует наличия какой-либо контрольной мишени при получении данных наземного сканирования, а использование сегментированного изображения результата бортового лидара в изображении результата наземных сканирований позволяет точно оконтурить кроны деревьев, не требуя ручной коррекции.

4.3. Наземная и бортовая лидарные оценки морфологии и запаса горючих материалов в кроне, необходимых при моделировании лесных пожаров

Морфоструктура крон деревьев имеет важное значение при моделировании динамики лесных пожаров [Finney, 2004], для обеспечения среды обитания птиц [Lowman, Rinker, 2004], поддержания микроклимата [Parker, Harding, Berger, 2004] и оценки фрактальной размерности деревьев [Zeide, Pfeifer, 1991]. В кроне дерева чистая площадь поверхности листьев, определяющая границу раздела пространства между растением и атмосферой, влияет на скорость и баланс биотических обменов посредством фотосинтеза и транспирации [Ellsworth, Reich, 1993]. Аналогичным образом распределение отдельных элементов (например, листьев и ветвей) определяет возможности проникновения радиации через нижние слои древесного покрова [Oker-Blom, 1986], что влияет на рост и продуктивность лесов [Givnish, 1988]. Таким образом, точная оценка структуры кроны является важной целью для систематического определения характеристик и моделирования продуктивности лесов и ее динамики.

Учитывая, что у бортового и наземного лидаров существует ряд преимуществ и ограничений, для улучшения операций по управлению лесами важно понимать, как та или иная стратегия получения данных влияет на точность извлекаемых параметров деревьев, а также как некоторые лидарные

метрики, связанные с этими параметрами, влияют на результативность систем моделирования насаждений. В случае моделирования поведения пожаров и их последствий, как правило, первоначально на основе данных дистанционного зондирования оцениваются некоторые параметры на уровне деревьев или древостоев, такие как количество деревьев и их максимальная высота [Parsons, Mell, McCauley, 2011; Modeling fuels and fire effects in 3D: Model description and applications, 2016]. Соответственно, эти параметры включаются в статистические модели или модели машинного обучения, чтобы выбрать наилучшие метрики для получения таких показателей, как площадь проекции кроны и ее высота. Наконец, эти показатели используются при построении моделей лесных пожаров, которые могут быть использованы для оценки динамических взаимосвязей, существующих в макромасштабных лесных экосистемах, в разработке прогнозов пожарной опасности и количественной оценке горючих материалов в лесном пологе, что, в свою очередь, определяет поведение пожаров [QUIC-fire: A fast-running simulation tool for prescribed fire planning, 2019; Kennedy, Johnson, Harrison, 2020; Fire behavior modeling for operational decision-making, 2021]. Эффективность и применимость моделей поведения пожаров и их последствий зависят главным образом от точности оценок лесных параметров, которые выступают в моделях в качестве исходных данных (рис. 132). Поэтому крайне важно развивать взаимодействие между взаимно дополняющими наборами данных – в данном случае между результатами наземного и бортового лазерного сканирования – для более точной оценки параметров на уровне дерева [Crown-level structure and fuel load characterization from airborne and terrestrial laser scanning in a longleaf pine (*Pinus palustris* Mill.) forest ecosystem, 2023].



Рис. 132. Схема возникновения верхового пожара [Alexander, Cruz, 2011; Alexander, Cruz, 2012]

Тем самым можно расширить число доступных оценок структурных параметров кроны и количества горючих материалов, используя данные наземного или бортового сканирования, или их комбинации. Более того, анализ того, как точность оценки структуры кроны и горючих материалов влияет на результаты моделирования пожара, мог бы помочь в разработке способов оптимизации его параметров, анализе сложных взаимодействий между отдельными параметрами, влияющими на поведение лесных пожаров, оптимизации результатов моделирования пожара и более конструктивной интерпретации его результатов [A physics-based approach to modelling grassland fires, 2007; QUIC-fire: A fast-running simulation tool for prescribed fire planning, 2019].

В насаждениях сосны длиннолистной в США было проведено исследование возможностей и результатов наземного, бортового лазерного сканирования и их комбинации в оценке структурных параметров деревьев и горючих материалов, а именно: высоты дерева, высоты основания кроны, ширины кроны, диаметра ствола на высоте груди, биомассы кроны, в том числе биомассы листвы и ветвей, и фитонасыщенности кроны [Crown-level structure and fuel load characterization from airborne and terrestrial laser scanning in a longleaf pine (*Pinus palustris* Mill.) forest ecosystem, 2023].

Замеры деревьев проведены на трех участках, каждый площадью 0,196 га, с геолокацией каждого дерева с помощью дифференциальной глобальной системы позиционирования *Trimble Geo7X*. Высота дерева и высота основания кроны определены с помощью лазерного высотомера *LaserTech Impulse 200*, а ширина кроны – тканевой лентой в двух направлениях. Биомасса листвы, скелетной части кроны (ветвей), кроны в целом и ее фитонасыщенности (объемной плотности) были рассчитаны для сосны на основе ранее опубликованных аллометрических моделей в зависимости от диаметра ствола и высоты дерева [Estimating *Pinus palustris* tree diameter and stem volume from tree height, crown area and stand-level parameters, 2014].

Данные бортового зондирования были получены с помощью полноволнового лидара *Leica ALS60*, а данные наземного сканирования – с помощью сканера *Optech ILRIS 36D-HD*, установленного на подъемной стреле на высоте 20 м, направленной вниз под углом 23°. Кроме того, на каждом участке сканер был установлен в шести различных положениях на расстоянии 20 м от границы участка и управлялся удаленно с планшетного компьютера через беспроводное соединение. Предварительная обработка данных проводилась с использованием продуктов *LAStools* и *FUSION/LDV LiDAR*. Данные облака отраженных от земли импульсов, полученные с помощью бортового лидара, были классифицированы с использованием алгоритма прогрессивного триангулированного нерегулярного уплотнения сети для создания цифровой модели рельефа. Последняя была использована для оценки высоты деревьев путем нормализации данных бортового (ALS) и наземного (TLS) сканирования. Нормализованные облака точек ALS и TLS были объединены с помощью продукта *CloudCompare®* для создания объединенного

набора данных (ALS + TLS) [Crown-level structure and fuel load characterization from airborne and terrestrial laser scanning in a longleaf pine (*Pinus palustris* Mill.) forest ecosystem, 2023].

Оконтуривание деревьев и вычисление метрик кроны выполнено на основе наборов данных ALS, TLS и ALS + TLS в три этапа с использованием пакетов *lidR* и *lidRplugins* в среде R (версия R 4.2.1). Сначала было выполнено оконтуривание деревьев с использованием адаптированного подхода [A benchmark of lidar-based single tree detection methods using heterogeneous forest data from the Alpine space, 2015], реализованного в пакете *lidRplugins*. Метод основан на итеративной генерации модели высоты крон, за которой следует этап последовательного обнаружения потенциальных вершин деревьев с использованием метода локальной максимальной фильтрации с подвижным окном. Значения сегментированной площади кроны были использованы для получения значений ее радиуса и площади проекции кроны. Объем кроны и площадь ее поверхности были рассчитаны как объем и площадь поверхности трехмерных выпуклых профилей, полученные на основе всего облака лидарных точек. Результаты оконтуривания и построения трехмерных профилей деревьев показаны на рис. 133.

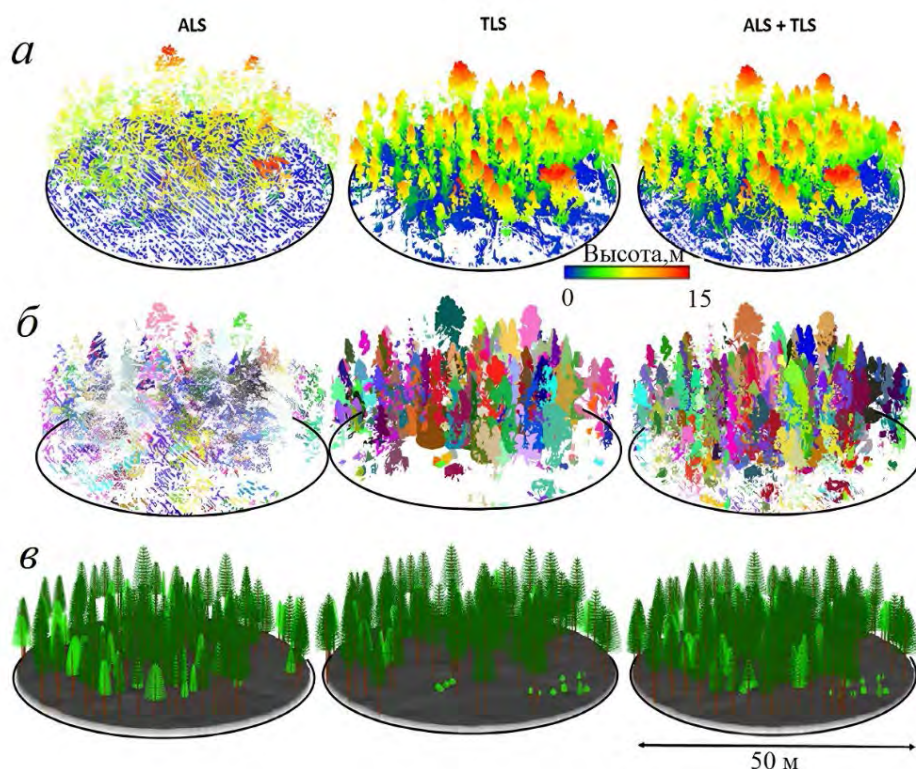


Рис. 133. Результаты оконтуривания и построения трехмерных профилей деревьев на одном из участков: *а* – исходное облако точек из данных ALS, TLS и ALS + TLS, окрашенных в зависимости от высоты над землей; *б* – деревья, сегментированные облака точек; *в* – трехмерное представление деревьев на участке [Crown-level structure and fuel load characterization from airborne and terrestrial laser scanning in a longleaf pine (*Pinus palustris* Mill.) forest ecosystem, 2023]

Относительная разница (RD) между обнаруженными и наблюдаемыми деревьями была рассчитана по формуле:

$$RD (\%) = [(n_l - n_f)/n_l]100, \quad (11)$$

где n_l – количество деревьев, обнаруженных с помощью лидара; n_f – количество деревьев, учтенных в полевых условиях на каждом участке. Данные о деревьях, измеренных в полевых условиях и обнаруженных лидаром, были совмещены на основе минимального евклидова расстояния, рассчитанного по четырем многомерным пространствам [Crown-level structure and fuel load characterization from airborne and terrestrial laser scanning in a longleaf pine (*Pinus palustris* Mill.) forest ecosystem, 2023].

Относительная разница между фактическим количеством и количеством обнаруженных лидаром деревьев (т. е. ошибка обнаружения) составляла от –4 до 3 %, что говорит об отсутствии систематического источника ошибок в алгоритме сегментации. Объединенные данные (ALS + TLS) обеспечивали наименьший диапазон ошибок (от 0 до 2 %), за которыми следовали данные ALS (от –2 до 2 %) и TLS (от –4 до 2 %). Хотя на практике эти диапазоны сопоставимы, данная закономерность позволяет предположить, что эффективность алгоритма сегментации при совместном использовании данных (ALS + TLS) повышается лишь незначительно.

Для выявления наиболее важных метрик, полученных по трем вариантам (ALS, TLS и ALS + TLS) на уровне кроны и использованных в качестве независимых переменных при прогнозировании значений вышеупомянутых структурных показателей и массы горючих материалов, были применены коэффициент корреляции Пирсона (r) и коэффициент улучшения модели (MIR) [Evans, Cushman, 2009]. При моделировании по алгоритму «случайный лес» [Predicting stem total and assortment volumes in an industrial *Pinus taeda* L. forest plantation using airborne laser scanning data and Random Forest, 2017] были использованы только метрики кроны, характеризующиеся значениями $r < 0,9$ и $MIR > 0,25$. На первом этапе отбора наиболее значимых независимых переменных на основе коэффициента корреляции количество метрик-кандидатов сократилось с 36 до 15–16. После расчета моделей по алгоритму «случайный лес» количество независимых переменных сократилось и было на уровне от 3 до 7 [Crown-level structure and fuel load characterization from airborne and terrestrial laser scanning in a longleaf pine (*Pinus palustris* Mill.) forest ecosystem, 2023].

В результате проведенных расчетов оказалось, что при прогнозировании высоты дерева и высоты основания кроны с использованием данных бортового лидара наблюдалась несколько более высокая точность (рис. 134). Это может быть объяснено тем, что бортовой лидар охватывал большее количество точек в районе апекса, нежели наземный.

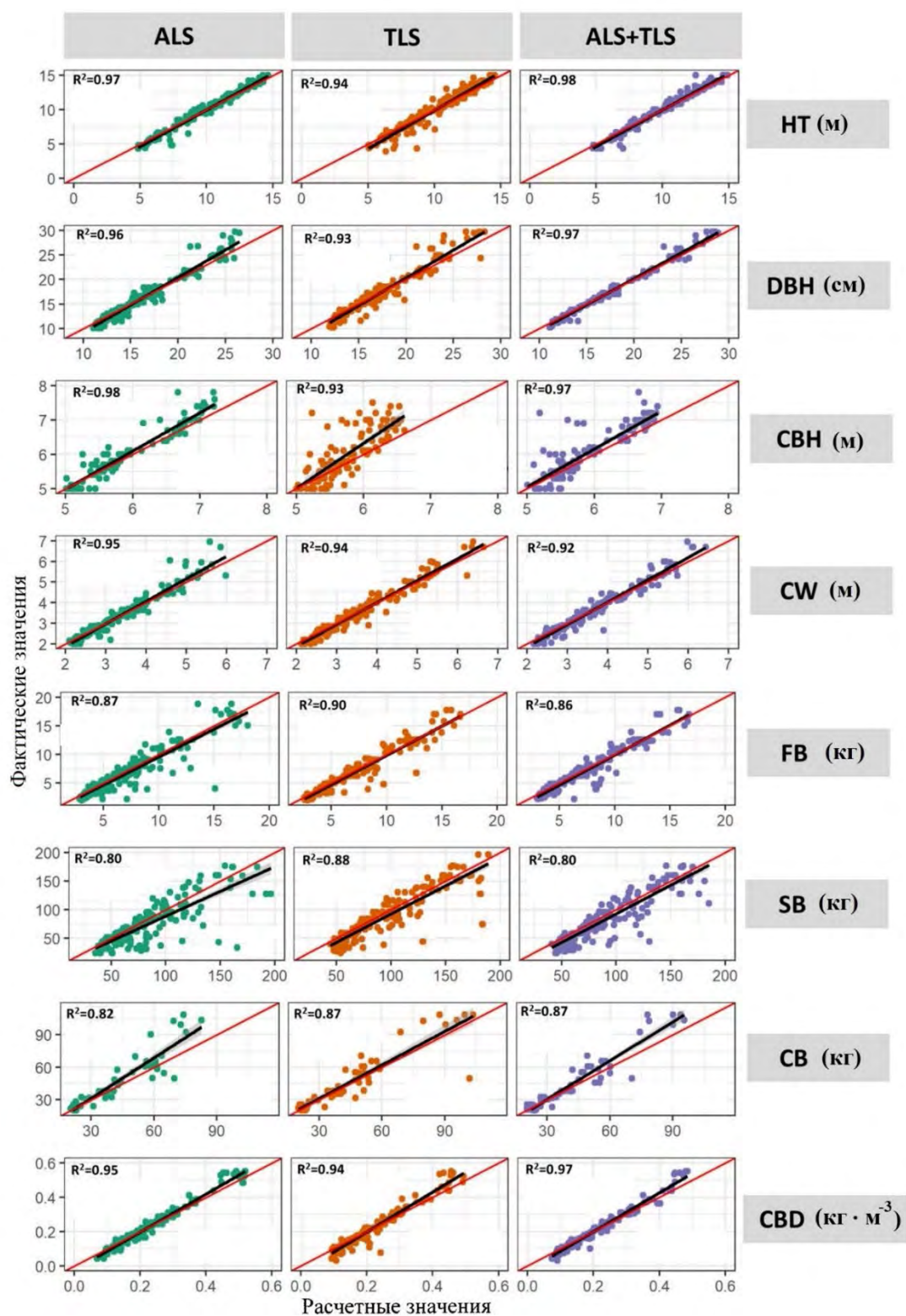


Рис. 134. Соотношение фактических и прогнозируемых характеристик структуры кроны и массы горючих материалов, рассчитанных по алгоритму «случайный лес». Обозначения: DBH – диаметр на высоте груди; HT – высота дерева; CW – ширина кроны; CBH – высота основания кроны; FB – биомасса листвы; SB – биомасса ветвей; CB – биомасса кроны; CBD – фитонасыщенность, или объемная плотность кроны. Диагональные линии представляют собой идеальное соответствие (1:1) между наблюдаемыми и прогнозируемыми значениями [Crown-level structure and fuel load characterization from airborne and terrestrial laser scanning in a longleaf pine (*Pinus palustris* Mill.) forest ecosystem, 2023]

Точность моделей, рассчитанных по алгоритму «случайный лес», по всем трем наборам данных для всех морфометрических и продукционных показателей была на уровне $R^2 > 0,80$, что согласуется с другими исследованиями на основе данных бортового и наземного лидаров. В частности, соотношение между прогнозируемыми и фактическими значениями R^2 составило у кедра корейского 0,94 для высоты дерева и 0,75 для высоты основания кроны [Estimating crown variables of individual trees using airborne and terrestrial laser scanners, 2011], в то время как в дубовой саванне на юго-западе США значения R^2 для высоты дерева и ширины кроны составили соответственно 0,99 и 0,86 [A novel automatic method for the fusion of ALS and TLS LiDAR data for robust assessment of tree crown structure, 2017].

Несмотря на хорошее соответствие фактических и лидарных данных, у сосны длиннолистной не было выявлено увеличения точности при объединении обеих лидарных систем. Результаты объединенного набора данных (ALS + TLS) были в значительной степени схожи с результатами, полученными как с данными ALS, так и с данными TLS. Таким образом, для моделирования структурных характеристик кроны деревьев и горючих материалов в экосистеме сосны длиннолистной было бы достаточно использования систем или ALS, или TLS. Кроме того, данные бортового лидара дают приемлемые результаты и с точки зрения значительно большей площади, которую можно обследовать с его помощью, особенно по сравнению с наземным лидаром, для которого требуется как минимум две позиции сканирования или даже больше, если густота насаждения приводит к окклюзии лазерных сигналов [Aboveground total and green biomass of dryland shrub derived from terrestrial laser scanning, 2014; Stovall, Shugart, 2018; Towards spatially explicit quantification of pre- and postfire fuels and fuel consumption from traditional and point cloud measurements, 2020]. Учитывая, что использование наземного лидара менее практично и более дорогое, проведенное сравнение показало, что зондирование полога бортовым лидаром приемлемо во многих применениях и его полезность в оценке показателей, необходимых при моделировании лесных пожаров, очевидна [Crown-level structure and fuel load characterization from airborne and terrestrial laser scanning in a longleaf pine (*Pinus palustris* Mill.) forest ecosystem, 2023].

Выводы по главе 4

Лазерное сканирование признано наиболее эффективным и точным инструментом, по сравнению с полевыми исследованиями и оптическими методами дистанционного зондирования. Однако оценка структурных параметров деревьев на основе импульсно-периодического бортового сканирования страдает от ряда проблем, связанных с влиянием густоты древостоя, перекрытием крон, трудностями с регистрацией верхушек деревьев и ниж-

него яруса. С другой стороны, наземное сканирование лазером непрерывного действия по фазовому сдвигу волны позволяет точно оценивать структуру лесного полога. Однако процедура сбора данных с помощью наземного сканирования является трудоемкой при использовании на обширной лесной территории, вследствие чего она проводилась только на относительно небольших пробных площадях. Кроме того, высокий процент лазерных импульсов перехватывается подлеском и нижней частью полога, что сокращает количество импульсов, достигающих верхней части полога.

Чтобы преодолеть недостатки двух методов, была предпринята попытка объединить данные бортового и наземного сканирования, чтобы оценить такие показатели, как высота дерева, высота основания кроны, площадь проекции кроны и ее геометрический объем. На примере кедра корейского было установлено, что расчетные значения высоты дерева, полученные с помощью бортового лазера, оказались ниже по отношению к значениям, полученным наземным лазером, а расчетные значения высоты основания кроны, полученные на основе бортового лазера, оказались выше, чем полученные на основе наземного сканирования. Значения площади проекции кроны и ее объема, полученные с помощью бортового лазера, оказались заниженными, по сравнению с данными наземного сканера. Показано, что с помощью комбинированной процедуры обработки данных бортового и наземного лазерного сканирования можно получить более точные оценки параметров исследуемых деревьев, чем при использовании только данных бортового сканирования.

При бортовом зондировании более высокий процент лазерных импульсов попадает в верхнюю часть кроны, при этом возврат импульсов из нижней части кроны и нижнего яруса ограничен. С другой стороны, при наземном сканировании большее количество импульсов отражается от нижней части полога, но меньшее – от верхней части. Этот принцип взаимодополняемости двух методов был исследован на примере дубовой саванны в США, и в результате предложен новый автоматизированный метод объединения данных бортового и наземных лидаров, который при сопоставлении их с фактическими наземными замерами морфологии деревьев показал наличие высоких значений коэффициента детерминации: для высоты дерева и ширины кроны соответственно 0,99 и 0,86. Благодаря использованию двух взаимодополняющих источников данных предложенный способ не требует наличия контрольной мишени при получении данных наземного сканирования, а использование сегментированного изображения результата бортового лидара в изображении результата наземных сканирований позволяет точно оконтурить кроны деревьев, не требуя ручной коррекции.

Морфоструктура крон деревьев имеет важное значение для моделирования динамики лесных пожаров. Эффективность и применимость моделей поведения пожаров и их последствий зависят главным образом от точности оценок лесных параметров, которые выступают в моделях в качестве исходных данных. Поэтому крайне важно развивать взаимодействие между вза-

имно дополняющими наборами данных – в данном случае между результатами наземного и бортового лазерного сканирования – для более точной оценки параметров на уровне дерева. С этой целью в насаждениях сосны длиннолистной в США было проведено исследование возможностей и результатов наземного, бортового лазерного сканирования и их комбинации в оценке структурных параметров деревьев и горючих материалов, а именно: высоты дерева, высоты основания кроны, ширины кроны, диаметра ствола на высоте груди, биомассы кроны, в том числе биомассы листвы и ветвей, и фитонасыщенности кроны. Установлено, что относительная разница между фактическим количеством и количеством обнаруженных лидарами деревьев (т. е. ошибка обнаружения) составляла от -4 до 3 %, что говорит об отсутствии систематического источника ошибок в алгоритме сегментации. Объединенные данные бортового и наземного лидаров обеспечивали наименьший диапазон ошибок (от 0 до 2 %) при несколько больших диапазонах ошибок при бортовом (от -2 до 2 %) и наземном (от -4 до 2 %) сканированиях. Хотя эти диапазоны практически сопоставимы, очевидно, что эффективность алгоритма сегментации при совместном использовании данных бортового и наземного лидаров повышается лишь незначительно.

Таким образом, для моделирования структурных характеристик кроны деревьев и запаса горючих материалов в исследованных условиях было достаточно использования или бортового, или наземного лидара. Кроме того, применение бортового лидара дает возможность анализа структуры полога на большой территории, тогда как наземным лидаром можно обследовать лишь небольшие лесные участки с двух и более стационарных позиций. Учитывая, что использование наземного лидара менее практично и более дорогое, проведенное сравнение показало, что зондирование полога бортовым лидаром более приемлемо и его полезность в оценке показателей, необходимых при моделировании лесных пожаров, очевидна.

ГЛАВА 5. ОЦЕНКА МАССООБРАЗУЮЩИХ И ПРОДУКЦИОННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДЕРЕВЬЕВ И НАСАЖДЕНИЙ ПО МОРФОМЕТРИИ КРОН И ПОЛОГА, ДОСТУПНОЙ ДЛЯ ЛИДАРНОГО СКАНИРОВАНИЯ (ПО МАТЕРИАЛАМ АВТОРСКИХ БАЗ ДАННЫХ)

В результате разработки двух авторских баз данных о массообразующих и биопродукционных показателях деревьев и древостоев лесообразующих видов Евразии [Усольцев, 2023а; Усольцев 2023б] была создана предпосылка для оценки массообразующих и биопродукционных показателей деревьев и насаждений по морфометрии крон и полога, доступной для лидарного сканирования, но измеренной традиционными методами лесной таксации.

5.1. Оценка массообразующих показателей деревьев и насаждений по морфометрии крон и полога

В многочисленных литературных источниках [Error propagation and scaling for tropical forest biomass estimates, 2004; Усольцев, 2025] изложен опыт построения моделей для оценки диаметра ствола на высоте груди как отдельных деревьев, так и в целом для древостоев по известной морфометрии крон деревьев и полога древостоев. Названная морфометрия может оцениваться как наземным, так и дистанционным способом, но в обоих случаях построенные модели нацелены не на наземную таксацию, а на лидарное сканирование. В результате параллельного обзора применяемых структур моделей как для диаметра ствола, так и для среднего диаметра древостоя на локальных уровнях была показана их фактическая идентичность при двух разных способах оценки морфометрии дерева или древостоя, что дает возможность использования моделей, полученных на основе наземных измерений, для валидации моделей, полученных по лидарной технологии [Усольцев, 2025]. По-видимому, возможно прямое применение упомянутых моделей в лидарных технологиях путем непосредственного включения в них лидарных оценок высоты деревьев и диаметра кроны в качестве независимых переменных при условии предварительной оценки возможных суммарных ошибок и смещений в результате совмещения наземных и дистанционных измерений. Это особенно актуально ввиду отсутствия наземных измерений морфологии деревьев и древостоев по большинству из существующих видов и местопрорастаний.

Наличие двух авторских баз данных о массообразующих и биопродукционных показателях деревьев и древостоев лесообразующих видов Евразии [Усольцев, 2023а; Усольцев, 2003б] дает возможность разработки упомянутых выше моделей на трансконтинентальном уровне.

5.1.1. Взаимосвязь диаметра ствола на высоте груди и диаметра кроны

С учетом современных возможностей применения БПЛА в лесной таксации и в связи с необходимостью совмещать традиционные таксационные нормативы и модели с данными лидарного сканирования представляет интерес разработка для лесообразующих видов Евразии двух типов всеобщих аллометрических моделей:

$$\ln D_{cr} = a_0 + a_1(\ln D), \quad (12)$$

$$\ln D = a_0 + a_1(\ln D_{cr}), \quad (13)$$

где D и D_{cr} – соответственно диаметр ствола на высоте груди, см, и диаметр кроны, м. Для расчета моделей из сформированной базы данных [Усольцев, 2023a] отобраны 5 570 модельных деревьев 23 древесных видов и родов. Результаты расчета моделей (12) и (13) представлены в табл. 2. Все регрессионные коэффициенты моделей, представленных в табл. 2, статистически значимы на уровне $p < 0,001$, что обеспечивает воспроизводимость полученных результатов [Guttinger, 2020].

Таблица 2

Результаты расчета моделей (12) и (13)

№	Зависимая переменная	Регрессионные коэффициенты модели (12)		SE	Зависимая переменная	Регрессионные коэффициенты модели (13)		SE	$adjR^2$	Число деревьев
		a_0	a_1			a_0	a_1			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	Подрод <i>Pinus</i> L. (двухвойные сосны)									
	$\ln D_{cr}$	–0,6107	0,5785	0,34	$\ln D$	1,7096	1,0717	0,46	0,620	2088
2	Род <i>Picea</i> Dietr. (ели)									
	$\ln D_{cr}$	–0,1413	0,4444	0,25	$\ln D$	0,9966	1,6232	0,48	0,721	632
3	Род <i>Abies</i> Mill. (пихты)									
	$\ln D_{cr}$	–0,5956	0,6148	0,35	$\ln D$	2,3332	0,6274	0,36	0,379	90
4	Подрод <i>Haploxylon</i> (Koehne) (пятихвойные сосны)									
	$\ln D_{cr}$	–0,4751	0,6114	0,25	$\ln D$	1,1682	1,2650	0,36	0,771	92
5	Род <i>Larix</i> Mill. (лиственницы)									
	$\ln D_{cr}$	–0,4767	0,6235	0,29	$\ln D$	1,2553	1,2692	0,42	0,790	140
6	<i>Cryptomeria japonica</i> (Thunb. ex L.f.) D.Don. (криптомерия японская)									
	$\ln D_{cr}$	–0,7227	0,5899	0,13	$\ln D$	1,6334	1,2921	0,19	0,753	30
7	<i>Chamaecyparis obtusa</i> (Sieb. et Zucc.) Endl. (кипарисовик)									
	$\ln D_{cr}$	–0,7559	0,7246	0,17	$\ln D$	1,3504	1,1135	0,22	0,799	28
8	Род <i>Betula</i> L. (березы)									
	$\ln D_{cr}$	–0,8492	0,7610	0,39	$\ln D$	1,7196	0,8438	0,42	0,642	734
9	Род <i>Populus</i> L. (осины и тополя)									
	$\ln D_{cr}$	–0,4865	0,6385	0,24	$\ln D$	1,1984	1,2429	0,34	0,793	280

Окончание табл. 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
10	Род <i>Alnus Gaertn.</i> (ольхи)									
	$\ln D_{cr}$	-0,8426	0,6744	0,37	$\ln D$	2,0522	0,7625	0,40	0,513	405
11	Род <i>Tilia L.</i> (липы)									
	$\ln D_{cr}$	-1,3845	0,9275	0,46	$\ln D$	2,3699	0,5026	0,34	0,462	130
12	Род <i>Quercus L.</i> (дубы)									
	$\ln D_{cr}$	0,2137	0,4485	0,46	$\ln D$	1,8149	0,7499	0,60	0,335	390
13	Род <i>Fagus L.</i> (буки)									
	$\ln D_{cr}$	-0,5424	0,6441	0,30	$\ln D$	1,4556	1,0310	0,38	0,663	223
14	Род <i>Fraxinus L.</i> (ясени)									
	$\ln D_{cr}$	-0,3433	0,6121	0,32	$\ln D$	1,4059	1,1057	0,43	0,673	78
15	Род <i>Carpinus L.</i> (грабы)									
	$\ln D_{cr}$	-0,1854	0,5711	0,37	$\ln D$	1,5143	0,8919	0,46	0,504	100
16	Род <i>Salix L.</i> (ивы)									
	$\ln D_{cr}$	-0,5022	0,7461	0,08	$\ln D$	0,7066	1,3175	0,11	0,981	10
17	<i>Chosenia arbutifolia</i> (Pall.) A. Scvorts. (чозения)									
	$\ln D_{cr}$	0,1938	0,5047	0,42	$\ln D$	0,6787	1,3423	0,68	0,656	17
18	Род <i>Acer L.</i> (клёны)									
	$\ln D_{cr}$	0,1138	0,6292	0,22	$\ln D$	0,9693	1,0153	0,28	0,611	15
19	<i>Robinia pseudoacacia</i> L. (робиния ложноакациевая, или акация белая)									
	$\ln D_{cr}$	-0,1119	0,4904	0,37	$\ln D$	1,8437	0,8583	0,50	0,411	60
20	<i>Phellodendron amurense</i> Rupr. (бархат амурский)									
	$\ln D_{cr}$	0,9381	0,3758	0,12	$\ln D$	-1,5331	2,1911	0,28	0,788	7
21	<i>Maackia amurensis</i> Rupr. (маакия амурская)									
	$\ln D_{cr}$	0,6510	0,4272	0,10	$\ln D$	-1,0384	2,0807	0,21	0,867	7
22	<i>Ulmus japonica</i> (Rehd.) Sarg. (вяз японский)									
	$\ln D_{cr}$	0,8460	0,3359	0,17	$\ln D$	0,1736	1,5394	0,36	0,420	7
23	<i>Juglans mandshurica</i> Maxim. (орех маньчжурский)									
	$\ln D_{cr}$	1,3456	0,2417	0,10	$\ln D$	-2,6959	2,7941	0,34	0,610	7

Далее выполнено ранжирование каждого из моделируемых показателей при фиксированных значениях другого (рис. 135 и 136).

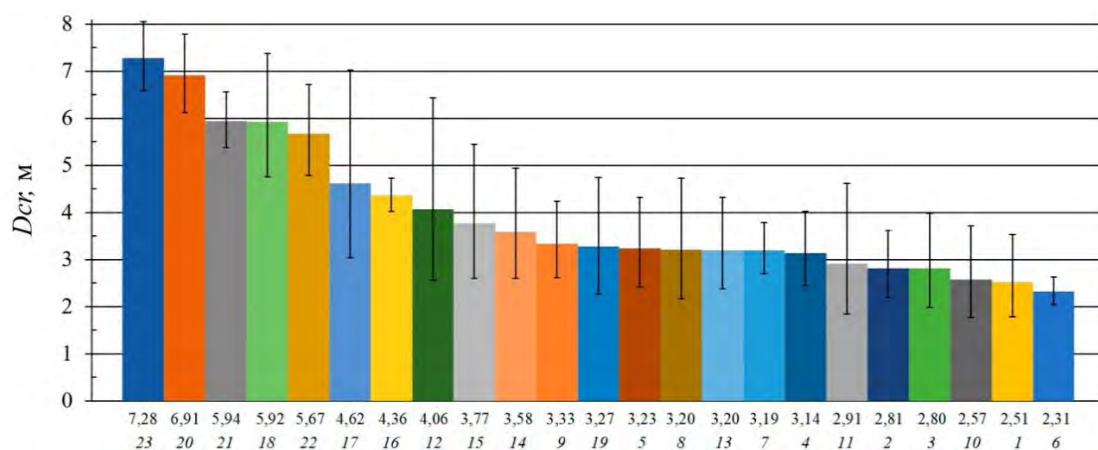


Рис. 135. Диаграмма распределения 23 видов, родов и подродов Евразии по величине диаметра кроны при среднем значении диаметра ствола на высоте груди, равном 14,1 см. Цифры по оси абсцисс: в верхнем ряду – значения диаметра кроны для каждого из 23 видов, родов и подродов, м; в нижнем ряду – порядковый номер вида, рода или подрода, показанный в табл. 2

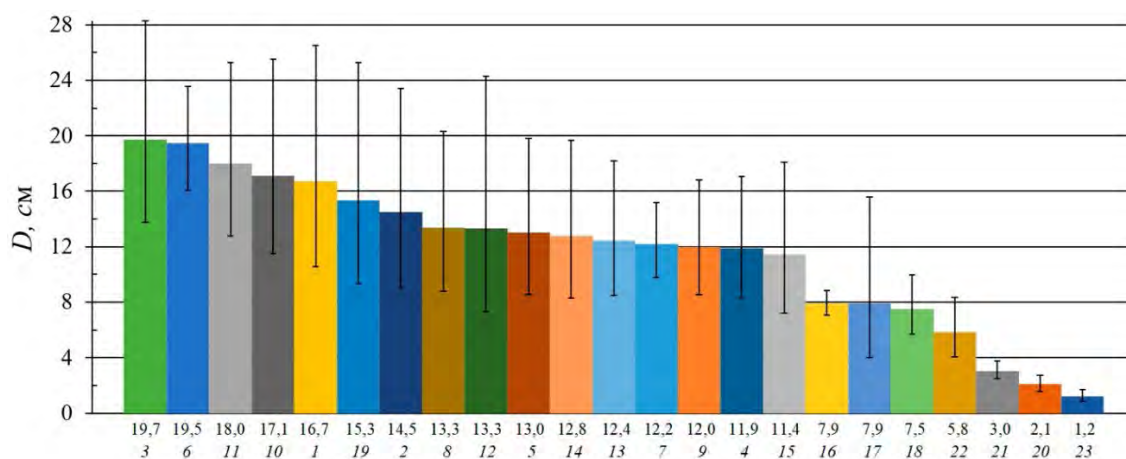


Рис. 136. Диаграмма распределения 23 видов, родов и подродов Евразии по величине диаметра ствола на высоте груди при среднем значении диаметра кроны, равном 2,81 м. Цифры по оси абсцисс: в верхнем ряду – значения диаметра ствола для каждого из 23 видов, родов и подродов, м; в нижнем ряду – порядковый номер вида, рода или подрода, показанный в табл. 2

Очевидно, что ранжирования видов, родов и подродов Евразии по двум моделируемым показателям не совпадают. Более того, по некоторым видам они прямо противоположны. Например, орех маньчжурский и бархат амурский по диаметру кроны имеют высшие ранги, а по диаметру ствола – низшие (рис. 135 и 136).

5.1.2. Модели для оценки диаметра стволов деревьев и древостоев по морфометрии кроны и полога

Исходя из анализа опубликованных работ в предыдущих главах, биологически обоснованной и наиболее часто применяемой независимой переменной, объясняющей изменчивость диаметра D , является не только диаметр кроны D_{cr} , но и высота дерева H , м. Исходя из того же анализа, независимыми переменными, объясняющими изменчивость среднего диаметра стволов древостоя D_m , являются средняя высота древостоя H_m (м) и его плотность N (тыс. экз./га). Двухфакторный анализ зависимостей диаметров D и D_m от соответствующих морфометрических показателей выполнен с использованием двух структур аллометрических моделей, апробированных ранее [Усольцев, 2024].

С учетом опыта моделирования диаметра стволов деревьев и древостоев, изложенного в обзоре публикаций, анализ фактических данных нами выполнен с использованием двух структур аллометрических моделей, апробированных ранее [Усольцев, 2024]:

$$\ln D = a_0 + a_1 \ln H + a_2 \ln D_{cr}, \quad (14)$$

$$\ln D_m = a_0 + a_1 \ln H_m + a_2 \ln N. \quad (15)$$

Результаты расчета моделей (14) и (15) даны в табл. 3.

Таблица 3

Результаты регрессионного анализа моделей (14) и (15)

№	Род (под-род)	Характеристика модели (14)					Характеристика модели (15)				
		a_0	a_1	a_2	$adjR^2$	SE	a_0	a_1	a_2	$adjR^2$	SE
1	<i>Pinus</i>	0,0267	0,8507	0,5111	0,912	0,227	1,0414	0,6699	– 0,2628	0,954	0,146
2	<i>Picea</i>	– 0,0964	0,9093	0,3917	0,959	0,184	0,6523	0,8123	– 0,1699	0,935	0,165
3	<i>Abies</i>	– 0,0650	0,9472	0,3301	0,947	0,183	0,3943	0,9190	– 0,1230	0,926	0,170
4	<i>Larix</i>	– 0,4496	1,0039	0,4891	0,947	0,215	0,3352	0,9091	– 0,1579	0,912	0,184
5	<i>Haploxydon</i>	0,2656	0,7815	0,4686	0,935	0,194	0,3363	0,9978	– 0,1310	0,942	0,208
6	<i>Betula</i>	– 0,8366	1,1016	0,3417	0,929	0,191	0,6614	0,7447	– 0,2566	0,962	0,145
7	<i>Populus</i>	– 0,5581	0,9101	0,5475	0,936	0,193	0,9650	0,6711	– 0,3378	0,960	0,165
8	<i>Alnus</i>	– 1,1383	1,2821	0,2486	0,903	0,173	0,3028	0,8908	– 0,2089	0,953	0,133
9	<i>Tilia</i>	– 1,4598	1,4455	0,1718	0,712	0,222	0,6983	0,8057	– 0,2292	0,968	0,111
10	<i>Quercus</i>	– 0,5734	1,1540	0,1883	0,927	0,199	0,5451	0,8509	– 0,2620	0,947	0,179
11	<i>Fagus</i>	– 0,6519	1,0193	0,3980	0,910	0,244	1,7689	0,4039	– 0,4089	0,952	0,152
12	<i>Carpinus</i>	– 1,1701	1,1385	0,4984	0,922	0,177	0,0649	0,9372	– 0,1840	0,909	0,156
13	<i>Fraxinus</i>	– 0,7986	1,1435	0,2354	0,903	0,226	0,4659	0,8354	– 0,2668	0,966	0,141

Предложенные модели могут быть использованы для валидации моделей, построенных по данным дистанционного зондирования той или иной совокупности деревьев на пробных площадях (модели 14) и той или иной совокупности древостоев (модели 15) в конкретном регионе. Использование предложенных моделей по результатам дистанционной регистрации морфологии крон и полога дает возможность оценки биомассы и углеродного пула деревьев и древостоев на некоторых территориях путем их совмещения с имеющимися нормативными материалами, предназначенными для определения биомассы деревьев и древостоев.

5.1.3. Модели для оценки возраста деревьев и древостоев лесообразующих видов Евразии по морфометрии крон и полога

Возраст насаждений является важным показателем, отражающим сукцессионную динамику после внешних воздействий и повреждений, играет ключевую роль в проведении лесохозяйственных мероприятий [Forest stand age classification using time series of photogrammetrically derived digital surface models, 2016] и сохранении биоразнообразия [Estimating and mapping forest age across Canada's forested ecosystems, 2023]. Возраст является основопола-

гающим фактором, влияющим на долгосрочную динамику углеродного баланса лесов [Mapping forest stand age in China using remotely sensed forest height and observation data, 2014], потенциал связывания углерода [Biomass resilience of neotropical secondary forests, 2016] и перспективы достижения углеродной нейтральности [Reconstructing long-term forest age of China by combining forest inventories, satellite-based forest age and forest cover data sets, 2023]. Возраст насаждений является важнейшим параметром, определяющим состояние лесных экосистем. Однако при отсутствии данных об изменении возрастной структуры насаждений в пространстве и времени становится невозможным учет истории нарушений и восстановления лесов, что приводит к увеличению неопределенности в оценках их углерод депонирующей способности [An algorithm of forest age estimation based on the forest disturbance and recovery detection, 2023]. Информацию о возрасте насаждений редко включали в разрабатываемые модели углеродного цикла из-за отсутствия надежной информации о его пространственном распределении. В целом, получить надежную крупномасштабную информацию о возрасте насаждений с высоким пространственным разрешением довольно сложно [Mapping spatial distribution of forest age in China, 2017; Mapping planted forest age using LandTrendr algorithm and Landsat 5–8 on the Loess Plateau, China, 2024b]. Тем не менее точное картирование возраста лесов имеет большое значение для управления лесным хозяйством и моделирования углеродного цикла [Precise aboveground biomass estimation of plantation forest trees using the novel allometric model and UAV-borne LiDAR, 2023].

Дистанционное спутниковое зондирование предоставляет возможность составления крупномасштабных карт возраста насаждений [Forest stand age classification using time series of photogrammetrically derived digital surface models, 2016; Forest age mapping based on multiple-resource remote sensing data, 2020]. При калибровке и валидации результатов оно всегда опирается на данные полевых измерений возраста, и это сочетание обеспечивает перспективный способ территориального картирования возраста лесных насаждений. Например, в Северной Америке для крупномасштабного картирования возраста лесных насаждений были использованы эмпирические зависимости между полученным со спутника индексом их повреждения и временем, прошедшим с момента последнего пожара [Amiro, Chen, 2003; Age structure and disturbance legacy of North American forests, 2011]. Однако для количественной привязки индекса повреждения к возрасту древостоя по этому методу требуются данные датирования пожарных подсушин, которые обычно недоступны. Кроме того, леса имеют повреждения не только от лесных пожаров, и совмещение нескольких типов нарушений приводит к существенной неопределенности. В другом исследовании при составлении национальной карты возраста древостоев были объединены данные лесной инвентаризации с полученным со спутника вегетационным индексом NDVI, вычисляемым по значениям спектральной яркости пикселей в красной и ближней инфракрасной областях электромагнитного спектра

[Spatial pattern of forest ages in China retrieved from national-level inventory and remote sensing imageries, 2011]. На территории Лёссового Плато в Китае была составлена карта распределения возраста лесов с помощью алгоритма *LandTrendr*. Алгоритм дал возможность довольно точно определить начало пост-пирогенной восстановительной динамики растительности по годичной траектории нормализованного индекса гарей *NBR (Normalized Burn Ratio)*, основанного на соотношении ближнего инфракрасного и среднего инфракрасного каналов. Сравнение с наземными данными показало наличие среднеквадратической ошибки, равной 2,1 года [Mapping planted forest age using LandTrendr algorithm and Landsat 5–8 on the Loess Plateau, China, 2024b].

При составлении крупномасштабных карт возраста насаждений используют методы машинного обучения, которые позволяют учитывать сложные взаимосвязи между их возрастом и всеми связанными с ним экзо- и эндогенными переменными [Forest age estimation in northern Arkhangelsk region based on machine learning pipeline on Sentinel-2 and auxiliary data, 2023]. В отличие от биологически обоснованных уравнений связи высоты и возраста древостоев, машинное обучение имеет корреляционный характер [Precise aboveground biomass estimation of plantation forest trees using the novel allometric model and UAV-borne LiDAR, 2023]. Методы машинного обучения были использованы для составления глобальной карты возраста лесов с разрешением 1 000 м на основе климатических данных и данных о биомассе из проекта *Globbiomass* (агрегированных с разрешением от 100 до 1 000 м с применением метода билинейной повторной выборки) [Mapping global forest age from forest inventories, biomass and climate data, 2021]. На исследовательском полигоне в сухих тропических лесах Коста-Рики выполнено картирование возраста насаждений с использованием набора гиперспектральных данных, бортового лидара полной формы волны и трех методов машинного обучения [Sun, Cao, Sanchez-Azofeifa, 2019]. Для картирования возраста насаждений на юге Китая были объединены методы выборочного анализа насаждений и отслеживания изменений растительности во времени и пространстве [Use of vegetation change tracker, spatial analysis, and random forest regression to assess the evolution of plantation stand age in Southeast China, 2020]. Поскольку различные методы машинного обучения показали разную точность при картировании возраста насаждений, был сделан вывод о необходимости их сравнительного анализа на основе количественной оценки вклада различных входных переменных с целью обоснования их выбора при калибровке по данным полевых измерений [High-resolution forest age mapping based on forest height maps derived from GEDI and ICESat-2 space-borne lidar data, 2023].

С использованием упомянутых методов было выполнено картирование возраста насаждений с разрешением 1 000 м и среднеквадратичной ошибкой 12 лет на основе уравнений роста древостоев по типам леса и регионам Китая. Затем для уточнения взаимосвязи между возрастом и высотой древостоев при картировании были добавлены данные о температуре, осадках

и высоте над уровнем моря [Mapping spatial distribution of forest age in China, 2017; Mapping forest type and age in China's plantations, 2020]. Было отмечено, что разрешение 1 000 м позволяло усреднить высоту многих лесных насаждений с точностью до пикселя, что приводило к завышению оценок возраста в молодых насаждениях и занижению в спелых [High-resolution forest age mapping based on forest height maps derived from GEDI and ICESat-2 spaceborne lidar data, 2023]. С помощью космического лидарного аппарата *Global Ecosystem Dynamics Investigation* (GEDI) были получены данные с высокой плотностью выборки, полезной для описания структурных характеристик глобальных лесов [The global ecosystem dynamics investigation: high-resolution laser ranging of the Earth's forests and topography, 2020]. Основываясь на наблюдениях GEDI, предоставленных спутником *Landsat*, и данных ICESat-2, в Китае было выполнено национальное картирование возраста насаждений с пространственным разрешением 30 м [Neural network guided interpolation for mapping canopy height of China's forests by integrating GEDI and ICESat-2 data, 2022].

В лесных экосистемах Канады для оценки возраста насаждений на основе данных *Landsat* с пространственным разрешением 30 м были объединены три подхода [Estimating and mapping forest age across Canada's forested ecosystems, 2023]. При первом подходе используются протоколы обнаружения изменений в нарушениях древостоев за период с 1985 по 2019 г., а время, прошедшее с момента нарушения, использовано в качестве показателя их возраста. При втором подходе используются композиции с коэффициентами отражения поверхности со спутника *Landsat* для идентификации пикселей, свидетельствующих о восстановлении после нарушения, произошедшем в течение двадцати лет до 1985 г. Наконец, инвертированные аллометрические уравнения связи между возрастом древостоя и высотой полога объединяются с картами таксационной структуры лесов и показателями продуктивности с целью оценить возраст насаждения для тех пикселей, которые не показывали признаков нарушений древостоев максимум до 150 лет. Комбинируя названные три подхода, рассчитаны возрасты насаждений для каждого пикселя лесных экосистем Канады. Эти пространственно-точные карты возраста насаждений предоставили важную информацию для понимания функционирования лесных экосистем и обоснования широкого спектра политических, научных и управленческих потребностей [Estimating and mapping forest age across Canada's forested ecosystems, 2023]. В России в связи с ежегодно повторяющимися на огромных территориях лесными пожарами, а также с вырубкой древостоев, картирование возрастной структуры лесов на основе дистанционного зондирования является насущной необходимостью, однако такие исследования проводятся сравнительно редко [Mapping stand age dynamics of the Siberian larch forests from recent Landsat observations, 2016; Forest age estimation in northern Arkhangelsk region based on machine learning pipeline on Sentinel-2 and auxiliary data, 2023].

Возраст дерева и древостоя традиционно измеряется путем отбора кернов на стволах деревьев, что представляет довольно трудозатратный процесс [Estimating forest stand age from LiDAR-derived predictors and nearest neighbor imputation, 2014]. Кроме того, существует проблема репрезентативности, когда возраст, полученный по модельным деревьям, может не соответствовать среднему возрасту насаждения, а количества пробных площадей недостаточно для охвата больших территорий [Forest stand age classification using time series of photogrammetrically derived digital surface models, 2016].

Возраст древостоя также может быть оценен с помощью уравнения регрессии с использованием фотограмметрически определенных высоты древостоя и размера кроны в качестве прогностических переменных, однако в подобных ситуациях неопределенность оценок довольно высока, и вместо возраста устанавливается лишь один из 20-летних классов возраста [Van Laar, Акса, 1997]. Более точные оценки морфологии крон и, как следствие, возраста деревьев и древостоев обеспечиваются воздушными лидарными технологиями [Farid, Goodrich, Sorooshian, 2006], в том числе с применением дронов [Determining tree height and crown diameter from high-resolution UAV imagery, 2017]. В ельниках Норвегии была исследована связь возраста древостоев разных классов бонитета с их средней высотой, зарегистрированной бортовым лидарным устройством. Установлено увеличение коэффициента детерминации R^2 с 0,46 до 0,96 по мере повышения класса бонитета [Mapping forest age using national forest inventory, airborne laser scanning, and Sentinel-2 data, 2020]. В Китае связь возраста древостоя с его средней высотой характеризовалась величиной R^2 на уровнях провинции и региона соответственно 0,53 и 0,87 [Mapping forest stand age in China using remotely sensed forest height and observation data, 2014]. В другом исследовании по Китаю названная связь оценивалась на уровне R^2 , равном 0,56 [Forest age mapping based on multiple-resource remote sensing data, 2020], и в насаждениях Финляндии на уровне 0,71 [Predicting stand age in managed forests using National Forest Inventory field data and airborne laser scanning, 2020].

В Финляндии были получены данные измерений 11 246 деревьев и выполнен их анализ согласно аллометрической модели:

$$\ln A = a_0 + a_1 \ln H + a_2 \ln D_{cr}, \quad (16)$$

где A – возраст дерева, лет. Было установлено, что для сосны, ели и березы коэффициент детерминации R^2 составил соответственно: 0,44; 0,54 и 0,44 [Kalliovirta, Tokola, 2005]. Диаметр кроны обеспечивал существенно меньший вклад в объяснение изменчивости возраста дерева, по сравнению с его высотой.

На основе двух авторских баз данных [Усольцев, 2023а; Усольцев, 2003б] на уровне лесообразующих родов Евразии был выполнен расчет моделей зависимости возраста деревьев и древостоев от их основных морфометрических показателей, доступных для лидарного сканирования:

$$\ln A = a_0 + a_1 \ln H + a_2 \ln D_{cr} + a_3 (\ln H) \times (\ln D_{cr}), \quad (17)$$

$$\ln A_m = a_0 + a_1 \ln H_m + a_2 \ln N, \quad (18)$$

где $(\ln H) \times (\ln D_{cr})$ – комбинированная переменная, характеризующая совместное действие двух независимых переменных; A_m и H_m – соответственно средние возраст, лет, и высота древостоя, м. Результаты расчета моделей (17) и (18) даны в табл. 4.

Вклады высоты дерева и диаметра кроны в объяснение изменчивости возраста дерева, согласно модели (17), составили в среднем соответственно 71 и 29 %, а вклады средней высоты древостоя и его густоты в объяснение изменчивости среднего возраста древостоя, согласно модели (18), составили в среднем соответственно 54 и 46 %.

Предложенные модели могут быть использованы при оценке возраста деревьев и древостоев лесообразующих родов Евразии с помощью бортовых лидарных технологий, в том числе с применением дронов.

5.1.4. Оценка сбежистости стволов деревьев лесообразующих видов Евразии для бортового лазерного зондирования

В результате совмещения технологий бортового и наземного лазерного сканирования разрабатываются статистические модели для оценки объема ствола [Estimation of stem attributes using a combination of terrestrial and airborne laser scanning, 2012]. Известно, однако, что точность оценки объема или массы ствола по его диаметру и высоте дерева зависит от степени варьирования полнодревесности ствола, обратно пропорциональной его сбежистости или относительной высоты (отношения высоты ствола к его диаметру на высоте груди). Таким образом, используя преимущества технологий бортового и наземного лазерного сканирования, можно моделировать объем и биомассу ствола по данным сканирования диаметра ствола и высоты дерева с коррекцией на сбежистость ствола путем включения в ее модель в качестве третьей независимой переменной. Поскольку масса ствола составляет около 80 % надземной биомассы дерева, включение в подобные модели сбежистости ствола в качестве третьей независимой переменной может повысить адекватность моделей.

Таблица 4

Результаты регрессионного анализа моделей (17) и (18)

№	Род (подрод)	Характеристика модели (17)						Характеристика модели (18)				
		a_0	a_1	a_2	a_3	$adjR^2$	SE	a_0	a_1	a_2	$adjR^2$	SE
1	<i>Pinus</i>	2,0952	0,6509	−0,7941	0,3001	0,601	0,378	2,5582	0,5814	−0,2069	0,652	0,459
2	<i>Picea</i>	2,7909	0,2059	–	0,1857	0,667	0,336	2,8303	0,5293	−0,2927	0,664	0,440
3	<i>Abies</i>	2,1308	0,6112	–	0,0879	0,656	0,411	2,8236	0,5567	−0,0873	0,617	0,418
4	<i>Larix</i>	2,9682	0,2755	–	0,1337	0,394	0,508	3,9710	0,2038	−0,4326	0,454	0,576
5	<i>Haploxydon</i>	2,6877	0,3331	−1,0974	0,6307	0,863	0,291	2,1712	0,9562	–	0,867	0,335
6	<i>Betula</i>	1,8218	0,5240	−0,4305	0,2574	0,635	0,352	3,2761	0,2462	−0,3193	0,655	0,399
7	<i>Populus</i>	1,1902	0,6135	–	0,1200	0,720	0,310	1,7981	0,6614	−0,2057	0,653	0,469
8	<i>Alnus</i>	0,3653	1,0042	−1,0035	0,4474	0,785	0,274	0,9047	0,9815	−0,1148	0,809	0,262
9	<i>Tilia</i>	1,3150	0,8894	–	0,0499	0,639	0,178	1,0307	1,0926	−0,2209	0,889	0,224
10	<i>Quercus</i>	1,3027	0,8567	−0,3547	0,1560	0,848	0,247	2,5069	0,5652	−0,3004	0,742	0,370
11	<i>Fagus</i>	1,6401	0,6048	−0,5573	0,3016	0,853	0,241	2,9558	0,4318	−0,2874	0,671	0,378
12	<i>Carpinus</i>	0,7643	0,7733	–	0,2354	0,730	0,385	1,6588	0,8031	−0,3526	0,731	0,348
13	<i>Fraxinus</i>	0,7219	0,7783	–	0,1867	0,778	0,373	1,6709	0,8255	−0,2346	0,838	0,401

Для построения моделей сбежистости (относительной высоты) стволов деревьев, которые могли бы использоваться при бортовом лазерном зондировании лесообразующих видов Евразии, использована авторская база данных [Усольцев, 2023а].

Принята следующая структура аллометрической модели:

$$\ln(H/D) = a_0 + a_1 \ln D_{cr} + a_2 \ln H, \quad (19)$$

где H/D – относительная высота стволов, м/см.

Результаты расчета моделей (19) представлены в табл. 5.

Таблица 5

Характеристика моделей (19)

Зависимая переменная ln (H/D) для родов	Регрессионные коэффициенты при независимых переменных			adjR ²	SE
	a ₀	a ₁ ln D _{cr}	a ₂ ln H		
Хвойные					
Pinus	−0,0271	−0,5342	0,1809	0,568	0,22
Picea	0,1457	−0,3413	0,0634	0,342	0,17
Abies	0,0729	−0,3267	0,0654	0,541	0,13
Haploxylon	−0,2151	−0,4263	0,1958	0,318	0,19
Larix	0,4626	−0,4848	0,0088	0,682	0,20
Лиственные					
Betula	0,7914	−0,3244	−0,0810	0,639	0,18
Populus	0,9228	−0,4684	−0,0621	0,742	0,17
Alnus	1,2513	−0,2348	−0,3150	0,596	0,17
Quercus	0,5558	−0,1416	−0,1493	0,405	0,18
Fagus	0,7604	−0,3884	−0,0397	0,537	0,24

Построенные аллометрические модели сбежистости стволов деревьев лесообразующих родов Евразии, как отношения высоты дерева к диаметру ствола на высоте груди, предназначены для оценки сбежистости стволов по значениям диаметра кроны и высоты дерева, измеряемым в процессе воздушного лазерного сканирования.

Установлено наличие отрицательной связи сбежистости ствола с диаметром кроны, однако биологически необъяснимо наличие отрицательной связи сбежистости с высотой дерева у хвойных и отрицательной связи – у лиственных (табл. 5). Данный факт может быть обусловлен некоторыми особенностями использованной базы данных, и в дальнейших исследованиях должен получить объяснение или хотя бы подтверждение или отрицание.

Установлено, что вклады независимых переменных в объяснение изменчивости сбежистости ствола неравнозначны: наибольший вклад вносит диаметр кроны (76 %) и наименьший – высота дерева (24 %).

5.2. Оценка биопродукционных показателей деревьев и насаждений по морфометрии крон и полога

В современных условиях часто требуется оперативно оценивать углерод депонирующую способность насаждений на некоторых лесных участках как в данный момент времени, так и с определенными временными интервалами. Методы фотограмметрии на основе аэрофотосъемки дали возможность определять размеры крон деревьев с большей точностью, чем при наземной таксации [Синицын, Сухих, 1979]. Сегодня большие перспективы в этом направлении открываются при использовании БПЛА, или дронов [Усольцев, 2014; SiDroForest: a comprehensive forest inventory of Siberian boreal forest investigations including drone-based point clouds, individually labeled trees, synthetically generated tree crowns, and Sentinel-2 labeled image patches, 2022].

5.2.1. Аллометрические модели для оценки биомассы деревьев лесообразующих видов по диаметру кроны в связи с использованием БПЛА

В настоящем исследовании предпринята попытка разработки аллометрических моделей, предназначенных для оценки биомассы деревьев лесообразующих родов России по диаметру кроны. Предполагается, что при измерении диаметра кроны с помощью дронов можно оперативно и с небольшими трудозатратами оценивать биомассу деревьев на лесных участках. К настоящему времени имеется большой набор аллометрических моделей и таблиц для оценки биомассы деревьев по диаметру ствола на высоте груди для разных древесных видов в разных странах [Ter-Mikaelian, Korzukhin, 1997]. Эти модели можно использовать при оценке биомассы деревьев и древостоев путем установления связей между диаметром ствола и параметрами крон, оцененными путем лазерного сканирования.

Подобные модели построены по материалам авторской базы данных [Усольцев, 2023а]. Принята следующая структура аллометрической модели:

$$\ln P_i = a_0 + a_1(\ln D_{cr}), \quad (20)$$

где P_i – биомасса i -й фракции в абсолютно сухом состоянии, кг: ствола, ветвей, хвои (листвы), надземной и корней соответственно P_s , P_b , P_f , P_a и P_r . Результаты расчета модели (20) представлены в табл. 6.

Таблица 6

Результаты расчета моделей (20)

Род (подрод)	Зависимая переменная	Регрессионные коэффициенты модели (20)		$adjR^2$	SE
		a_0	a_1		
1	2	3	4	5	6
Хвойные роды (подроды)					
<i>Pinus</i>	$\ln P_s$	1,3728	3,1588	0,775	1,04
	$\ln P_b$	-1,0900	3,3297	0,862	0,82
	$\ln P_f$	-1,0441	2,6438	0,825	0,75
	$\ln P_a$	1,5231	3,1102	0,809	0,92
	$\ln P_r$	0,2914	2,1315	0,747	0,83
<i>Picea.</i>	$\ln P_s$	-0,6877	4,2035	0,792	1,02
	$\ln P_b$	-1,3117	3,3039	0,816	0,74
	$\ln P_f$	-0,9527	2,7751	0,730	0,80
	$\ln P_a$	0,1182	3,7837	0,805	0,88
	$\ln P_r$	-1,6477	3,9079	0,859	0,77
<i>Abies.</i>	$\ln P_s$	3,6862	1,3585	0,372	0,81
	$\ln P_b$	1,0775	1,7742	0,632	0,64
	$\ln P_f$	1,2636	1,3489	0,435	0,72
	$\ln P_a$	3,8127	1,4107	0,429	0,75
	$\ln P_r$	-1,2933	3,3717	0,651	0,81
<i>Larix</i>	$\ln P_s$	0,9429	2,9603	0,783	1,00
	$\ln P_b$	-1,1464	2,8661	0,905	0,59
	$\ln P_f$	-1,9992	2,3545	0,872	0,58
	$\ln P_a$	1,1248	2,8846	0,818	0,87
	$\ln P_r$	0,7476	2,2860	0,694	0,70
<i>Haploxylon</i>	$\ln P_s$	-0,1241	3,2871	0,791	0,88
	$\ln P_b$	-1,0706	3,0015	0,815	0,75
	$\ln P_f$	-1,2602	2,6026	0,843	0,58
	$\ln P_a$	0,3997	3,1351	0,828	0,75
	$\ln P_r$	—	—	—	—
Лиственные роды					
<i>Betula</i>	$\ln P_s$	0,8579	2,6037	0,790	0,84
	$\ln P_b$	-1,3154	2,8681	0,797	0,91
	$\ln P_f$	-1,9517	2,1248	0,768	0,77
	$\ln P_a$	1,0178	2,6137	0,801	0,82
	$\ln P_r$	1,5260	1,7772	0,666	0,65
<i>Populus</i>	$\ln P_s$	0,3936	2,7814	0,823	0,49
	$\ln P_b$	-2,6687	3,3665	0,839	0,60
	$\ln P_f$	-3,2737	2,7978	0,785	0,59
	$\ln P_a$	0,4242	2,8530	0,835	0,48
	$\ln P_r$	—	—	—	—
<i>Tilia</i>	$\ln P_s$	3,0110	1,5766	0,551	0,85
	$\ln P_b$	1,3755	1,2847	0,559	0,76
	$\ln P_f$	-0,4838	1,1621	0,563	0,68
	$\ln P_a$	3,2197	1,5153	0,560	0,80
	$\ln P_r$	—	—	—	—

Окончание табл. 6

1	2	3	4	5	6
<i>Alnus</i>	$\ln P_s$	3,0247	1,6498	0,455	0,91
	$\ln P_b$	0,2965	1,8645	0,578	0,85
	$\ln P_f$	-0,4115	1,2563	0,502	0,67
	$\ln P_a$	3,1164	1,6524	0,475	0,88
	$\ln P_r$	—	—	—	—
<i>Salix</i>	$\ln P_s$	-1,0895	3,1089	0,975	0,31
	$\ln P_b$	-2,5138	3,2841	0,964	0,38
	$\ln P_f$	-2,3712	2,1896	0,939	0,34
	$\ln P_a$	-0,7207	3,0777	0,990	0,18
	$\ln P_r$	—	—	—	—
<i>Quercus</i>	$\ln P_s$	0,8666	2,9430	0,704	1,09
	$\ln P_b$	-2,0350	3,5970	0,854	0,85
	$\ln P_f$	-2,5974	2,4818	0,852	0,59
	$\ln P_a$	0,8901	3,0291	0,744	1,01
	$\ln P_r$	2,4277	1,4565	0,814	0,40

Картирование деревьев с помощью дронов с минимальной высоты дает возможность не только определять диаметры крон с большой точностью и скоростью, но и безошибочно идентифицировать древесные породы, даже такие, как ель и пихта, например по противоположной ориентации шишек.

Предложенные аллометрические модели могут быть использованы при оценках биомассы и органического углерода деревьев и древостоев лесообразующих родов России на основе цифровой фотограмметрии визуальных данных или лазерных облаков точек, получаемых с помощью дронов.

5.2.2. Аллометрические модели для оценки биомассы деревьев лесообразующих видов по диаметру кроны и высоте дерева

Биомасса оценивается более корректно при использовании в качестве прогностических переменных диаметра кроны (или ее площади горизонтальной проекции) и высоты растения, особенно применительно к многоствольным формам [Shrub height and crown projection area are effective predictors in aboveground biomass models for multi-stemmed European hazel, 2025]. С использованием евразийской базы данных [Усольцев, 2023a] рассчитаны подобные модели:

$$\ln P_i = a_0 + a_1 \ln H + a_2 \ln D_{cr}. \quad (21)$$

Результаты расчета моделей (21) показаны в табл. 7.

Таблица 7

Результаты расчета аллометрических моделей (21)

Род (подрод, вид)	Обозначения	Зависимые переменные				
		$\ln Ps$	$\ln Pf$	$\ln Pb$	$\ln Pa$	$\ln Pr$
1	2	3	4	5	6	7
<i>Pinus</i>	a_0	-2,9778	-1,9475	-2,4571	-1,9719	-2,2715
	$\ln Dcr$	1,0510	1,7508	2,1776	1,2917	1,2307
	$\ln H$	2,2852	0,6960	0,9898	1,9169	1,3971
	$adjR$	0,939	0,733	0,800	0,916	0,766
	SE	0,46	0,77	0,83	0,52	0,80
<i>Picea</i>	a_0	-2,8034	-1,8392	-2,4790	-1,5896	-2,7877
	$\ln Dcr$	0,5168	1,0718	1,5175	0,7205	0,7678
	$\ln H$	2,3304	1,0847	1,2284	1,9423	1,8013
	$adjR$	0,970	0,843	0,905	0,955	0,954
	SE	0,42	0,67	0,62	0,47	0,59
<i>Abies.</i>	a_0	-2,8361	-1,2246	-1,8268	-1,3890	-1,5837
	$\ln Dcr$	0,7528	1,0107	1,5012	0,9342	2,1189
	$\ln H$	2,3907	1,0306	1,0937	1,9154	0,7831
	$adjR$	0,962	0,844	0,890	0,947	0,849
	SE	0,40	0,53	0,55	0,42	0,55
<i>Larix</i>	a_0	-3,5825	-3,1799	-2,8938	-2,7548	-0,3435
	$\ln Dcr$	0,8256	1,7233	1,9322	1,0223	1,8637
	$\ln H$	2,5904	0,7475	1,0920	2,2547	0,5916
	$adjR$	0,969	0,874	0,930	0,968	0,692
	SE	0,38	0,58	0,52	0,37	0,69
<i>Haploxydon</i>	a_0	-2,4783	-1,8047	-2,3106	-1,4649	–
	$\ln Dcr$	0,9000	2,0546	1,6648	1,3975	–
	$\ln H$	2,0914	0,5083	1,1712	1,6119	–
	$adjR$	0,949	0,859	0,868	0,948	–
	SE	0,44	0,55	0,63	0,41	–
<i>Cryptomeria japonica</i> D.Don.	a_0	-2,8439	-0,7444	-3,2164	-1,6336	-2,6007
	$\ln Dcr$	1,1368	1,8165	2,5370	1,3735	1,5098
	$\ln H$	2,2423	0,5665	0,9315	1,7941	1,6387
	$adjR$	0,983	0,876	0,920	0,980	0,971
	SE	0,14	0,24	0,28	0,13	0,16
<i>Chamaecyparis</i> Spach.	a_0	-3,2581	-4,0527	-6,7577	-2,5622	-3,7548
	$\ln Dcr$	1,0413	1,1013	1,3285	1,1530	1,1709
	$\ln H$	2,3133	1,8582	2,7784	2,0825	2,0510
	$adjR$	0,889	0,612	0,790	0,834	0,765
	SE	0,39	0,78	0,66	0,48	0,59
<i>Betula</i>	a_0	-4,6768	-4,0244	-4,9111	-4,1122	-2,9349
	$\ln Dcr$	0,6819	1,1907	1,4751	0,7927	1,2968
	$\ln H$	2,8842	1,2363	1,9784	2,7024	1,8058
	$adjR$	0,953	0,768	0,867	0,946	0,874
	SE	0,39	0,70	0,69	0,41	0,56
<i>Populus</i>	a_0	-4,3265	-4,4415	-5,2304	-3,8630	–
	$\ln Dcr$	0,9907	1,8652	2,0729	1,1809	–
	$\ln H$	2,5802	1,1147	1,8481	2,4095	–
	$adjR$	0,948	0,838	0,874	0,941	–
	SE	0,45	0,70	0,81	0,47	–

1	2	3	4	5	6	7
<i>Quercus</i>	a_0	-4,1207	-3,7951	-4,2865	-3,4330	-2,8982
	$\ln Dcr$	0,3170	0,7027	0,7983	0,4000	1,6505
	$\ln H$	3,0316	1,5141	2,2805	2,8242	1,4486
	$adjR$	0,947	0,721	0,768	0,931	0,929
	SE	0,43	0,69	0,85	0,46	0,47
<i>Tilia</i>	a_0	-4,7784	-3,6694	-3,2104	-3,6263	-3,9469
	$\ln Dcr$	0,3170	0,7274	0,7080	0,3934	–
	$\ln H$	3,1643	1,2844	1,8070	2,7920	2,5759
	$adjR$	0,888	0,602	0,657	0,864	0,819
	SE	0,44	0,66	0,70	0,45	0,72
<i>Fagus sylvatica L.</i>	a_0	-4,2121	-3,6152	-3,5268	-3,5402	-4,3437
	$\ln Dcr$	0,7052	1,1374	1,6544	0,8925	1,5998
	$\ln H$	2,7809	1,1271	1,5673	2,5367	1,7786
	$adjR$	0,913	0,757	0,758	0,903	0,927
	SE	0,49	0,65	0,83	0,51	0,50
<i>Fraxinus</i>	a_0	-4,3855	-3,0952	-5,3485	-3,6806	-6,4083
	$\ln Dcr$	0,4382	0,6684	1,2022	0,5975	1,6552
	$\ln H$	3,0127	1,2951	2,5408	2,7960	2,4717
	$adjR$	0,920	0,664	0,858	0,926	0,957
	SE	0,53	0,71	0,79	0,49	0,18
<i>Alnus</i>	a_0	-6,3986	-4,6731	-5,8526	-5,8686	-5,3640
	$\ln Dcr$	0,4054	0,7020	1,0143	0,4508	–
	$\ln H$	3,6215	1,6730	2,4021	3,4646	2,9581
	$adjR$	0,939	0,643	0,779	0,931	0,896
	SE	0,36	0,64	0,66	0,37	0,31
<i>Carpinus betulus L.</i>	a_0	-5,2171	-6,1235	-5,2472	-4,9883	-5,3228
	$\ln Dcr$	0,9211	0,8412	1,3844	0,9476	1,3049
	$\ln H$	3,0387	2,1718	2,3776	3,0394	2,2248
	$adjR$	0,924	0,821	0,809	0,929	0,998
	SE	0,44	0,51	0,71	0,40	0,03
<i>Salix</i>	a_0	-3,5389	-0,3151	0,1529	-1,6297	-7,4071
	$\ln Dcr$	1,9024	3,2192	4,6239	2,6265	–
	$\ln H$	1,6770	-1,4312	-1,8624	0,6272	3,7977
	$adjR$	0,988	0,954	0,977	0,991	0,899
	SE	0,21	0,30	0,31	0,17	0,55
<i>Acer</i>	a_0	-6,9200	-5,0574	-7,8399	-6,4591	-2,0902
	$\ln Dcr$	0,5377	1,1782	1,6430	0,7392	–
	$\ln H$	3,8255	1,4725	2,9283	3,6174	1,8420
	$adjR$	0,932	0,740	0,892	0,939	0,964
	SE	0,29	0,42	0,42	0,28	0,17
<i>Chosenia arbutifolia (Pall.) A. Scvorts.</i>	a_0	-7,3317	-4,5567	-4,1352	-7,0189	–
	$\ln Dcr$	0,4270	0,4596	0,8807	0,6273	–
	$\ln H$	3,8444	1,6766	1,8236	3,6925	–
	$adjR$	0,923	0,924	0,894	0,897	–
	SE	0,38	0,66	0,95	0,43	–
<i>Robinia pseudo-acacia L.</i>	a_0	-4,8634	-2,8897	-3,7517	-3,4785	-6,1181
	$\ln Dcr$	0,1554	0,4027	0,5490	0,2502	0,3662
	$\ln H$	3,2779	1,3331	2,2382	2,8462	3,0281
	$adjR$	0,942	0,533	0,687	0,907	0,969
	SE	0,42	0,74	0,87	0,48	0,33

Поскольку известно, что характер связи биомассы с морфометрией деревьев у разных компонентов дерева различается [How does biomass allocation change with size and differ among species? An analysis for 1200 plant species from five continents, 2015], был выполнен анализ вклада ширины кроны и высоты дерева в объяснение изменчивости различных компонентов надземной биомассы (за исключением биомассы корней, модели для которой рассчитаны не для всех видов по причине нехватки данных). Поскольку различий между хвойными и лиственными по соотношению вкладов двух независимых переменных в объяснение изменчивости биомассы по всем компонентам не выявлено, рассчитаны средние значения для всех древесных видов (табл. 8). Установлено, что вклады обеих независимых переменных в объяснение названной изменчивости массы ассимиляционного аппарата разделились поровну (50:50), несколько смещенными в пользу высоты дерева оказались вклады для массы ветвей (47:53) и существенно смещенными в пользу высоты дерева – для массы ствола и надземной соответственно (22:78) и (29:71), что вполне ожидаемо, поскольку масса кроны зависит от ее ширины значительно в меньшей степени, по сравнению с массой ствола. Поскольку в надземной биомассе доля ствола превалирует, то похожее соотношение выявилось и для надземной биомассы (табл. 8).

Таблица 8

Вклад таксационных показателей деревьев *Dcr* и *H* в объяснение изменчивости структуры биомассы хвойных и лиственных видов, %

Вид (род)	Компоненты надземной биомассы							
	ствола		хвоя (листва)		ветви		надземная	
	<i>Dcr</i>	<i>H</i>	<i>Dcr</i>	<i>H</i>	<i>Dcr</i>	<i>H</i>	<i>Dcr</i>	<i>H</i>
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Хвойные								
<i>Pinus</i>	29,2	70,8	69,3	30,7	66,5	33,5	37,9	62,1
<i>Picea</i>	12,3	87,7	38,2	61,8	43,6	56,4	19,0	81,0
<i>Abies</i>	22,1	77,9	46,9	53,1	55,3	44,7	30,5	69,5
<i>Larix</i>	24,3	75,7	69,9	30,1	64,1	35,9	31,4	68,6
<i>Pinus sibirica</i> , <i>P. koraiensis</i>	25,6	74,4	75,6	24,4	52,2	47,8	39,9	60,1
<i>Cryptomeria japonica</i>	26,7	73,3	69,6	30,2	66,2	33,8	35,5	64,5
<i>Chamaecyparis</i>	36,3	63,7	42,8	57,2	39,9	60,1	41,2	58,8
Лиственные								
<i>Betula</i>	24,7	75,3	57,3	42,7	50,9	49,1	29,0	71,0
<i>Populus</i>	29,5	70,5	64,3	35,7	55,1	44,9	34,5	65,5
<i>Quercus</i>	9,7	90,3	32,7	67,3	28,4	71,6	12,9	87,1
<i>Tilia</i>	15,7	84,3	52,1	47,9	42,5	57,5	21,3	78,7
<i>Fagus sylvatica</i>	22,1	77,9	56,1	43,9	54,1	45,9	28,2	71,8
<i>Fraxinus</i>	13,4	86,6	35,2	64,8	33,5	66,5	18,4	81,6
<i>Alnus</i>	14,8	85,2	39,4	60,6	39,5	60,5	16,8	83,2

1	2	3	4	5	6	7	8	9
<i>Carpinus betulus</i>	26,7	73,3	33,8	66,2	41,2	58,8	29,1	70,9
<i>Salix</i>	60,2	39,8	75,0	25,0	76,8	23,2	84,8	15,2
<i>Acer</i>	17,2	82,8	54,2	45,8	45,4	54,6	23,2	76,8
<i>Chosenia arbutifolia</i>	9,2	90,8	13,7	86,3	21,9	78,1	13,4	86,6
<i>Robinia pseudo-acacia</i>	4,5	95,5	23,2	76,8	19,7	80,3	8,1	91,9
Средние	22,3 ± 12,3	77,7 ±12,3	50,0 ±18,1	50,0 ±18,1	47,2 ±15,3	52,8 ±15,3	29,2 ±16,6	70,8 ±16,6

При практическом использовании комплекта разработанных моделей важно знать, насколько различается структура биомассы разных видов при равенстве их морфологических показателей. Для этого рассчитаны средние для всех видов значения ширины кроны и высоты дерева, которые составили соответственно $3,4 \pm 1,0$ м и $13,5 \pm 2,9$ м, и по ним протабулированы все модели табл. 7. Затем расчетные значения биомассы, приведенные к единой морфоструктуре деревьев, для каждой фракции биомассы были ранжированы в убывающей последовательности (рис. 137).

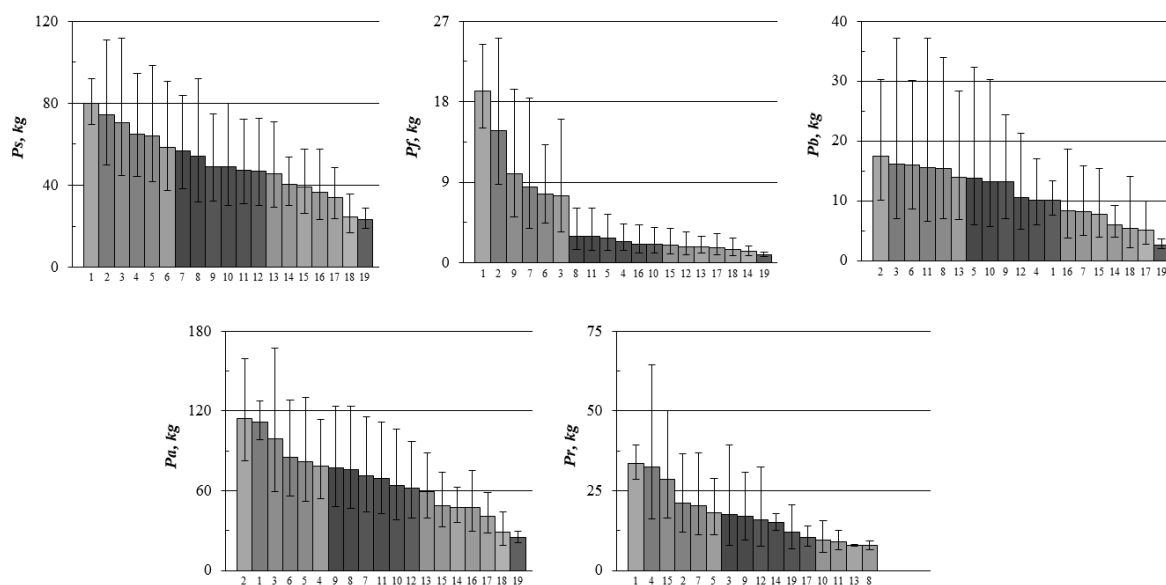


Рис. 137. Биомасса деревьев лесообразующих видов (родов) Евразии, имеющих ширину кроны 3,4 м и высоту ствола 13,5 м, в убывающей последовательности. Обозначения видов (родов) по оси абсцисс: 1 – *Cryptomeria japonica* D. Don.; 2 – *Abies*; 3 – *Pinus*; 4 – *Larix*; 5 – *Quercus*; 6 – *Haploxylon*, or *Strobus*; 7 – *Chamaecyparis*; 8 – *Fraxinus*; 9 – *Picea*; 10 – *Fagus sylvatica*; 11 – *Robinia pseudoacacia*; 12 – *Tilia*; 13 – *Carpinus betulus*; 14 – *Acer*; 15 – *Betula*; 16 – *Populus*; 17 – *Alnus*; 18 – *Chosenia arbutifolia*; 19 – *Salix*

Итак, двухфакторные модели биомассы деревьев, приведенные в табл. 7, могут быть использованы непосредственно при оценке биомассы деревьев путем их совмещения с значениями ширины кроны и высоты дерева, получаемыми в процессе облета лесного массива, при условии успешной идентификации древесных видов и сегментации отдельных деревьев в режиме реального времени.

5.2.3. Регрессионные модели для оценки фитомассы древостоев на основе бортового лидара

Методы лидарной оценки биомассы на единице площади древостоя являются предпочтительным подходом во многих национальных оценках лесов, поскольку дают возможность зондирования больших площадей в пространстве и времени [Lidar sampling for large-area forest characterization: A review, 2012]. Как уже упоминалось в предыдущих главах, при лидарном бортовом зондировании древостоя могут быть получены такие его морфометрические показатели, как средняя высота, густота и средний диаметр кроны. Последний показатель может быть коррелирован с густотой [Иванов, Борисов, Петренко, 2019], к тому же он отсутствует в имеющихся базах данных. Поэтому регрессионная модель фитомассы древостоя реально может включать лишь две независимых переменных – среднюю высоту и густоту.

С использованием авторской базы данных [Усольцев, 2023б] для лесобразующих видов (родов) Евразии рассчитаны двухфакторные модели:

$$\ln P_i = a_0 + a_1 \ln N + a_2 \ln H_{cp}, \quad (22)$$

где P_i – фитомасса i -й фракции: стволов, ветвей, листвы (хвои), нижнего яруса, надземная и корней соответственно P_s , P_b , P_f , P_u , P_a и P_r , т/га; N – густота древостоя, тыс. экз. на 1 га; H_{cp} – средняя высота древостоя, м. Полученные результаты расчетов модели (22) показаны в табл. 9.

Таблица 9

Результаты расчета моделей (22)

Род (подрод)	Зависимая переменная	Регрессионные коэффициенты модели (1)			$adjR^2$	SE
		a_0	a_1	a_2		
1	2	3	4	5	6	7
<i>Pinus</i> (двухвойные сосны)	$\ln P_s$	–0,6291	0,3652	1,8586	0,886	0,33
	$\ln P_b$	0,1329	0,1292	0,8724	0,429	0,53
	$\ln P_f$	0,0173	0,3241	0,6160	0,247	0,49
	$\ln P_a$	0,4724	0,2963	1,5321	0,849	0,32
	$\ln P_r$	–0,8560	0,2992	1,4580	0,723	0,44
<i>Picea</i>	$\ln P_s$	–1,6841	0,5298	2,2226	0,935	0,35
	$\ln P_b$	–1,4618	0,5279	1,5530	0,763	0,48
	$\ln P_f$	–1,0737	0,5686	1,2468	0,582	0,55
	$\ln P_a$	–0,3997	0,4918	1,8754	0,914	0,35
	$\ln P_r$	–0,8583	0,2936	1,6095	0,822	0,57

1	2	3	4	5	6	7
<i>Abies</i>	$\ln P_s$	-1,0142	0,6347	2,0192	0,800	0,44
	$\ln P_b$	-1,2477	0,4961	1,4663	0,643	0,47
	$\ln P_f$	-1,2291	0,6055	1,2739	0,479	0,49
	$\ln P_a$	-0,1565	0,6049	1,8035	0,775	0,42
	$\ln P_r$	-1,8495	0,7029	1,8707	0,536	0,54
<i>Haploxydon</i> (пятихвой- ные сосны)	$\ln P_s$	-2,2063	0,7077	2,4667	0,946	0,60
	$\ln P_b$	-2,1964	0,6152	1,7821	0,847	0,64
	$\ln P_f$	-1,1597	0,4918	1,0983	0,704	0,60
	$\ln P_a$	-1,1024	0,6562	2,1480	0,935	0,48
	$\ln P_r$	-2,2725	0,3766	2,0144	0,867	0,33
<i>Larix</i>	$\ln P_s$	-1,8876	0,4745	2,3202	0,847	0,46
	$\ln P_b$	-2,0643	0,4653	1,6475	0,660	0,55
	$\ln P_f$	-2,6405	0,6391	1,3714	0,619	0,58
	$\ln P_a$	-1,1973	0,4900	2,1269	0,835	0,44
	$\ln P_r$	-0,1032	0,2831	1,2649	0,591	0,49
<i>Betula</i>	$\ln P_s$	-0,8007	0,3026	1,8768	0,869	0,38
	$\ln P_b$	-0,6749	0,0851	1,1701	0,664	0,49
	$\ln P_f$	-1,9922	0,3828	1,0988	0,441	0,49
	$\ln P_a$	-0,2051	0,2841	1,7249	0,858	0,35
	$\ln P_r$	0,3568	0,0740	1,0540	0,557	0,53
<i>Populus</i>	$\ln P_s$	-1,5612	0,3454	2,1107	0,903	0,32
	$\ln P_b$	-0,9394	0,0919	1,2835	0,634	0,54
	$\ln P_f$	-1,7476	0,3806	0,9989	0,346	0,48
	$\ln P_a$	-0,5860	0,2813	1,8427	0,875	0,35
	$\ln P_r$	-0,9358	0,2256	1,5097	0,652	0,42
<i>Alnus</i>	$\ln P_s$	-2,9721	0,4732	2,6341	0,822	0,27
	$\ln P_b$	-4,5141	0,6612	2,3473	0,406	0,52
	$\ln P_f$	-3,5712	0,5374	1,5514	0,249	0,48
	$\ln P_a$	-2,3567	0,4866	2,4584	0,837	0,27
	$\ln P_r$	-1,2159	0,1249	1,5901	0,597	0,33
<i>Quercus</i>	$\ln P_s$	0,1899	0,1573	1,6604	0,777	0,41
	$\ln P_b$	0,1475	-	1,1251	0,464	0,68
	$\ln P_f$	-0,4069	0,1914	0,6268	0,141	0,52
	$\ln P_a$	0,8338	0,1257	1,5080	0,739	0,43
	$\ln P_r$	2,1629	0,0060	0,5639	0,173	0,64
<i>Tilia</i>	$\ln P_s$	-3,1440	0,5870	2,7551	0,909	0,21
	$\ln P_b$	-1,6442	0,1888	1,4811	0,697	0,28
	$\ln P_f$	-0,2091	0,1242	0,3645	0,131	0,20
	$\ln P_a$	-2,3854	0,5285	2,5362	0,913	0,19
	$\ln P_r$	-0,6577	0,7459	1,4729	0,392	0,48
<i>Carpinus</i>	$\ln P_s$	-1,1934	0,2424	2,1981	0,792	0,40
	$\ln P_b$	-1,8061	0,2344	1,8987	0,415	0,76
	$\ln P_f$	-1,9977	0,1951	1,2158	0,629	0,30
	$\ln P_a$	-0,6285	0,2188	2,0800	0,763	0,41

1	2	3	4	5	6	7
В среднем	$\ln P_s$	—	—	—	$0,862 \pm 0,059$	$0,38 \pm 0,1$
	$\ln P_b$	—	—	—	$0,602 \pm 0,151$	$0,54 \pm 0,1$
	$\ln P_f$	—	—	—	$0,415 \pm 0,205$	$0,47 \pm 0,1$
	$\ln P_a$	—	—	—	$0,845 \pm 0,064$	$0,36 \pm 0,1$
	$\ln P_r$	—	—	—	$0,591 \pm 0,203$	$0,48 \pm 0,1$

Путем табулирования построенных моделей по средним значениям густоты и высоты древостоя получены диаграммы распределения различных родов по величине фракций фитомассы на единице площади древостоев (рис. 138).

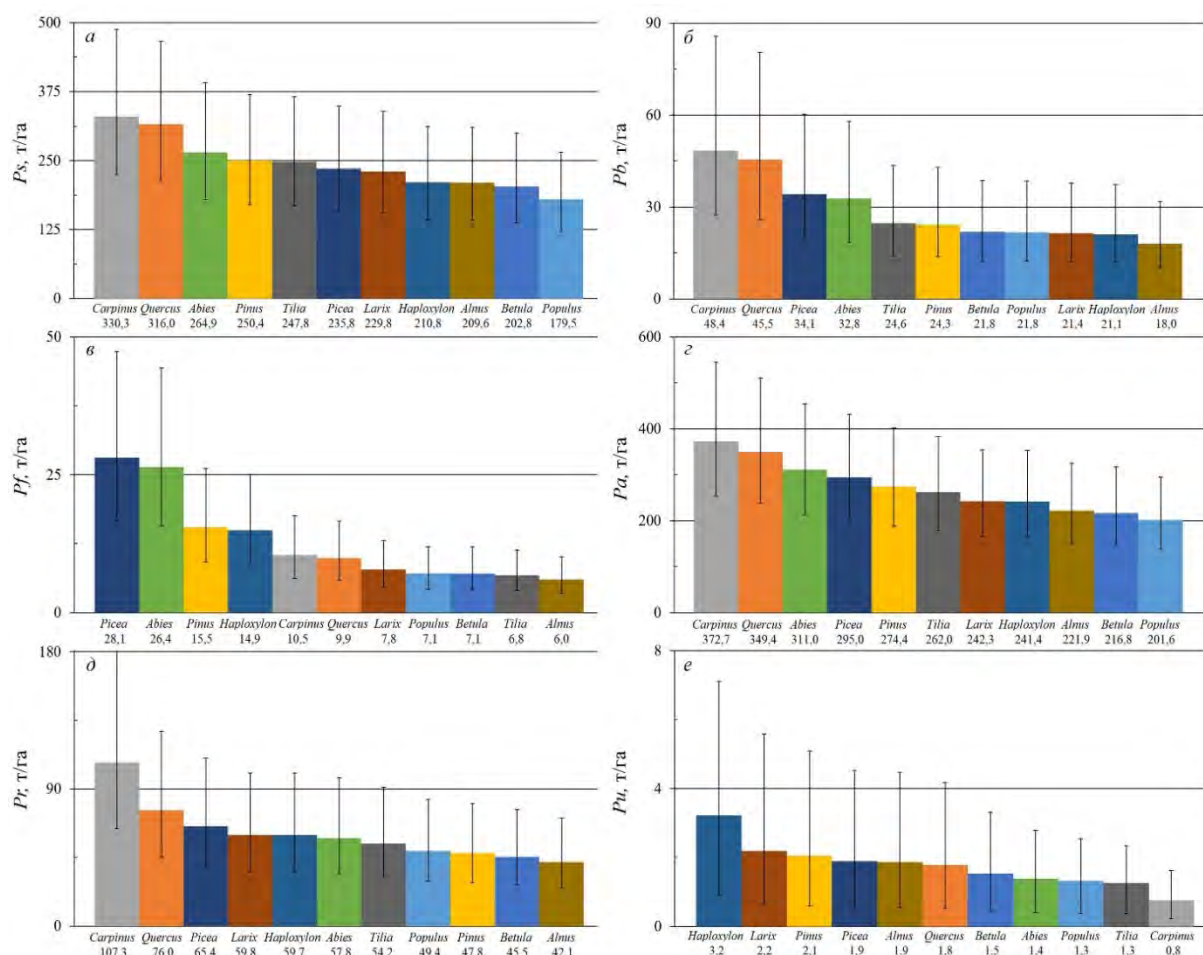


Рис. 138. Ранжирование 11 родов Евразии по величине фракций фитомассы при средней густоте 13,1 тыс. экз. на 1 га и средней высоте древостоев 15,0 м; а–е – соответственно фитомасса стволов, ветвей, хвои (листвы), надземная, корней и нижнего яруса

Результаты анализа вкладов двух независимых переменных в объяснение изменчивости фитомассы древостоев приведены в табл. 10.

Таблица 10

Вклад независимых переменных модели (22) в объяснение изменчивости зависимых переменных, %

Зависимая переменная	Независимые переменные модели (22)			
	lnN	lnH	lnN	lnH
	<i>Pinus</i>		<i>Picea</i>	
lnP _s	25	75	24	76
lnP _b	20	80	31	69
lnP _f	47	53	38	62
lnP _a	25	75	25	75
lnP _r	27	73	18	82
M ± σ	28,8±10,5	71,2±10,5	27,2±7,6	72,8±7,6
	<i>Abies</i>		<i>Haploxyton</i>	
lnP _s	36	64	23	77
lnP _b	38	62	27	73
lnP _f	46	54	32	68
lnP _a	38	62	24	76
lnP _r	42	58	25	75
M ± σ	40,0±4,0	60,0±4,0	26,2±3,6	73,8±3,6
	<i>Larix</i>		<i>Betula</i>	
lnP _s	31	69	25	75
lnP _b	38	62	13	87
lnP _f	50	50	41	59
lnP _a	33	67	25	75
lnP _r	29	71	11	89
M ± σ	36,2±8,4	63,8±8,4	23,0±12,0	77,0±12,0
	<i>Populus</i>		<i>Alnus</i>	
lnP _s	25	75	32	68
lnP _b	13	87	43	57
lnP _f	44	56	48	52
lnP _a	23	77	33	67
lnP _r	26	74	16	84
M ± σ	26,2±11,2	73,8±11,2	34,4±12,3	65,6±12,3
	<i>Quercus</i>		<i>Tilia</i>	
lnP _s	16	84	35	65
lnP _b	-	-	25	75
lnP _f	37	63	46	54
lnP _a	14	86	34	66
lnP _r	3	97	48	52
M ± σ	17,5±14,2	82,5±14,2	37,6±9,4	62,4±9,4

Окончание табл. 10

Зависимая переменная	Независимые переменные модели (22)			
	lnN	lnH	lnN	lnH
	<i>Carpinus</i>		В целом	
$\ln P_s$	18	82	26,4±6,5	73,6±6,5
$\ln P_b$	19	81	26,7±10,7	73,3±10,7
$\ln P_f$	24	76	41,2±7,9	58,8±7,9
$\ln P_a$	17	83	26,5±7,4	73,5±7,4
$\ln P_r$	-	-	24,5±13,5	75,5±13,5
$M \pm \sigma$	19,5±3,1	80,5±3,1	29,0±9,2	71,0±9,2

Примечание. $M \pm \sigma$, где M – среднее значение; σ – стандартное отклонение.

Судя по данным табл. 10, основной вклад в объяснение изменчивости фитомассы древостоев вносит их средняя высота (около 71 %). В то же время при игнорировании густоты одна лишь высота древостоев может обеспечить коэффициент детерминации модели для надземной фитомассы около 0,55 [Nelson, Swift, Krabill, 1988]. При моделировании фитомассы древостоев Северной Евразии с учетом видового состава при включении в модель высоты и густоты древостоя в качестве независимых переменных коэффициенты детерминации для массы стволов, ветвей и хвои (листвы) повысились соответственно на 6,1, 7,6 и 2,3 % по отношению к модели с одной независимой переменной – высотой древостоя [Усольцев, 1998].

В реальных условиях бортового сканирования лесного полога на больших площадях бывает трудно дифференцировать покров по видовому составу древостоев, особенно если учесть, что это не всегда дает повышение точности результатов. При оценке надземной фитомассы древостоев в штате Джорджия (США) путем лазерного профилирования дифференциация древостоев по породному составу повысила точность оценки лишь на 0,4–1,0 % [Nelson, Swift, Krabill, 1988]. Для условий, когда нет возможности или необходимости разделения лесного покрова по видовому составу при его лидарном профилировании, рассчитаны модели (22), обозначенные по видовому составу (табл. 11).

Таблица 11

Результаты расчета моделей (22) без учета видового состава древостоев

Зависимая переменная	Регрессионные коэффициенты модели (1)			$adjR^2$	SE
	a_0	a_1	a_2		
$\ln P_s$	-1,0295	0,4023	2,0088	0,864	0,41
$\ln P_b$	-0,6860	0,2242	1,2230	0,519	0,61
$\ln P_f$	-0,4692	0,3595	0,7895	0,210	0,69
$\ln P_a$	-0,0250	0,3518	1,7222	0,825	0,40
$\ln P_r$	-0,5010	0,2397	1,3944	0,667	0,54
$\ln P_u$	3,5217	-0,4499	-0,6666	0,073	1,25
В среднем				0,526±0,32	0,65±0,31

Таким образом, при лидарном профилировании лесного полога можно рекомендовать для практического использования регрессионные модели, включающие в качестве независимых переменных высоту древесного полога и его густоту. Если определение высоты с помощью бортового лидара не представляет сегодня проблемы, то определение истинной густоты, как уже упоминалось выше, довольно проблематично. Последние исследования показали, что с применением методов нейронных сетей может быть идентифицировано более 60 % деревьев, расположенных под основным пологом [Automatic detection of individual trees in forests based on airborne LiDAR data with a tree region-based convolutional neural network (RCNN), 2023]. Современные темпы развития методов искусственного интеллекта порождают надежду на возможность полного решения проблемы окклюзии и полной регистрации «невидимых» деревьев в лесном пологе.

5.2.4. Аллометрические модели для оценки биомассы отмерших ветвей растущих деревьев в естественных сосняках и культурах по морфометрии крон, доступной для лидарного сканирования

Биомасса отмерших ветвей, сохранившихся на стволах деревьев в нижней части крон, играет важную роль при моделировании лесных пожаров [Alexander, Cruz, 2011; Alexander, Cruz, 2012]. В имеющихся базах данных о биомассе деревьев сведения о массе отмерших ветвей на стволах деревьев отсутствуют [BAAD: a Biomass And Allometry Database for woody plants, 2015; A dataset of forest biomass structure for Eurasia, 2017]. Таким образом, масса отмерших ветвей деревьев и древостоев не учитывается в расчетах как приходной (живая биомасса), так и расходной (подстилка, валеж) составляющей углеродного цикла и как бы «зависает между небом и землей». В опубликованных данных о биомассе деревьев сосны обыкновенной Красноярской лесостепи доля отмерших ветвей в надземной биомассе варьирует в диапазоне от 1 до 22 % [Семечкина, 1978], однако попытки выявить факторы, объясняющие столь широкий ее диапазон, довольно редки [Семечкина, 1978; Уткин, Ермолова, 1982; Бабиц, Мерзленко, Евдокимов, 2004]. Связи массы отмерших ветвей с дендрометрическими показателями деревьев и древостоев обычно не исследуются.

Объектом исследования послужили чистые сосняки естественного и искусственного происхождения степной зоны, в которых было заложено 40 пробных площадей. Их таксационная характеристика, а также характеристика 360 модельных деревьев, взятых на 40 пробных площадях в островных борах степной зоны, была опубликована ранее [Усольцев, Цепордей, 2023].

Для оценки зависимости массы отмерших ветвей от диаметра кроны и высоты дерева принята следующая структура регрессионной модели:

$$\ln P_d = a_0 + a_1(\ln D_{cr}) + a_2(\ln H), \quad (23)$$

где P_d – биомасса отмерших ветвей в абсолютно сухом состоянии, кг.

Известно, что естественные древостои и культуры характеризуются разной густотой и производительностью [Залесов, Лобанов, Луганский, 2002]. Для оценки влияния происхождения древостоев на величину массы отмерших ветвей модель (23) дополнена бинарной переменной B , кодирующей происхождение древостоев: для естественных $B = 0$ и для культур $B = 1$ [Usoltsev, Shobairi, Tsepordey, 2020].

Ввод в уравнение (23) бинарной переменной B означает, что трехмерная поверхность (диаметр кроны – высота дерева – масса отмерших ветвей) в координатах X – Y – Z смещается между деревьями естественного и искусственного происхождения вдоль оси Z (оси ординат) на величину коэффициента регрессии при бинарной переменной B . В окончательном виде получена регрессионная модель:

$$\ln P_d = -7,2482 + 0,8518(\ln D_{cr}) + 2,7812(\ln H) + 0,8578B; \quad (24)$$

$$adjR^2 = 0,837;$$

$$SE = 0,88,$$

в которой коэффициенты регрессии при всех независимых переменных статистически значимы на уровне $p < 0,001$ и выше. Вклады диаметра кроны, высоты дерева и происхождения древостоя в объяснение изменчивости массы отмерших ветвей составили соответственно 19, 62 и 19 %. Путем табулирования модели (24) по задаваемым значениям диаметра кроны и высоты дерева получена двухвходовая таблица (табл. 12).

Таблица 12

Расчетные, согласно модели (24), значения массы отмерших вервей (кг) деревьев естественного происхождения (верхняя строка) и культур (нижняя строка) в зависимости от диаметра кроны и высоты дерева

Высота дерева, м	Диаметр кроны, м						
	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5
2	0,003	0,005	0,007	0,009	–	–	–
	0,006	0,012	0,016	0,021			
6	0,06	0,10	0,15	0,19	0,23	–	–
	0,14	0,24	0,35	0,44	0,53		
10	–	0,43	0,61	0,78	0,94	1,10	–
		1,01	1,43	1,83	2,21	2,58	
14	–	–	1,55	1,98	2,39	2,79	3,19
			3,65	4,66	5,64	6,59	7,51
18	–	–	–	–	4,81	5,62	6,41
					11,35	13,25	15,11

Согласно табл. 12, масса отмерших ветвей у крупных деревьев может достигать 15 кг, при этом в культурах показатель примерно вдвое выше, чем в естественных древостоях.

При бортовом лазерном зондировании не всегда можно отличить естественные древостои и культуры, особенно в старших возрастах. На подобных ситуациях рассчитаны обобщенные модели для массы отмерших ветвей, т. е. без разделения исходных данных по происхождению древостоев. Для этого использован массив исходных данных, включающий совокупность деревьев естественного происхождения и культур трех сосновых боров: Аманкарагайского, Аракарагайского и Казахского мелкосопочника. Получена модель:

$$\begin{aligned} \ln P_d &= -6,0949 + 1,1444 (\ln D_{cr}) + 2,3321 (\ln H); \\ adjR^2 &= 0,814; \\ SE &= 0,88. \end{aligned} \quad (25)$$

Вклады диаметра кроны и высоты дерева в объяснение изменчивости массы отмерших ветвей при этом составили соответственно 32 и 68 %.

Предложенные аллометрические модели могут быть использованы при оценках массы отмерших ветвей у деревьев сосны обыкновенной на основе бортового и наземного лазерного зондирования. При расчетах углеродных пулов в сосновых лесах степной зоны на величину массы отмерших ветвей необходимо вносить 5–6 %-ную поправку.

5.2.5. Прогнозирование радиального прироста стволов в естественных сосняках и культурах по морфометрии крон, доступной для лидарного сканирования

При моделировании роста деревьев и в лесной экологии в целом установлена существенная связь структуры кроны с радиальным приростом ствола [Pretzsch, 2021a; Modelling crown width–diameter relationship for Scots pine in the central Europe, 2017; Modelling individual tree height to crown base of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) and European beech (*Fagus sylvatica* L.), 2017]. Это объясняется теоретическими структурными и функциональными взаимосвязями структуры кроны и радиального прироста, а также историческим наследием (*historical legacy*) структуры кроны в процессе формирования годичного кольца [Esser, 1946; Pretzsch, 2021a; A quantitative analysis of plant form- the pipe model theory: II. Further evidence of the theory and its application in forest ecology, 1964]. Однако взаимосвязь между структурными характеристиками кроны и годичных колец плохо изучена по причине высокой трудоемкости оценки структуры кроны с помощью классических подходов.

Последние исследования показали тесную взаимосвязь между структурой кроны и радиальным приростом ствола у ели европейской [Neighborhood competition modulates the link between crown structure and tree ring variability in monospecific and mixed forest stands, 2024; Linking crown structure with tree ring pattern: methodological considerations and proof of concept, 2022]. Аналогичное исследование названной взаимосвязи у шести лесобразующих видов в Германии и Испании [Crown structure indicates tree secondary growth, competition legacy, and growth potential of dominant species in Europe, 2025] показало, что хвойные (*Picea abies* (L.) H. Karst., *Pinus sylvestris* L., *Pseudotsuga menziesii* (Mirbel) Franco, *Larix decidua* Mill), как правило, демонстрируют более тесную связь между структурой кроны и шириной древесного кольца, чем лиственные (*Fagus sylvatica* L. и *Quercus robur* L.). Понимание взаимосвязей между трехмерной структурой кроны и особенностями роста различных древесных видов может значительно способствовать пониманию адаптаций растений к окружающей среде и их структурных и функциональных реакций [Jacobs, Rais, Pretzsch, 2021; Crown structure indicates tree secondary growth, competition legacy, and growth potential of dominant species in Europe, 2025].

Размер и форма кроны дерева являются результатом его развития в прошлом. Эффект экологической памяти (*ecological memory effect*), заложенный в ксилеме в виде структуры древесных колец, представляет собой наследие, насчитывающее от 5 до 30 лет и охватывающее эффекты краткосрочной и долгосрочной памяти [Hilmers, Schmied, Pretzsch, 2022; Pretzsch, 2021b; The past matters: Previous management strategies modulate current growth and drought responses of Norway spruce (*Picea abies* H. Karst.), 2022]. Этот эффект наследия имеет решающее значение для понимания развития и степени пластичности формы крон и деревьев в целом. Поэтому наряду с ранее упомянутым историческим наследием структуры кроны в процессе формирования годичного кольца можно говорить о текущем наследии (*current legacy*). Однако остается неясным, какое количество лет экологической памяти, зафиксированной в годичных кольцах, можно объяснить нынешней структурой кроны [Crown structure indicates tree secondary growth, competition legacy, and growth potential of dominant species in Europe, 2025].

В изложенных результатах анализа взаимосвязей между структурой кроны и радиальным приростом ствола исследовались в основном парные связи прироста с одной из морфологических характеристик кроны. В действительности структура кроны определяется совокупностью названных характеристик, из которых основными являются длина и диаметр (или площадь горизонтальной проекции) кроны, отношение длины кроны к высоте дерева (кроновое отношение – *crown ratio*), отношение длины кроны к ее диаметру (стройность кроны – *crown slenderness*), расстояние до нижней границы кроны, объем кроны, доля мантии (охвоенной части кроны) в об-

щем объеме кроны и т. п. Поэтому при прогнозировании радиального прироста ствола по совокупности морфологических (структурных) характеристик возникает проблема мультиколлинеарности (взаимной корреляции) названных характеристик. В некоторых исследованиях, где вместо парных связей применена двухфакторная регрессия, было показано, что совместное действие высоты дерева и площади горизонтальной проекции кроны объясняет 94–95 % изменчивости объема кроны [Estimating urban above ground biomass with multi-scale LiDAR, 2018] и надземной фитомассы дерева [High-resolution forest age mapping based on forest height maps derived from GEDI and ICESat-2 space-borne lidar data, 2023], однако анализ мультиколлинеарности названных двух независимых переменных авторами не был проведен.

По фактическим данным автора, упомянутым ранее, были разработаны прогностические модели текущего прироста стволов по морфометрическим показателям крон. На дисках ствола, выпиленных на высоте груди, измеряли средние по четырем направлениям радиусы сечения без коры и пять или десять лет назад. Разность между радиусами без коры и пять лет назад, деленная на пять, определена как годичный радиальный прирост – средний за пять лет; разность между радиусами без коры и десять лет назад, деленная на десять, определена как годичный радиальный прирост – средний за десять лет. Разность между площадями сечения ствола без коры и пять лет назад определена как прирост площади сечения ствола на высоте груди, накопленный за пять лет; разность между площадями сечения ствола без коры и десять лет назад определена как прирост площади сечения ствола, накопленный за десять лет. Принадлежность исходных данных к естественным соснякам и культурам закодирована фиктивной (бинарной) переменной: $B = 0$ – для культур и $B = 1$ – для естественных сосняков.

В качестве зависимых переменных были приняты Zs_5 и Zs_{10} – приросты площади сечения ствола на высоте груди, накопленные за пять и десять лет, см^2 ; Z_5 и Z_{10} – годичные радиальные приросты ствола на высоте груди, средние соответственно за пять и десять лет, мм. В качестве независимых переменных рассмотрены следующие морфометрические характеристики крон: S_{cr} – площадь горизонтальной проекции кроны, м^2 ; H – высота дерева, м; L_{cr} – длина кроны, м; D_{cr} – диаметр кроны, м; L_{cr}/H – кроновое отношение; L_{cr}/D_{cr} – стройность кроны. После проверки на мультиколлинеарность приняты следующие две структуры моделей:

$$\ln Zs_{10} \text{ и } \ln Zs_5 = a_0 + a_1 \ln D_{cr} + a_2 \ln L_{cr} + a_3 B, \quad (26)$$

$$\ln Z_{10} \text{ и } \ln Z_5 = a_0 + a_1 \ln D_{cr} + a_2 \ln (L_{cr}/H) + a_3 B. \quad (27)$$

Характеристика полученных моделей приведена в табл. 13.

Таблица 13

Характеристика моделей (26) и (27) с включенной бинарной переменной (B)

Но- мер мо- дели	Зави- симая пере- менная	Константы модели					$adjR^2$	SE
		a_0	$a_1 \ln D_{cr}$	$a_2 \ln L_{cr}$	$a_3 \ln(L_{cr}/H)$	$a_4 B$		
(26)	$\ln Z_{S10}$	–1,1512	0,7814	1,3609	–	–0,6173	0,728	0,684
	$\ln Z_{S5}$	–1,6413	0,7026	1,4729	–	–0,4796	0,652	0,808
(27)	$\ln Z_{10}$	0,9430	0,4290	–	1,2828	–0,4155	0,578	0,581
	$\ln Z_5$	0,6632	0,4378	–	1,5266	–0,1923	0,450	0,695

Сравнение показателей адекватности моделей (26) и (27), прогнозирующих соответственно прирост площади сечения и годичный радиальный прирост ствола по совокупности морфометрических показателей кроны, показало (табл. 13), что в первом случае морфометрия крон объясняет 65–73 % изменчивости искомого показателя, а во втором меньше, – 45–58 %, поскольку в первом случае объясняется изменчивость комбинированного прироста, учитывающего не только ширину годичного кольца, но и диаметр ствола.

Анализ вкладов независимых переменных моделей, приведенных в табл. 13, показывает (табл. 14), что вклад диаметра кроны довольно стабилен (24–29 %) во всех моделях, но относительно большие значения вкладов принадлежат длине кроны (44–50 %) в моделях для прироста площади сечения ствола и кроновому отношению (51–61 %) в моделях для радиального прироста. Замена кронового отношения длиной кроны в моделях (27) привела к снижению коэффициента детерминации с 0,578–0,450 до 0,373–0,257, по-видимому, вследствие того, что в первом случае модель через кроновое отношение косвенно учитывает размер ствола.

Таблица 14

Вклады независимых переменных моделей (26) и (27) в объяснение изменчивости зависимых переменных

Номер модели	Зависимая переменная	Независимые переменные				Итого
		$\ln D_{cr}$	$\ln L_{cr}$	$\ln(L_{cr}/H)$	X	
(26)	$\ln Z_{S10}$	25	44	–	31	100
	$\ln Z_{S5}$	24	50	–	26	100
(27)	$\ln Z_{10}$	28	–	51	21	100
	$\ln Z_5$	29	–	61	10	100

Влияние происхождения древостоев выразилось в том, что вклад бинарной переменной в объяснение изменчивости прироста площади сечения

составил 26–31 % и существенно ниже (10–21 %) – в объяснение изменчивости радиального прироста. При этом, согласно моделям (26) и (27), при одной и той же морфоструктуре кроны прирост площади сечения в естественных древостоях по отношению к культурам ниже на 38–46 %, а радиальный прирост соответственно на 17–34 %. Геометрическая интерпретация модели (26) для прироста Z_{S10} в 3D-формате показывает соотношение выявленной закономерности у деревьев естественных сосняков и культур (рис. 139).

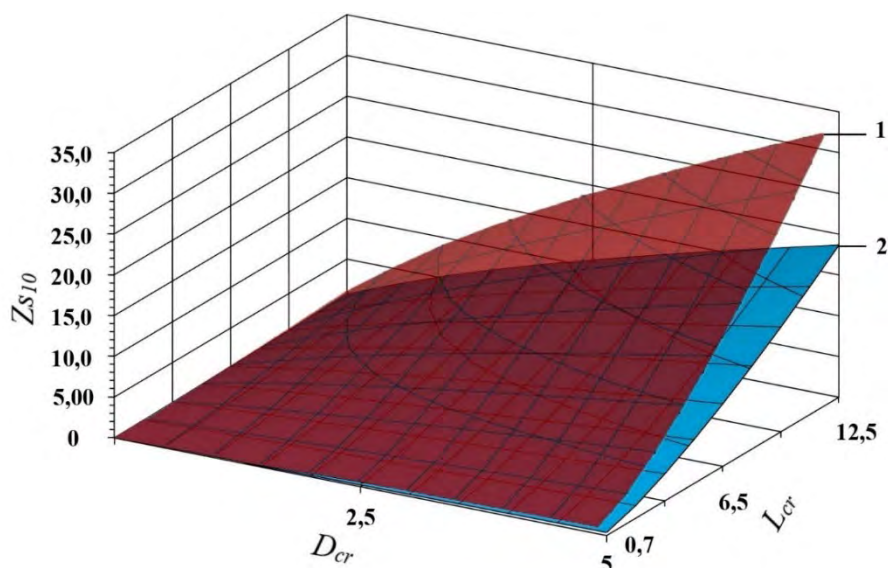


Рис. 139. Геометрическая интерпретация модели (26), описывающей зависимость прироста площади сечения ствола (Z_{S10}) от диаметра (D_{cr}) и длины кроны (L_{cr}) в культурах (1) и естественных сосняках (2)

Наконец, что касается продолжительности периода отложения годовичных колец в связи с современной морфоструктурой крон, то сравнение коэффициентов детерминации в моделях приростов за десять и пять лет убедительно свидетельствует в пользу приростов за десять, но не за пять лет (0,58–0,73 против 0,45–0,65) (табл. 13). Иными словами, онтогенетическое наследие морфоструктуры кроны выражается в наибольшей степени в приростах за десять лет. Это означает, что набор эндо- и экзогенных факторов, под влиянием которых формировалась морфоструктура крон в последние годы, за десятилетний период отражается в структуре годовичных колец в большей степени, нежели за пятилетний.

Выводы по главе 5

Наличие двух авторских баз данных о массообразующих и биопродукционных показателях деревьев и древостоев лесообразующих видов Евразии дало возможность разработки статистически значимых моделей массообразующих и продукционных показателей деревьев и древостоев

по морфометрии крон и полога, доступной для лидарного сканирования, на трансконтинентальном уровне.

Для каждого из 23 родов Евразии установлены всеобщие взаимосвязи диаметров ствола и кроны, характеризуемые коэффициентами детерминации $adjR^2$ от 0,34 до 0,98. Получены двухфакторные всеобщие зависимости диаметра ствола от диаметра кроны и высоты дерева с коэффициентами $adjR^2$ в диапазоне от 0,71 до 0,96 и всеобщие зависимости среднего диаметра древостоя от средней высоты деревьев и их густоты с коэффициентами $adjR^2$ в диапазоне от 0,91 до 0,97.

Анализ зависимости возраста дерева от его высоты и диаметра кроны выявил наличие на трансконтинентальном уровне корреляционной связи, характеризуемой коэффициентами $adjR^2$ в диапазоне от 0,39 до 0,86, и зависимости среднего возраста древостоя от средней высоты и густоты с коэффициентами $adjR^2$ в диапазоне от 0,45 до 0,89. Получены двухфакторные зависимости сбежистости (отношения высоты ствола к его диаметру) стволов деревьев десяти родов Евразии от высоты дерева и диаметра кроны с коэффициентами $adjR^2$ в диапазоне от 0,32 до 0,74.

Для оценки биомассы ствола, ветвей, ассимиляционного аппарата и корней для 11 родов Евразии построены модели ее зависимости от диаметра кроны с коэффициентами $adjR^2$ в диапазоне от 0,37 до 0,99. Аналогичные двухфакторные модели связи с диаметром кроны и высотой дерева показали несколько большие значения $adjR^2$ – в диапазоне от 0,73 до 0,99. На уровне древостоев для 11 родов Евразии разработаны двухфакторные модели связи фракций надземной биомассы и корней с средней высотой деревьев и их густотой, характеризуемые средними коэффициентами $adjR^2$ в диапазоне от 0,42 до 0,86.

Масса отмерших ветвей, сохранившихся на стволах деревьев в нижней части крон, играет важную роль при моделировании лесных пожаров. По авторским данным, 360 модельных деревьев, взятых на 40 пробных площадях в естественных сосняках и культурах степной зоны, построена двухфакторная модель зависимости массы названных отмерших ветвей от диаметра кроны и высоты дерева, объясняющая около 84 % изменчивости ($adjR^2 = 0,837$) массы отмерших ветвей.

На базе тех же 360 модельных деревьев построены зависимости годичного прироста площади сечения ствола на высоте груди – среднего за пять и десять лет – от диаметра и длины кроны с коэффициентами $adjR^2$ в первом случае 0,65 и во втором – 0,73. Зависимости радиального прироста за те же периоды от диаметра кроны и кронового отношения (отношения длины кроны к высоте дерева) показали меньшие значения $adjR^2$ 0,45 и 0,58 – соответственно. Названные соотношения коэффициентов детерминации показывают, что онтогенетическое наследие морфоструктуры кроны выражается в наибольшей степени в приростах за десять лет. Это означает, что набор эндо- и экзогенных факторов, под влиянием которых формировалась морфоструктура крон в последние годы, за десятилетний

период отражается в структуре годовичных колец в большей степени, нежели за пятилетний.

Предложенные модели, все значимые на уровне P_{05} и выше, могут быть использованы при оценке массообразующих (морфоструктурных) и биопродукционных показателей деревьев и древостоев лесообразующих родов Евразии с помощью бортовых лидарных технологий, в том числе с применением дронов.

ГЛАВА 6. ОЦЕНКА МОРФОМЕТРИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КРОНЫ ПО ДАННЫМ ПОЛЕВОЙ ТАКСАЦИИ ДЕРЕВЬЕВ (ПО МАТЕРИАЛАМ АВТОРСКОЙ БАЗЫ ДАННЫХ)

Наличие двух вышеупомянутых авторских баз данных о массообразующих и биопродукционных показателях деревьев и древостоев лесообразующих видов Евразии [Усольцев, 2023а; Усольцев, 2023б] создало предпосылку для построения моделей высоты крепления и формы кроны, построенных по данным полевой таксации и применимых при валидации результатов лидарного сканирования.

6.1. Моделирование высоты крепления кроны по данным полевой таксации

Во всех лесных экосистемах общее количество горючих материалов и их пространственное распределение являются важными факторами, определяющими поведение лесных пожаров. Связь структуры лесного полога с динамикой пожара была сформулирована на теоретической основе, исследована в ходе имитационного моделирования и продемонстрирована эмпирически в наблюдениях за поведением пожаров. Эта совокупность фактических данных формирует основу для прогнозирования возможной динамики верхового пожара с учетом морфоструктуры насаждений [Affleck, Keyes, Goodburn, 2012]. Эффективные лесоводственные стратегии, направленные на увеличение высоты крепления (или высоты основания) кроны (H_{cr}), снижают вероятность возникновения и распространения верхового пожара. Показатель H_{cr} характеризует степень вертикальной близости горючих материалов, содержащихся в пологе и на поверхности земли, и в значительной степени определяет вероятность возникновения верхового пожара [Van Wagner, 1977; Scott, Reinhardt, 2001; Keyser, Smith, 2010]. Высота крепления кроны, наряду с ее объемной плотностью (*crown bulk density*), влажностью компонентов кроны, интенсивностью низового пожара, определяет основные условия возникновения и скорости распространения верхового пожара в хвойных лесах (см. рис. 132 в п. 4.3) [van Wagner, 1977; Ruiz-González, Álvarez-González, 2011; Alexander, Cruz, 2011; Alexander, Cruz, 2012].

Прямое измерение высоты крепления (или высоты основания) кроны H_{cr} у каждого дерева на пробной площади является относительно сложным, трудоемким и дорогостоящим процессом, особенно в густых и многоярусных древостоях [A generalized nonlinear mixed-effects height to crown base model for Mongolian oak in northeast China, 2017]. Поэтому опубликованные результаты измерений относятся в основном к деревьям, но редко – к древостоям [Scott, Reinhardt, 2001; Modelling crown width–diameter

relationship for Scots pine in the central Europe, 2017], и необходимо применение методов косвенной оценки H_{cr} . Были созданы модели H_{cr} для различных древесных видов, и методы их построения варьируют от простых до сложных [Beekhuis, 1965; Valentine, Ludlow, Furnival, 1994; A generalized nonlinear mixed-effects height to crown base model for Mongolian oak in northeast China, 2017; Modelling individual tree height to crown base of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) and European beech (*Fagus sylvatica* L.), 2017; Forest age mapping based on multiple-resource remote sensing data, 2020; Nonlinear mixed-effects height to crown base model for moso bamboo (*Phyllostachys heterocycla* (Carr.) mitford cv. *pubescens*) in Eastern China, 2022]. Прогнозирующие переменные, используемые в этих моделях, включают индивидуальные показатели деревьев (высота дерева, диаметр ствола и индексы конкуренции) и характеристики древостоев (густота, сумма площадей сечений и класс бонитета) [A generalized nonlinear mixed-effects height to crown base model for Mongolian oak in northeast China, 2017; Modelling individual tree height to crown base of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) and European beech (*Fagus sylvatica* L.), 2017; Forest age mapping based on multiple-resource remote sensing data, 2020], а также некоторые климатические и почвенные характеристики [Modeling the influence of competition, climate, soil, and their interaction on height to crown base for Korean pine plantations in Northeast China, 2024]. В последние годы широко применяются модели смешанных эффектов благодаря их высокой эффективности и надежности [A generalized nonlinear mixed-effects height to crown base model for Mongolian oak in northeast China, 2017; Modelling individual tree height to crown base of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) and European beech (*Fagus sylvatica* L.), 2017; Incorporating tree- and stand-level information on crown base height into multivariate forest management inventories based on airborne laser scanning, 2018; Forest age mapping based on multiple-resource remote sensing data, 2020; Imputation to predict height to crown base for trees with predicted heights, 2021; A climate sensitive mixed-effects diameter class mortality model for Prince Rupprecht larch (*Larix gmelinii* var. *principis-rupprechtii*) in northern China, 2021; Generalized or general mixed-effect modelling of tree mortality of *Larix gmelinii* subsp. *principis-rupprechtii* in northern China, 2021b; Predicting and calibrating height to crown base: a case for Dahurian larch (*Larix gmelinii* Rupr.) in Northeastern China, 2022; Two-level mixed-effects height to crown base model for moso bamboo (*Phyllostachys edulis*) in Eastern China, 2023].

Несколько авторов [Cruz, Alexander, Wakimoto, 2003; Ruiz-Gonzalez, Alvarez-Gonzalez, 2011; Modelling canopy fuel dynamics of maritime pine stands in North-West Spain, 2015; Mitsopoulos, Dimitrakopoulos, 2014] разработали уравнения, связывающие H_{cr} с легко измеряемыми таксационными характеристиками древостоев. Для древостоев сосен приморской (*Pinus pinaster* Aiton) и замечательной (*P. radiata* D. Don) в Испании были разрабо-

таны аллометрические модели зависимости среднего значения H_{cr} от средней высоты древостоя с коэффициентами детерминации соответственно 0,83–0,89 и 0,96–0,91 [Modelling canopy fuel variables in *Pinus pinaster* Ait. and *Pinus radiata* D. Don stands in northwestern Spain, 2013]. По данным 301 модельного дерева сосны Массона (*Pinus massoniana* Lamb.), в Китае была получена зависимость H_{cr} от диаметра ствола с коэффициентом детерминации 0,881 [Development of crown ratio and height to crown base models for Masson pine in Southern China, 2020].

Для древостоев сосны алеппской (*Pinus halepensis* Mill.) в Греции была установлена линейная зависимость H_{cr} от суммы площадей сечений, однако довольно слабая – с коэффициентом детерминации 0,29 [Mitsopoulos, Dimitrakopoulos, 2014]. Напротив, для четырех видов хвойных в США – дугласии (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco), сосны желтой (*Pinus ponderosa* Douglas ex C. Lawson), сосны скрученной (*Pinus contorta* Douglas) и смешанного хвойного насаждения – рассчитанные линейные двухфакторные зависимости H_{cr} от высоты древостоя и суммы площадей сечений показали коэффициенты детерминации соответственно 0,82; 0,64; 0,88 и 0,86 [Cruz, Alexander, Wakimoto, 2003].

Для семи древесных видов Хорватии были разработаны модели для H_{cr} деревьев с разными сочетаниями независимых переменных – высоты дерева, его возраста, густоты, суммы площадей сечений, – показавшие наличие коэффициентов детерминации в диапазоне от 0,675 у *Carpinus betulus* L. до 0,924 у *Ulmus laevis* Pall. При этом средние значения H_{cr} существенно различались у разных видов: от 0,3 м у *Alnus glutinosa* (L.) Gaertn. до 32,1 м у *Quercus robur* L. [Height to crown base modelling for the main tree species in even-aged pedunculate oak forest: A case study from Central Croatia, 2021]. Для чистых одновозрастных древостоев сосны замечательной были разработаны зависимости H_{cr} от основных таксационных показателей древостоев. Включение этих зависимостей в существующие модели хода роста древостоев вместе с использованием современных инструментов прогнозирования пожарной опасности обеспечивает систему поддержки принятия решений при оценке потенциала возгорания древесного полога с различными вариантами лесоводственных уходов [Ruiz-González, Álvarez-González, 2011].

На примере лесобразующих родов Евразии было выполнено моделирование высоты крепления крон деревьев по данным полевой таксации на основе авторской базы данных [Усольцев, 2023а]. Окончательная структура принятой к расчету аллометрической регрессионной модели имеет вид:

$$\ln(H_{cr}) = a_0 + a_1(\ln A) + a_2(\ln A)^2 + a_3(\ln D) + a_4(\ln H) + a_5(\ln N) + \sum b_j X_j, \quad (28)$$

где $\sum b_j X_j$ – блок фиктивных переменных в количестве $(j + 1)$ (табл. 15).

Таблица 15

Схема кодирования блоком фиктивных переменных ($\Sigma b_j X_j$) принадлежности исходных данных к разным родам

Род (подрод)	Блок фиктивных переменных											
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}	X_{12}
<i>Pinus L.</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Picea Dietr.</i>	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Abies Mill.</i>	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Larix Mill.</i>	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Haploxydon</i>	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Betula L.</i>	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
<i>Populus L.</i>	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
<i>Alnus Gaertn.</i>	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
<i>Tilia L.</i>	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
<i>Quercus L.</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
<i>Fagus L.</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
<i>Fraxinus L.</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
<i>Carpinus L.</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

В результате расчета установлено, что густота деревьев вносит незначительный вклад в объяснение изменчивости высоты крепления кроны (около 2 %), и она была исключена из дальнейшего анализа. Исключение густоты из структуры модели повлекло небольшое (0,7 %) несущественное снижение объяснительной способности модели, с 83,8 до 83,1 %. Окончательная модель имеет вид:

$$\begin{aligned}
 \ln(H_{cr}) = & -2,8008 + 0,4154(\ln A) - 0,0348(\ln A)^2 - 0,7597(\ln D) + \\
 & + 2,2102(\ln H) - 0,5653X_1 - 0,5386X_2 - 0,2931X_3 - 0,5274X_4 - 0,2069X_5 + \\
 & + 0,0202X_6 - 0,0527X_7 + 0,5463X_8 + 0,0995X_9 - 0,2278X_{10} - 0,1840X_{11} - \\
 & - 0,5069X_{12}; \\
 adjR^2 = & 0,832; \\
 SE = & 0,429.
 \end{aligned} \tag{29}$$

Сравнение адекватности модели (29) с ранее опубликованными результатами других исследований показало наличие коэффициентов детерминации как более низких, так и более высоких, по сравнению с полученным по модели (29). На северо-востоке Китая было взято 2 510 модельных деревьев лиственницы ольгинской (*Larix olgensis* Henry) на 40 пробных площадях разного возраста и густоты [Generalized nonlinear mixed-effect model of individual TREE height to crown base for *Larix olgensis* Henry in northeast China, 2020]. Рассчитанная по этим данным модель для H_{cr} включала в качестве независимых переменных высоту дерева и диаметр на высоте груди, а также сумму площадей сечений и индекс густоты и характеризовалась коэффициентом $adjR^2$, равным 0,764. Аналогичная модель, построенная по данным 3 685 модельных деревьев дуба монгольского (*Quercus mongolica* Fisch. ex

Ledeb.) в Китае, взятых на 118 пробных площадях, имела коэффициент детерминации 0,561 [A generalized nonlinear mixed-effects height to crown base model for Mongolian oak in northeast China, 2017], а модель, построенная по данным 117 деревьев хвойных и лиственных видов в США – 0,800 [Popescu, Zhao, 2008]. Наряду с этим определение H_{cr} по упомянутым выше четырем метрикам, оцениваемым путем лидарного устройства, в древостоях лиственницы ольгинской показало наличие коэффициента детерминации 0,942 [Predicting height to crown base of *Larix olgensis* in Northeast China using UAV-LiDAR data and nonlinear mixed effects models, 2021], что существенно выше соответствующего показателя модели (29). При сравнении результатов моделирования по величине коэффициента детерминации, по-видимому, надо иметь в виду, что ошибки оценок H_{cr} традиционным «ручным», бортовым и наземным лидарным методами могут иметь не только разную величину, но и знаки.

На основе модели (29) выполнено ранжирование 13 древесных родов по величине H_{cr} при средних значениях возраста 45 лет, диаметра ствола 15 см и высоты дерева 14 м (рис. 140). Наиболее выраженное изменение среднего значения H_{cr} имеет место в диапазоне от 8,7 до 4,7 м в ряду: дуб, осина, двухвойные сосны, ольха, ясень, береза, бук лиственница, граб. И далее в ряду – граб, пятихвойные сосны, липа, пихта и ель – остается практически на одном и том же уровне (4,5–4,7 м).

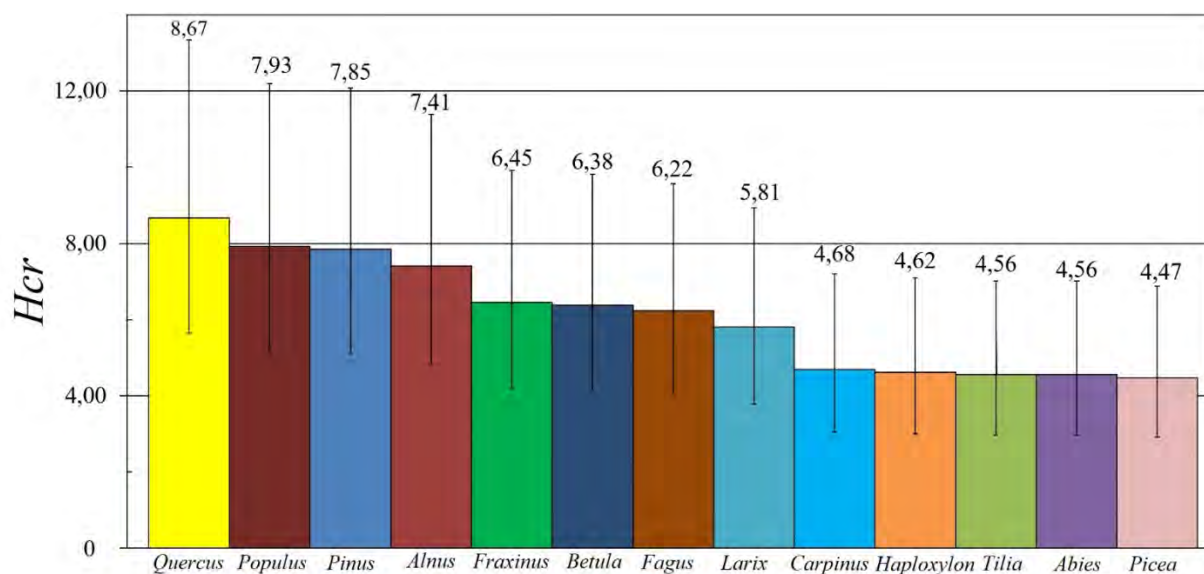


Рис. 140. Ранжирование древесных родов Евразии по показателю H_{cr} , согласно модели (29), при средних значениях возраста 45 лет, диаметра ствола 15 см и высоты дерева 14 м. Вертикальными линиями показано среднее квадратическое отклонение от среднего значения

Полученная модель может быть использована при разработке моделей верховых пожаров, оценке качества сортиментной структуры заготавливаемой древесины, при оценке рисков, связанных с ветровальностью деревьев при ураганных ветрах, а также при разработке моделей биомассы деревьев

по данным как наземной таксации, так и бортового дистанционного зондирования.

6.2. Моделирование показателей формы кроны по данным полевой таксации

Исследование формы ствола деревьев в традиционной лесной таксации имеет давнюю историю [Wright, 1923; Gray, 1956; Усольцев, 1984; Hjelm, 2013; Brooks, Jiang, Ozcelik, 2008]. Это было обусловлено необходимостью точной оценки объема ствола и запаса древостоев – основного целевого показателя ведения лесного хозяйства. Исследование формы кроны не представляло практического интереса, и ей стали уделять внимание лишь в последние годы в связи с развитием методов как воздушного (особенно с применением дронов) лазерного зондирования [Neuville, Bates, Jonard, 2021; Allometry-based estimation of forest aboveground biomass combining LiDAR canopy height attributes and optical spectral indexes, 2022], так и наземного [Long-term terrestrial laser scanning measurement station to continuously monitor structural and phenological dynamics of boreal forest canopy, 2021; Using terrestrial laser scanning to constrain forest ecosystem structure and functions in the Ecosystem Demography model (ED2.2), 2022].

Форма кроны деревьев определяет доступ дерева к свету и другим ресурсам жизнеобеспечения: наличие пространства роста, продуцирование и рассеяние семян [Pretzsch, 2019], а также распределение ассимилятов между стволом и кроной [Усольцев, 1976]. В полностью сомкнутых древостоях увеличение размера кроны вызывает конкуренцию за занимаемое пространство, определяет дифференциацию деревьев, приводит к снижению роста и отпаду угнетенных деревьев, определяет интенсивность естественного изреживания древостоев [Relationships between body size and abundance in ecology, 2007]. Светолюбивые виды формируют стройный ствол и узкую крону, чтобы свести к минимуму влияние затенения от соседних деревьев [Hulshof, Swenson, Weiser. 2015]. Наличие широкой кроны определяет высокую механическую устойчивость дерева вследствие более выраженного сбега ствола [Admixing broadleaved to coniferous tree species: A review on yield, ecological stability and economics, 2008], но низкое качество древесины вследствие повышенной сучковатости ствола [Pretzsch, Rais, 2016; Krajnc, Farrelly, Harte, 2019].

Стратегии роста растений отражаются в аллометрии их органов, которая с помощью параметров масштабирования описывает пропорции между размерами всего растения и его органов или между отдельными органами растения [How does biomass allocation change with size and differ among species? An analysis for 1200 plant species from five continents, 2015; Time for a plant structural economics spectrum, 2019; Tallo: a global tree allometry and crown architecture database, 2022]. В целом, аллометрия кроны отдельного

дерева определяет структуру и динамику всего древостоя [Enquist, Brown, West, 1998; Bartkowicz, Paluch, 2023].

Предложенное исследование построено на концепции всеобщности, а именно – на моделировании показателей морфоструктуры крон на уровне родов как совокупностей викарирующих видов, произрастающих на территории Евразии. Виды в пределах рода представлены исходными данными крайне неравномерно: например, обильно обеспечен такой двухвойный вид, как сосна обыкновенная, но практически отсутствуют данные по сосне черной. Также широко представлена исходными данными липа мелколистная, но недостаточны данные по липе амурской и т. д. Полностью отсутствуют данные о кедре европейском (*Pinus cembra* L.), тополе белом (*Populus alba* L.), липе сибирской (*Tilia sibirica* Bayer) и многих других видах. Построение моделей на уровне родов позволяет применить их в локальных условиях и заполнить имеющиеся «белые пятна» по отдельным видам.

В данном исследовании поставлена задача на основе авторской базы данных [Усольцев, 2023а] разработать всеобщие аллометрические модели различных показателей морфологии крон для лесообразующих родов Евразии. Исходные данные о морфологии крон деревьев представлены 13 древесными родами в количестве 7 938 деревьев. В анализ включены относительные показатели морфологии кроны, представляющие четыре комбинации исходных дендрометрических показателей:

- отношение длины кроны к высоте дерева, или кроновый коэффициент (L_{cr}/H);
- отношение диаметра кроны к высоте дерева, или относительный диаметр кроны (D_{cr}/H);
- отношение диаметра кроны к диаметру ствола, или относительный диаметр кроны (D_{cr}/D);
- отношение длины кроны к диаметру кроны, или стройность (вытянутость) кроны (L_{cr}/D_{cr}).

Основными таксационными показателями, определяющими морфоструктуру и фитомассу деревьев, являются возраст, диаметр ствола, высота дерева, а также густота древостоя, характеризующая интенсивность конкурентных отношений деревьев в древостое в целом [Усольцев, 2016]. После проверки названных независимых переменных на мультиколлинеарность был установлен единообразный для всех родов характер связи каждого морфометрического показателя с диаметром ствола и высотой дерева. Это дало возможность рассчитать аллометрическую модель, общую для всех родов, или так называемую модель смешанного типа [Using linear mixed model and dummy variable model approaches to construct compatible single-tree biomass equations at different scales – A case study for Masson pine in Southern China, 2012], в которую включены численные ($\ln D$ и $\ln H$) и фиктивные (качественные) независимые переменные, кодирующие принадлежность данных к тому или иному роду. Эта модель имеет общий вид:

$$\ln(Y) = a_0 + a_1(\ln D) + a_2(\ln H) + a_3(\ln H)(\ln D) + \sum b_j X_j, \quad (30)$$

где Y – один из четырех показателей формы кроны; $\sum b_j X_j$ – блок фиктивных переменных в количестве $(j + 1)$ (табл. 16). Комбинированная переменная $(\ln H)(\ln D)$ введена в модель для коррекции нарушения аллометрии вследствие сдвига диаметра на высоте груди к апексу по мере уменьшения высоты дерева и, соответственно, для повышения однородности остаточной дисперсии [Additive biomass models for *Larix* spp. single-trees sensitive to temperature and precipitation in Eurasia, 2019].

Таблица 16

Схема кодирования блоком фиктивных переменных $\sum b_j X_j$ принадлежности исходных данных к разным родам

<i>Род</i> (<i>подрод</i>)	Блок фиктивных переменных											
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}	X_{12}
<i>Pinus</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Picea</i>	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Abies</i>	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Larix</i>	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Haploxydon</i>	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Betula</i>	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
<i>Populus</i>	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
<i>Alnus</i>	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
<i>Tilia</i>	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
<i>Quercus</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
<i>Fagus</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
<i>Fraxinus</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
<i>Carpinus</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

В результате проведенных расчетов для четырех морфометрических показателей деревьев получены модели (табл. 17)

Таблица 17

Характеристика моделей (30)

ln(Y)	Коэффициенты моделей (30)								
	a_0	a_1 (lnD)	a_2 (lnH)	a_3 (lnH)(lnD)	a_4 X_1	a_5 X_2	a_6 X_3	a_7 X_4	a_8 X_5
ln(L_{cr}/H)	0,082	0,510	−0,848	–	0,258	0,314	0,193	0,214	0,226
ln(D_{cr}/H)	0,078	0,754	−1,686	0,084	0,176	0,016	0,249	0,097	0,350
ln(D_{cr}/D)	0,078	−0,246	−0,686	0,084	0,176	0,016	0,249	0,097	0,350
ln(L_{cr}/D_{cr})	0,098	−0,225	0,832	−0,090	0,103	0,325	−0,101	0,103	−0,122
ln(Y)	Коэффициенты моделей (30)							$adjR^2$	SE
	a_9 X_6	a_{10} X_7	a_{11} X_8	a_{12} X_9	a_{13} X_{10}	a_{14} X_{11}	a_{15} X_{12}		
ln(L_{cr}/H)	0,096	0,079	0,389	−0,07	0,245	0,245	0,526	0,454	0,27
ln(D_{cr}/H)	0,440	0,165	0,361	0,413	0,426	0,470	0,565	0,599	0,32
ln(D_{cr}/D)	0,440	0,165	0,361	0,413	0,426	0,470	0,565	0,588	0,32
ln(L_{cr}/D_{cr})	−0,318	−0,083	0,122	−0,496	−0,162	−0,208	−0,038	0,232	0,39

Несмотря на относительно невысокую объяснительную способность моделей (30), регрессионные коэффициенты при их численных переменных в высшей степени значимы. Коэффициенты при $(\ln D)$ и $(\ln H)$ значимы на уровне вероятности $p < 0,0001$ ($t_{\text{факт}} = 8,7-71,0 > t_{\text{табл}} = 3,29$). Коэффициент при $(\ln D)(\ln H)$ в модели для L_{cr}/H оказался статистически незначимым ($t_{\text{факт}} = 0,86 < t_{\text{табл}} = 1,96$), и комбинированная переменная была исключена из структуры модели (30). Напротив, для остальных морфологических показателей коэффициенты при комбинированной переменной $(\ln D)(\ln H)$ в высшей степени значимы ($t_{\text{факт}} = 11,3-12,9 > t_{\text{табл}} = 3,29$), что означает, что введение ее в модели (30) для D_{cr}/H , D_{cr}/D и L_{cr}/D_{cr} на статистически значимом уровне повышает однородность дисперсии остатков.

Путем табулирования моделей (30) по средним значениям диаметра ствола (14,6 см) и высоты дерева (13,9 м) получены для каждого рода значения морфологических показателей равновеликих деревьев. Диаграммы их распределения по величине каждого морфометрического показателя даны на рис. 141.

Таким образом, по данным дендрометрических показателей ствола и кроны 13 лесообразующих родов Евразии в количестве около 8 тыс. определений разработаны всеобщие аллометрические модели смешанного типа для различных показателей морфологии крон. Независимые переменные моделей включают как численные (диаметр ствола и высота дерева), так и качественные (фиктивные) переменные, кодирующие принадлежность данных к тому или иному роду. Регрессионные коэффициенты при численных переменных значимы на уровне вероятности $p < 0,0001$. Выполнено ранжирование родов по каждому из четырех морфометрических показателей кроны.

Выводы по главе 6

Высота крепления кроны определяет основные условия возникновения и скорости распространения верхового пожара в хвойных лесах. Ее прямое измерение у каждого дерева на пробной площади является относительно сложным, трудоемким и дорогостоящим процессом, особенно в густых и многоярусных древостоях. На основе авторской базы данных в количестве около 8 тыс. определений на примере 13 лесообразующих родов Евразии выполнено моделирование высоты крепления крон деревьев в зависимости от возраста дерева, его высоты и диаметра ствола на высоте груди, полученных по данным полевой таксации. Названные три независимые переменные, а также принадлежность данных к тому или иному роду, опосредованная блоком фиктивных переменных, в совокупности объяснили 83 % изменчивости искомого показателя.

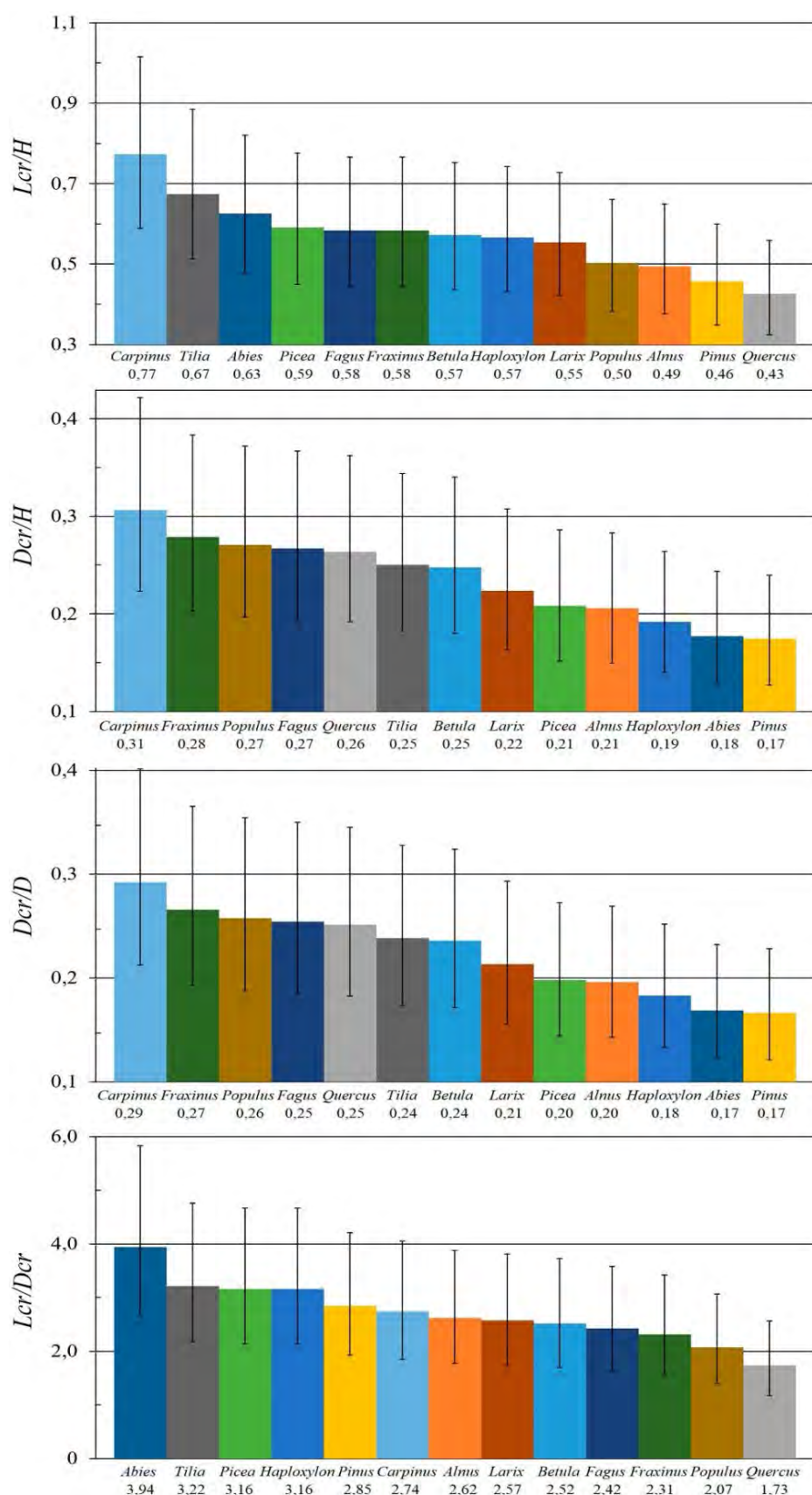


Рис. 141. Ранжирование древесных родов Евразии по четырем морфометрическим показателям, согласно моделям (4), при средних значениях диаметра ствола 14,6 см и высоты дерева 13,9 м. Вертикальными линиями показано среднее квадратическое отклонение от среднего значения

По данным дендрометрических показателей ствола и кроны тех же лесобразующих родов Евразии, разработаны всеобщие аллометрические модели смешанного типа для четырех относительных показателей формы крон. Независимые переменные моделей включили как численные (диаметр ствола и высота дерева), так и качественные (фиктивные) переменные, кодирующие принадлежность данных к тому или иному роду, и объяснили от 23 до 60 % изменчивости искомых показателей формы крон.

Предложенные модели могут быть использованы для валидации результатов лидарного сканирования деревьев лесобразующих видов Евразии, а также при моделировании морфологии их крон и полога в целом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В течение последних 30 лет применение лидаров в лесном деле непрерывно увеличивается, а последние десять лет количество публикаций, посвященных использованию беспилотных лидаров в лесной проблематике, нарастает по экспоненте. В предложенном обзорном анализе показаны достижения ученых в применении лидаров воздушного и наземного базирования в исследовании лесного полога. Отмечены достоинства и недостатки бортовых, беспилотных и наземных лидаров при их применении к дистанционному зондированию морфоструктуры и биомассы деревьев и древостоев, а также перспективы их совместного действия. По материалам двух авторских баз данных о морфоструктуре и биомассе лесообразующих видов Евразии построены регрессионные модели зависимости массообразующих и продукционных показателей деревьев и древостоев от морфометрии крон и полога, замеренной в полевых условиях, но также доступной для лидарного сканирования. Предложенные модели могут быть использованы для валидации результатов лидарного сканирования деревьев лесообразующих видов Евразии, а также при моделировании морфологии их крон и полога в целом.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

Бабич Н. А., Мерзленко М. Д., Евдокимов И. В. Фитомасса культур сосны и ели в европейской части России. Архангельск : АГТУ, 2004. 112 с.

Воздушное лазерное сканирование для уточнения таксационных характеристик древостоев / В. Ф. Ковязин, К. П. Виноградов, А. А. Киценко, Е. А. Васильева // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2020. № 6. С. 42–54.

Высокие технологии XXI века для аэрокосмического мониторинга и таксации лесов. Задачи исследований и перспективы использования / И. М. Данилин, Е. М. Медведев, Н. И. Абэ [и др.] // Лесная таксация и лесоустройство. 2005. № 1. С. 28–38.

Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. М. : Техносфера, 2005. 1072 с.

Данилин И. М. Морфологическая структура, продуктивность и дистанционные методы таксации древостоев Сибири : автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук / Данилин Игорь Михайлович. Красноярск : Ин-т леса им. В. Н. Сукачева СО РАН, 2003. 35 с.

Данилин И. М., Красилов И. И. Определение фитомассы древостоев лазерно-локационным методом // Лесная таксация и лесоустройство. Международный научно-практический журнал. 2001. № 1. С. 138–140.

Данилин И. М., Медведев Е. М. Некоторые результаты международного проекта по исследованию возможностей лазерной, радарной и цифровой аэросъемки лесов // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2008. № 1. С. 15–23.

Данилин И. М., Медведев Е. М., Мельников С. Р. Лазерная локация Земли и леса. Красноярск : Ин-т леса СО РАН, 2005. 182 с.

Данилин И. М., Сведя Т. Лазерное профилирование лесного полога // Лесоведение. 2001. № 6. С. 64–69.

Данилин И. М., Фаворская М. Н. Моделирование структуры лесного покрова и рельефа местности по данным лазерной локации // Лесная таксация и лесоустройство. 2011. № 1–2. С. 40–47.

Данилин И. М., Целитан И. А. Инновационные методы таксации и мониторинга лесов с использованием лазерного сканирования, аэрокосмической съемки и спутникового геопозиционирования // Наука и технологии Сибири. 2024. № 13. С. 106–108.

Залесов С. В., Лобанов А. Н., Луганский Н. А. Рост и производительность сосняков искусственного и естественного происхождения. Екатеринбург : УГЛТУ, 2002. 112 с.

Иванов В. В., Борисов А. Н., Петренко А. Е. Влияние густоты древостоя на формирование кроны и рост по диаметру сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2019. № 3. С. 9–16.

Лазерное сканирование и цифровая аэросъемка – новая перспектива лесоэкологического мониторинга и таксации леса / И. М. Данилин, Е. М. Медведев, К. С. Коневина, А. И. Данилин // Гео-Сибирь. 2005. Т. 5. С. 91–96.

Медведев Е. М., Данилин И. М., Мельников С. Р. Лазерная локация земли и леса : учебное пособие. 2-е изд., перераб. и доп. М. : Геолидар, Геокосмос ; Красноярск : Ин-т леса им. В. Н. Сукачева СО РАН, 2007. 229 с.

Метод ландшафтно-статистической лесоинвентаризации на основе лазерного зондирования и космической съемки лесного покрова / С. К. Фарбер, В. А. Соколов, И. М. Данилин [и др.] // Лесоведение. 2003. № 5. С. 3–9.

Семечкина М. Г. Структура фитомассы сосняков. Новосибирск : Наука, 1978. 165 с.

Синицын С. Г., Сухих В. И. Использование материалов многозональных и космических съемок в интересах лесного хозяйства // Аэрокосмические исследования Земли. М. : Наука, 1979. С. 86–101.

Усольцев В. А. Биологическая продуктивность лесообразующих пород в климатических градиентах Евразии (к менеджменту биосферных функций лесов). Екатеринбург : Уральский государственный лесотехнический университет, 2016. 384 с.

Усольцев В. А. Биомасса и первичная продукция лесов Евразии : монография. 4-е изд. доп. Екатеринбург : Ботанический сад УрО РАН, Уральский государственный лесотехнический университет, 2023б.

Усольцев В. А. Модели для оценки возраста деревьев и древостоев лесообразующих видов Евразии по морфометрии крон и полога, доступной для воздушного лазерного сканирования // Биосфера. 2024. №. 4. С. 399–406.

Усольцев В. А. Модели для оценки диаметра стволов деревьев и древостоев лесообразующих видов Северной Евразии по морфометрии крон и полога // Лесоведение. 2025. № 3. С. 304–320.

Усольцев В. А. Оценка формы и полнодревесности стволов с использованием множественных связей // Вестник сельскохозяйственной науки Казахстана. 1984. №. 7. С. 75–79.

Усольцев В. А. Перспективы 3D-моделирования пространственной структуры фитомассы лесов // Эко-потенциал. 2014. № 2. С. 55–71.

Усольцев В. А. Фитомасса модельных деревьев для дистанционной и наземной таксации лесов Евразии. 3-е изд. доп. Екатеринбург : Ботанический сад УрО РАН, Уральский государственный лесотехнический университет, 2023а.

Усольцев В. А. Формирование банков данных о фитомассе лесов. Екатеринбург : УрО РАН, 1998. 541 с.

Усольцев В. А. Формирование ствола у березы семенного и порослевого происхождения в аспекте аллометрического роста // Вестник сельскохозяйственной науки Казахстана. 1976. № 7. С. 83–88.

Усольцев В. А., Цепордей И. С. Аллометрические модели и таблицы для оценки биомассы отмерших ветвей растущих деревьев дистанционными методами // Хвойные бореальной зоны. 2023. Т. 41, № 1. С. 56–64.

Уткин А. И., Ермолова Л. С. Первичная продуктивность культур сосны обыкновенной Ульяновского Поволжья // Биологическая продуктивность лесов Поволжья. М. : Наука, 1982. С. 186–195.

3D Forest structure analysis from optical and LIDAR data / S. Lang, D. Tiede, B. Maier [et al.] // Revista Ambiente, Guarapuava, Edição Especial. 2006. Vol. 1. P. 95–110.

3D Forest: An application for descriptions of three-dimensional forest structures using terrestrial LiDAR / J. Trochta, M. Krůček, T. Vrsíka [et al.] // PLoS ONE. 2017. Vol. 12. Article e0176871.

3-D mapping of a multi-layered Mediterranean forest using ALS data / A. Ferraz, F. Bretar, S. Jacquemoud [et al.] // Remote Sensing of Environment. 2012. Vol. 121. P. 210–223.

3D segmentation of full waveform LIDAR data for single tree detection using normalized cut / J. Reitberger, C. Schnörr, P. Krzystek [et al.] // International Archives for Photogrammetry and Remote Sensing. 2008b. Vol. 37. P. 77–83.

3D segmentation of single trees exploiting full waveform LIDAR data / J. Reitberger, C. Schnörr, P. Krzystek [et al.] // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2009. Vol. 64. P. 561–574.

3D-laser scanning: A non-destructive method for studying aboveground biomass and growth of juvenile trees / D. Seidel, F. Beyer, D. Hertel [et al.] // Agricultural and Forest Meteorology. 2011. Vol. 151. P. 1305–1311.

3D-segmentation of trees through a flexible multiclass graph cut algorithm / J. Williams, C.-B. Schonlieb, T. Swinfield [et al.] // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2019. Vol. 58. P. 754–776.

A benchmark of lidar-based single tree detection methods using heterogeneous forest data from the Alpine space / L. Eysn, M. Hollaus, E. Lindberg [et al.] // Forests. 2015. Vol. 6. P. 1721–1747.

A bottom-up approach to segment individual deciduous trees using leaf-off lidar point cloud data / X. Lu, Q. Guo, W. Li [et al.] // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2014. Vol. 94. P. 1–12.

A climate sensitive mixed-effects diameter class mortality model for Prince Rupprecht larch (*Larix gmelinii* var. *principis-rupprechtii*) in northern China / X. Zhou, Q. Chen, R. P. Sharma [et al.] // Forest Ecology and Management. 2021. Vol. 491. Article 119091.

A comparative assessment of the performance of individual tree crowns delineation algorithms from ALS data in tropical forests / M. Aubry-Kientz, R. Dutrieux, A. Ferraz [et al.] // Remote Sensing. 2019. Vol. 11. Article 1086.

A comparison of individual tree and forest plot height derived from lidar and InSAR / S. Huang, S. A. Hager, K. Q. Halligan [et al.] // *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. 2009. Vol. 75, Iss. 2. P. 159–167.

A comparison of probable limit in error values calculated from LiDAR-based models and traditional inventory methods in a native sclerophyll forest in south-easter Australia / G. Caccamo, A. Kathuria, G. Melville [et al.] // *Deployment and integration of cost-effective high resolution remotely sensed data for the Australian forest industry*, Forest & Wood Products Australia. 2017. P. 97–108.

A cross-comparison of field, spectral, and lidar estimates of forest canopy cover / A. M. S. Smith, M. J. Falkowski, A. T. Hudak [et al.] // *Canadian Journal of Remote Sensing*. 2009. Vol. 35. P. 447–459.

A dataset of forest biomass structure for Eurasia / D. Schepaschenko, A. Shvidenko, V. A. Usoltsev [et al.] // *Scientific Data*. 2017. Vol. 4. Article 170070.

A fine-scale architectural model of trees to enhance LiDAR-derived measurements of forest canopy structure / J. F. Cote, R. A. Fournier, G. W. Frazer [et al.] // *Agricultural and Forest Meteorology*. 2012. Vol. 166. P. 72–85.

A general integrative framework for modelling woody biomass production and carbon sequestration rates in forests / D. A. Coomes, R. J. Holdaway, R. K. Kobe [et al.] // *Journal of Ecology*. 2012. Vol. 100, Iss. 1. P. 42–64.

A generalized nonlinear mixed-effects height to crown base model for Mongolian oak in northeast China / L. Fu, H. Zhang, R. P. Sharma [et al.] // *Forest Ecology and Management*. 2017. Vol. 384. P. 34–43.

A lidar-based hierarchical approach for assessing MODIS fPAR / L. Chasmer, C. Hopkinson, P. Treitz [et al.] // *Remote Sensing of Environment*. 2008. Vol. 112, Iss. 12. P. 4344–4357.

A new method for 3D individual tree extraction using multispectral airborne LiDAR point clouds / W. Dai, B. Yang, Z. Dong [et al.] // *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2018. Vol. 144. P. 400–411.

A new method for segmenting individual trees from the lidar point cloud / W. Li, Q. Guo, M. K. Jakubowski [et al.] // *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. 2012. Vol. 78. P. 75–84.

A novel automatic method for the fusion of ALS and TLS LiDAR data for robust assessment of tree crown structure / C. Paris, D. Kelbe, J. van Aardt [et al.] // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2017. Vol. 55. P. 3679–3693.

A novel vegetation point cloud density tree-segmentation model for overlapping crowns using UAV LiDAR / K. Ma, Y. Xiong, F. Jiang [et al.] // *Remote Sensing*. 2021. Vol. 13. Article 1442.

A physics-based approach to modelling grassland fires / W. Mell, M. A. Jenkins, J. Gould [et al.] // *International Journal of Wildland Fire*. 2007. Vol. 16. P. 1–22.

A quantitative analysis of plant form- the pipe model theory: II. Further evidence of the theory and its application in forest ecology / K. Shinozaki, K. Yoda, K. Hozumi [et al.] // Japanese Journal of Ecology. 1964. Vol. 14. P. 133–139.

A segmentation based method to retrieve stem volume estimates from 3-D tree height models produced by laser scanners / J. Hyypä, O. Kelle, Lehtikoinen M. [et al.] // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2001. Vol. 39, Iss. 5. P. 969–975.

A simple technique for co-registration of terrestrial LiDAR observations for forestry applications / T. Hilker, N. Coops, D. S. Culvenor [et al.] // Remote Sensing Letters. 2012. Vol. 3, Iss. 3. P. 239–247.

A survey of remote sensing-based aboveground biomass estimation methods in forest ecosystems / D. Lu, Q. Chen, G. Wang [et al.] // International Journal of Digital Earth. 2014. Vol. 9. P. 63–105.

A voxel-based method for automated identification and morphological parameters estimation of individual street trees from mobile laser scanning data / B. Wu, B. Yu, W. Yue [et al.] // Remote Sensing. 2013. Vol. 5. P. 584–611.

Above-ground biomass estimation in closed canopy neotropical forests using lidar remote sensing: factors affecting the generality of relationships / J. B. Drake, R. G. Knox, R. O. Dubayah [et al.] // Global Ecology and Biogeography. 2003. Vol. 12, Iss. 2. P. 147–159.

Aboveground total and green biomass of dryland shrub derived from terrestrial laser scanning / P. J. Olsoy, N. F. Glenn, P. E. Clark [et al.] // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2014. Vol. 88. P. 166–173.

Accuracy of large-scale canopy heights derived from LiDAR data under operational constraints in a complex alpine environment / M. Hollaus, W. Wagner, C. Eberhöfer [et al.] // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2006. Vol. 60. P. 323–338.

Ackermann F. Airborne laser scanning – present status and future expectations // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 1999. Vol. 54, Iss. 2–3. P. 64–67.

Adaptive clustering of airborne LiDAR data to segment individual tree crowns in managed pine forests / H. Lee, K. C. Slatton, B. E. Roth [et al.] // International Journal of Remote Sensing. 2010. Vol. 31. P. 117–139.

Adaptive methods for individual tree detection on airborne laser based canopy height model / J. Pitkänen, M. Maltamo, J. Hyypä [et al.] // Proceedings of ISPRS Working Group VIII/2: Laser-Scanners for Forest and Landscape Assessment, 03–06 October 2004, Freiburg, Germany, 2004. P. 187–191.

Additive biomass models for *Larix* spp. single-trees sensitive to temperature and precipitation in Eurasia // V. A. Usoltsev, W. Zukow, A. A. Osmirko [et al.] // Ecological Questions. 2019. Vol. 30. P. 57–67.

Admixing broadleaved to coniferous tree species: A review on yield, ecological stability and economics / T. Knoke, C. Ammer, B. Stimm [et al.] // European Journal of Forest Research. 2008. Vol. 127. P. 89–101.

Affleck D. L. R., Keyes C. R., Goodburn J. M. Conifer crown fuel modeling: Current limits and potential for improvement // *Western Journal of Applied Forestry*. 2012. Vol. 27, Iss. 4. P. 165–169.

Age structure and disturbance legacy of North American forests / Y. D. Pan, J. M. Chen, R. Birdsey [et al.] // *Biogeosciences*. 2011. Vol. 8. P. 715–732.

Agent-based region growing for individual tree crown delineation from airborne laser scanning (ALS) data / Z. Zhen, L. J. Quackenbush, S. V. Stehman [et al.] // *International Journal of Remote Sensing*. 2015. Vol. 36. P. 1965–1993.

Airborne laser topographic mapping results / W. B. Krabill, J. G. Collins, L. E. Link [et al.] // *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 1984. Vol. 50. P. 685–694.

Airborne lidar for profiling of surface topography / J. L. Bufton, J. B. Garvin, J. F. Cavanaugh [et al.] // *Optical Engineering*. 1991. Vol. 30, Iss. 1. P. 72–78.

Akaike H. A new look at statistical model identification // *IEEE Transactions on Automatic Control*. 1974. AU-19. P. 716–722.

Aldred A. H., Bonnor G. M. Application of airborne laser to forest surveys. Chalk River : Petawawa Natl. For. Inst, 1985. 62 p.

Alexander C. Delineating tree crowns from airborne laser scanning point cloud data using Delaunay triangulation // *International Journal of Remote Sensing*. 2009. Vol. 30, Iss. 14. P. 3843–3848.

Alexander M. E., Cruz M. G. Crown fire dynamics in conifer forests // *Synthesis of Knowledge of Extreme Fire Behavior: Vol. I for Fire Managers*. 2011. P. 107–144.

Alexander M. E., Cruz M. G. Modelling the effects of surface and crown fire behaviour on serotinous cone opening in jack pine and lodgepole pine forests // *International Journal of Wildland Fire*. 2012. Vol. 21. P. 709–721.

Algorithms and methods of airborne laser scanning for forest measurements / J. Hyypä, H. Hyypä, P. Litkey [et al.] // *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2004. Vol. 36. P. 82–89.

Allometry-based estimation of forest aboveground biomass combining LiDAR canopy height attributes and optical spectral indexes / Q. Yang, Y. Su, T. Hu [et al.] // *Forest Ecosystems*. 2022. Vol. 9. Article 100059.

Amenta N., Choi S., Kolluri R. K. The power crust // *Sixth ACM Symposium on Solid Modeling and Applications*. 2001. P. 249–260.

Amiro B. D., Chen J. M. Forest-fire-scars aging using SPOT-VEGETATION for Canadian ecoregions // *Canadian Journal of Forest Research*. 2003. Vol. 33. P. 1116–1125.

An algorithm of forest age estimation based on the forest disturbance and recovery detection / Z. Huang, X. Li, H. Du [et al.] // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2023. Vol. 61. Article 4409018.

An efficient, multi-layered crown delineation algorithm for mapping individual tree structure across multiple ecosystems / L. I. Duncanson,

B. D. Cook, G. C. Hurtt [et al.] // Remote Sensing of Environment. 2014. Vol. 154. P. 378–386.

An individual tree crown delineation method based on multi-scale segmentation of imagery / L. Jing, B. Hu, T. Noland [et al.] // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2012. Vol. 70. P. 88–98.

An international comparison of individual tree detection and extraction using airborne laser scanning / H. Kaartinen, J. Hyypä, X. Yu [et al.] // Remote Sensing. 2012. Vol. 4. P. 950–974.

An object-based classification approach in mapping tree mortality using high spatial resolution imagery / Q. Guo, M. Kelly, P. Gong [et al.] // GIScience & Remote Sensing. 2007. Vol. 44, Iss.1. P. 24–47.

Analysis of laser altimeter waveforms for forested ecosystems of central Florida / J. F. Weishampel, D. J. Harding, Jr. J. C. Boutet [et al.] // Proceedings of SPIE: Advances in Laser Remote Sensing for Terrestrial and Oceanographic Applications. 1997. Vol. 3059. P. 184–189.

Analysis of LiDAR-derived topographic information for characterizing and differentiating landslide morphology and activity / N. F. Glenn, D. R. Streutker, D. J. Chadwick [et al.] // Geomorphology. 2006. Vol. 73, Iss. 1–2. P. 131–148.

Andersen H. E., McGaughey R. J., Reutebuch S. E. Estimating forest canopy fuel parameters using LiDAR data // Remote Sensing of Environment. 2005. Vol. 94. P. 441–449.

Andersen H. E., Reutebuch S. E., Schreuder G. F. Automated individual tree measurement through morphological analysis of a LIDAR-based canopy surface model // Proceedings of the first International Precision Forestry Cooperative Symposium, Seattle, Washington, 2001. P. 11–22.

Andrews P., Bevins C., Seli R. BehavePlus fire modeling system, version 3.0: User's guide revised // USDA, forest service – rocky mountain research station, 2005. 132 p.

Antonarakis A. S., Richards K. S., Brasington J. Object-based land cover classification using airborne LiDAR // Remote Sensing of Environment. 2008. Vol. 112. P. 2988–2998.

Application of terrestrial laser scanners for the determination of forest inventory parameters / A. Bienert, S. Scheller, E. Keane [et al.] // International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2006. Vol. 36, Iss. 5. P. 1–5.

Ares A., Neill A. R., Puettmann K. J. Understory abundance, species diversity and functional attribute response to thinning in coniferous stands // Forest Ecology and Management. 2010. Vol. 260. P. 1104–1113.

Aschoff T., Thies M., Spiecker H. Describing forest stands using terrestrial laser-scanning. Structuring laser-scanned trees using 3D mathematical morphology // International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. 2004. Vol. 35. P. 1–5.

Assessing forest metrics with a ground-based scanning lidar / C. Hopkinson, L. Chasmer, C. Young-Pow, P. Treitz // *Canadian Journal of Forest Research*. 2004. Vol. 34, Iss. 3. P. 573–583.

Assessing the 3D structure of the single crowns in mixed alpine forests / A. Barilotti, F. Sepic, E. Abramo [et al.] // *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2007. Vol. 36. P. 129–134.

Assessing the possibility of land-cover classification using lidar intensity data / J. H. Song, S. H. Han, K. Yu [et al.] // *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2002. Vol. 34. P. 259–262.

Assessment of individual tree detection and canopy cover estimation using unmanned aerial vehicle based light detection and ranging (UAV-LiDAR) data in planted forests / X. Wu, X. Shen, L. Cao [et al.] // *Remote Sensing*. 2019. Vol. 11. Article 908.

Assessment of standing wood and fiber quality using ground and airborne laser scanning: a review / M. van Leeuwen, T. Hilker, N. C. Coops [et al.] // *Forest Ecology and Management*. 2011. Vol. 261. P. 1467–1478.

Automated delineation of individual tree crowns from lidar data by multi-scale analysis and segmentation / L. Jing, B. Hu, J. Li [et al.] // *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 2012a. Vol. 78. P. 1275–1284.

Automated estimation of individual conifer tree height and crown diameter via two-dimensional spatial wavelet analysis of lidar data / M. J. Falkowski, A. M. S. Smith, A. T. Hudak [et al.] // *Canadian Journal of Remote Sensing*. 2006. Vol. 32, Iss. 2. P. 153–161.

Automated measurements of terrain reflection and height variations using and airborne infrared laser system / H. Schreier, J. Loughheed, C. Tucker [et al.] // *International Journal of Remote Sensing*. 1985. Vol. 6. P. 101–113.

Automatic detection of individual trees in forests based on airborne LiDAR data with a tree region-based convolutional neural network (RCNN) / Z. Wang, P. Li, Y. Cui [et al.] // *Remote Sensing*. 2023. Vol. 15. Article 1024.

Automatic determination of forest inventory parameters using terrestrial laser scanning / M. Simonse, T. Aschoff, H. Spiecker [et al.] // *Proceedings of the ScandLaser Scientific Workshop on Airborne Laser Scanning of Forests, Umeå, Sweden, 2003*. P. 251–257.

Automatic forest inventory parameter determination from terrestrial laser scanner data / H. G. Maas, A. Bienert, S. Scheller [et al.] // *International Journal of Remote Sensing*. 2008. Vol. 29. P. 1579–1593.

Automatic stem mapping using single-scan terrestrial laser scanning / X. Liang, P. Litkey, J. Hyypä [et al.] // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2012. Vol. 50. P. 661–670.

AutoStem Forest // *TreeMetrics* : [website]. 2015. URL: <http://www.tree-metrics.com/2015> (date of accessed: 10.01.2025).

Axelsson P. Processing of laser scanner data – algorithms and applications // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 1999. Vol. 54, Iss. 2–3. P. 138–147.

BAAD: a Biomass And Allometry Database for woody plants / D. S. Falster, R. A. Duursma, M. I. Ishihara [et al.] // Ecology. 2015. Vol. 96. P. 1445–1445.

Bai Y., Pang Y., Kong D. Integrating remote sensing and 3-PG model to simulate the biomass and carbon stock of *Larix olgensis* plantation // Forest Ecosystems. 2024. Vol. 11. Article 100213.

Barthélémy D., Caraglio Y. Plant architecture: a dynamic, multilevel and comprehensive approach to plant form, structure and ontogeny // Annals of Botany. 2007. Vol. 99. P. 375–407.

Bartkowicz L., Paluch J. Morphological plasticity of six tree species with different light demands growing in multi-layered deciduous forests in Central Europe // European Journal of Forest Research. 2023. Vol. 142, Iss. 5. P. 1177–1195.

Bayesian approach to tree detection based on airborne laser scanning data / T. Lähivaara, A. Seppänen, J. P. Kaipio [et al.] // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2014. Vol. 52. P. 2690–2699.

Beekhuis J. Crown depth of radiata pine in relation to stand density and height // New Zealand Journal of Forestry. 1965. Vol. 10. P. 43–61.

Benchmark map of forest carbon stocks in tropical regions across three continents / S. S. Saatchi, N. L. Harris, S. Brown [et al.] // Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. 2011. Vol. 108. P. 9899–9904.

Beucher S., Lantuejoul C. Use of watersheds in contour detection // International Workshop on Image Processing, Realtime Edge and Motion Detection/Estimation, 17–21 September, Rennes, France, 1979. P. 12–21.

Bi H., Turner J., Lambert M. J. Additive biomass equations for native eucalypt forest trees of temperate Australia // Trees – Structure and Function. 2004. Vol. 18. P. 467–479.

Biomass estimation of individual trees using stem and crown diameter TLS measurements / M. Holopainen, M. Vastaranta, V. Kankare [et al.] // International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2011. Vol. 38. Article 5/W12. P. 91–95.

Biomass resilience of neotropical secondary forests / L. Poorter, F. Bongers, T. M. Aide [et al.] // Nature. 2016. Vol. 530. P. 211–214.

Blair B. J., Rabine D. L., Hofton M. A. The laser vegetation imaging sensor: a medium-altitude, digitisation-only, airborne laser altimeter for mapping vegetation and topography // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 1999. Vol. 54, Iss. 2–3. P. 115–122.

Blair J. B., Hofton M. A. Modeling laser altimeter return waveforms over complex vegetation using high-resolution elevation data // Geophysical Research Letters. 1999. Vol. 26. P. 2509–2512.

Bortolot Z. J., Wynne R. H. Estimating forest biomass using small footprint LiDAR data: an individual tree-based approach that incorporates training data // *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2005. Vol. 59, Iss. 6. P. 342–360.

Bottom-up delineation of individual trees from full-waveform airborne laser scans in a structurally complex eucalypt forest / I. Shendryk, M. Broich, M. G. Tulbure [et al.] // *Remote Sensing of Environment*. 2016. Vol. 173. P. 69–83.

Brandtberg T. Classifying individual tree species under leaf-off and leaf-on conditions using airborne lidar // *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2007. P. 61. P. 325–340.

Brandtberg T., Walter F. Automated delineation of individual tree crowns in high spatial resolution aerial images by multiple-scale analysis // *Machine Vision and Applications*. 1998. Vol. 11. P. 641999.

Breiman L. Random forests // *Machine Learning*. 2001. Vol. 45. P. 5–32.

Bretar F., Chehata N. Terrain modelling from lidar range data in natural landscapes: A predictive and Bayesian framework // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2010. Vol. 48. P. 1568–1578.

Brodrribb T. J., Pittermann J., Coomes D. A. Elegance versus speed: Examining the competition between conifer and angiosperm trees // *International Journal of Plant Sciences*. 2012. Vol. 173. P. 673–694.

Brokaw N. V., Lent R. A. Vertical structure // *Maintaining biodiversity in forest ecosystems*. Cambridge University Press, 2000. P. 373–399.

Brolly G., Kiraly G. Algorithms for stem mapping by means of terrestrial laser scanning // *Acta Silvatica et Lignaria Hungarica*. 2009. Vol. 5, Iss. 1. P. 119–130.

Brooks J. R., Jiang L., Ozcelik R. Compatible stem volume and taper equations for Brutian pine, cedar of Lebanon, and cilicica fir in Turkey // *Forest Ecology and Management*. 2008. Vol. 256, Iss. 1. P. 147–151.

Brown S. Estimating biomass and biomass change of tropical forests: a primer. Rome : UN-FAO, 1997. 55 p.

Building a topological and geometrical model of poplar tree using portable on-ground scanning LIDAR / M. Teobaldelli, A. D. Puig, T. Zenone [et al.] // *Functional Plant Biology*. 2008. Vol. 35. P. 1080–1090.

Camprodon J., Brotons L. Effects of undergrowth clearing on the bird communities of the Northwestern Mediterranean Coppice Holm oak forests // *Forest Ecology and Management*. 2006. Vol. 221. P. 72–82.

Capturing tree crown formation through implicit surface reconstruction using airborne lidar data / A. Kato, L. M. Moskal, P. Schiess [et al.] // *Remote Sensing of Environment*. 2009. Vol. 113. P. 1148–1162.

Chang T., Kuo J. Texture analysis and classification with tree-structured wavelet transform // *IEEE Transactions on Image Processing*. 1993. Vol. 2, Iss. 4. P. 429–441.

Characterizing 3D vegetation structure from space: Mission requirements / F. G. Hall, K. Bergen, J. B. Blair [et al.] // *Remote Sensing of Environment*. 2011. Vol. 115. P. 2753–2775.

Characterizing habitats associated with fisher den structures in the Southern Sierra Nevada, California using discrete return lidar / F. Zhao, R. A. Sweitzer, Q. Guo [et al.] // *Forest Ecology and Management*. 2012. Vol. 280. P. 112–119.

Characterizing vertical forest structure using small-footprint airborne LiDAR / D. A. Zimble, D. L. Evans, G. C. Carlson [et al.] // *Remote Sensing of Environment*. 2003. Vol. 87. P. 171–182.

Chasmer L., Hopkinson C., Treitz P. Assessing the three dimensional frequency distribution of airborne and ground-based LiDAR data for red pine and mixed deciduous forest plots // *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2004. Vol. 36. P. 66–70.

Chasmer L., Hopkinson C., Treitz P. Investigating laser pulse penetration through a conifer canopy by integrating airborne and terrestrial lidar // *Canadian Journal of Remote Sensing*. 2006. Vol. 32. P. 116–125.

Chen B., Li H. Study on biomass of natural diversifolious poplar plantations in Tarim River in Xinjiang // *Forest Science and Technology Xinjiang*. 1984. Vol. 3. P. 8–16.

Chernov N., Lesort C. Least squares fitting of circles // *Journal of Mathematical Imaging and Vision*. 2005. Vol. 23, Iss. 3. P. 239–252.

Chiarabaglio P. M., Coaloa D. Stima del Pioppeto. Criteri oggettivi per la valutazione del pioppeto mature // *Supplemento ai Quaderni di ricerca della Regione Piemonte – Agricoltura*. (Torino, Italia), 2002. P. 1–47. [In Italian].

Clark M. L., Roberts D. A., Clark D. B. Hyperspectral discrimination of tropical rain forest tree species at leaf to crown scales // *Remote Sensing of Environment*. 2005. Vol. 96. P. 375–398.

Classification, parameter estimation and state estimation – An engineering approach using MATLAB / F. van der Heijden, R. P. W. Duin, D. de Ridder [et al.]. Chichester : John Wiley & Sons Ltd, 2004. 434 p.

Clustering in airborne laser scanning raw data for segmentation of single trees / F. Morsdorf, E. Meier, B. Allgöwer [et al.] // *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2003. Vol. 34. P. 27–33.

Cohen L. D. On active contour models and balloons // *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*. 1991. Vol. 53. P. 211–218.

Colgan M. S., Asner G. P., Swemmer T. Harvesting tree biomass at the stand level to assess the accuracy of field and airborne biomass estimation in savannas // *Ecological Applications*. 2013. Vol. 23. P. 1170–1184.

Comaniciu D. An algorithm for data-driven bandwidth selection // *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2003. Vol. 25. P. 281–288.

Comaniciu D., Meer P. Mean shift: A robust approach toward feature space analysis // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2002. Vol. 24, Iss. 5. P. 603–619.

Combined high-density lidar and multispectral imagery for individual tree crown analysis / D. Leckie, F. Gougeon, D. Hill [et al.] // Canadian Journal of Remote Sensing. 2003. Vol. 29. P. 633–649.

Combined impact of sample size and modeling approaches for predicting stem volume in *Eucalyptus* spp. forest plantations using field and LiDAR data / V. S. Silva, C. A. Silva, M. Mohan [et al.] // Remote Sensing. 2020. Vol. 12. Article 1438.

Combining airborne and terrestrial laser scanning technologies to measure forest understorey volume / L. Liu, Y. Pang, Z. Li [et al.] // Forests. 2017. Vol. 8. Article 111.

Combining high spatial resolution multi-temporal satellite data with leaf-on LiDAR to enhance tree species discrimination at the crown level / F. Fang, B. E. McNeil, T. A. Warner [et al.] // International Journal of Remote Sensing. 2018. Vol. 39. P. 9054–9072.

Comparative testing of single-tree detection algorithms under different types of forest / J. Vauhkonen, L. Ene, S. Gupta [et al.] // Forestry. 2011. Vol. 85. P. 27–40.

Comparing canopy metrics derived from terrestrial and airborne laser scanning in a Douglas-fir dominated forest stand / T. Hilker, M. van Leeuwen, N. C. Coops [et al.] // Trees. 2010. Vol. 24, Iss. 5. P. 819–832.

Comparisons between field and LiDAR-based measures of stand structural complexity / V. R. Kane, R. J. McGaughey, J. D. Bakker [et al.] // Canadian Journal of Forest Research. 2010. Vol. 40. P. 761–773.

CompuTree: a collaborative platform for use of terrestrial LiDAR in dendrometry / A. Piboule, M. Krebs, L. Esclatine [et al.]. 2025. URL: <https://colloque6.inra.fr/memowood/MemoWood-presentations> (date of accessed: 31.07.2025).

Coren F., Sterzai P. Radiometric correction in laser scanning // International Journal of Remote Sensing. 2006. Vol. 27, Iss. 15. P. 3097–3104.

Côté J.-F., Fournier R. A., Egli R. An architectural model of trees to estimate forest structural attributes using terrestrial LiDAR // Environmental Modelling & Software. 2011. Vol. 26, Iss. 6. P. 761–777.

Crown modeling by terrestrial laser scanning as an approach to assess the effect of aboveground intra- and interspecific competition on tree growth / J. Metz, D. Seidel, P. Schall [et al.] // Forest Ecology and Management. 2013. Vol. 310. P. 275–288.

Crown plasticity in mixed forests – Quantifying asymmetry as a measure of competition using terrestrial laser scanning / D. Seidel, C. Leuschner, A. Müller [et al.] // Forest Ecology and Management. 2011. Vol. 261. P. 2123–2132.

Crown structure indicates tree secondary growth, competition legacy, and growth potential of dominant species in Europe / S. Ahmed, T. Hilmers, E. Uhl [et al.] // *Ecological Indicators*. 2025. Vol. 170. Article 113074.

Crown-level structure and fuel load characterization from airborne and terrestrial laser scanning in a longleaf pine (*Pinus palustris* Mill.) forest ecosystem / K. D. Rocha, C. A. Silva, D. N. Cosenza [et al.] // *Remote Sensing*. 2023. Vol. 15. Article 1002.

Cruz M. G., Alexander M. E., Wakimoto R. H. Assessing canopy fuel stratum characteristics in crown fire prone fuel types of western North America // *International Journal of Wildland Fire*. 2003. Vol. 12. P. 39–50.

Dalponte M., Coomes D. A. Tree-centric mapping of forest carbon density from airborne laser scanning and hyperspectral data // *Methods in Ecology and Evolution*. 2016. Vol. 7. P. 1236–1245.

Dandois J. P., Ellis E. C. High spatial resolution three-dimensional mapping of vegetation spectral dynamics using computer vision // *Remote Sensing of Environment*. 2013. Vol. 136. P. 259–276.

Danilin I. M., Farber S. K., Medvedev E. M. The method for landscape-statistical forest inventory and biomass assessment based on aerial laser scanning and digital aerial- and space photography // *Proceedings of International Symposium on the Role of Forests for Coming Generations – Philosophy and Technology for Forest Resource Management*, Utsunomiya, Japan, 2004. P. 1–15.

Danilin I. M., Medvedev E. M. Forest inventory and biomass assessment by the use of airborne laser scanning method (example from Siberia) // *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2004. Vol. 36. P. 139–144.

Danilin I. M., Medvedev E. M. Technology for monitoring and inventory of forest resources based on laser location, digital aerial photography and satellite geopositioning // *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*. 2011. Vol. 3. P. 326–336.

Danilin I. M., Medvedev E. M., Sweda T. Use of airborne laser terrain mapping system for forest inventory in Siberia // *Precision Forestry. Proceedings of the First International Precision Forestry Cooperative Symposium*, Seattle, Washington, 2001. P. 67–75.

Delineation of individual tree crowns from ALS and hyperspectral data: A comparison among four methods / M. Dalponte, F. Reyes, K. Kandare [et al.] // *European Journal of Remote Sensing*. 2015. Vol. 48. P. 365–382.

Delineation of tree crowns and tree species classification from full-waveform airborne laser scanning data using 3-D ellipsoidal clustering / E. Lindberg, L. Eysn, M. Hollaus [et al.] // *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 2014. Vol. 7. P. 3174–3181.

Detecting and measuring individual trees with laser scanning in mixed mountain forest of central Europe using an algorithm developed for Swedish bo-

real forest conditions / M. Heurich, Å. Persson, J. Holmgren [et al.] // International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2004. Vol. 36 (8/W2). P. 307–312.

Detection and analysis of individual leaf-off tree crowns in small footprint, high sampling density lidar data from the eastern deciduous forest in North America / T. Brandtberg, T. A. Warner, R. E. Landenberger [et al.] // Remote Sensing of Environment. 2003. Vol. 85. P. 290–303.

Detection of individual trees and estimation of tree height using LiDAR data / D. Kwak, W. Lee, J. Lee [et al.] // Journal of Forest Research. 2007. Vol. 12. P. 425–434.

Determination of the spatial distribution of trees from digital aerial photographs / J. Uutera, A. Haara, T. Tokola [et al.] // Forest Ecology and Management. 1998. Vol. 110. P. 275–282.

Determining tree height and crown diameter from high-resolution UAV imagery / D. Panagiotidis, A. Abdollahnejad, P. Surový [et al.] // International Journal of Remote Sensing. 2017. Vol. 38. P. 2392–2410.

Developing new allometric models for estimating aboveground woody biomass and volume of *Populus euphratica* using terrestrial laser scanning / A. Yusup, X. Hu, Ü. Halik [et al.] // Journal of Remote Sensing. 2025. Vol. 5. Article 0697.

Development and testing of allometric equations for estimating above-ground biomass of mixed-species environmental plantings / K. I. Paul, S. H. Roxburgh, J. R. England [et al.] // Forest Ecology and Management. 2013. Vol. 310. P. 483–494.

Development of crown ratio and height to crown base models for Masson pine in Southern China / Y. Li, W. Wang, W. Zeng [et al.] // Forests. 2020. Vol. 11. Article 1216.

Development of filtering, segmentation and modelling modules for LIDAR and multispectral data as a fundamental of an automatic forest inventory system / H. Weinacker, B. Koch, U. Heyder [et al.] // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2004. Vol. 36. P. 50–55.

Di Castri F. Mediterranean-type shrublands of the world // Ecosystems of the world: Mediterranean-type shrublands Amsterdam (The Netherlands): Elsevier Scientific Publications, 1981. P. 1–52.

Discrimination of vegetation strata in a multi-layered Mediterranean forest ecosystem using height and intensity information derived from airborne laser scanning / F. Morsdorf, A. Mårell, B. Koetz [et al.] // Remote Sensing of Environment. 2010. Vol. 114. P. 1403–1415.

Diversity and competition influence tree allometric relationships – developing functions for mixed-species forests / D. I. Forrester, A. Benneter, O. Bouriaud [et al.] // Journal of Ecology. 2017. Vol. 105. P. 761–774.

Do M., Vetterli M. The contourlet transform: an efficient directional multiresolution image representation // *IEEE Transactions on Image Processing*. 2005. Vol. 14, Iss. 12. P. 2091–2106.

Downes G. M., Wimmer R., Evans R. Understanding wood formation: gains to commercial forestry through tree ring research // *Dendrochronologia*. 2002. Vol. 20, Iss. 1–2. P. 37–51.

Drake J. B., Weishampel J. F. Multifractal analysis of canopy height measures in a longleaf pine savanna // *Forest Ecology and Management*. 2000. Vol. 128. P. 121–127.

Dralle K., Rudemo M. Stem number estimation by kernel smoothing in aerial photos // *Canadian Journal of Forest Research*. 1996. Vol. 26. P. 1228–1236.

Dubayah R. O., Drake J. B. Lidar remote sensing for forestry // *Journal of Forestry*. 2000. Vol. 98, Iss. 6. P. 44–46.

Edson C., Wing M. G. Airborne light detection and ranging (LiDAR) for individual tree stem location, height, and biomass measurements // *Remote Sensing*. 2011. Vol. 3, Iss. 11. P. 2494–2528.

Effects of individual tree detection error sources on forest management planning calculations / M. Vastaranta, M. Holopainen, X. Yu [et al.] // *Remote Sensing*. 2011. Vol. 3. P. 1614–1626.

Effects of realistic surface topography on seismic ground motion in the Yangminshan region of Taiwan based upon the spectral-element method and LiDAR DTM / S.-J. Lee, Y.-C. Chan, D. Komatitsch [et al.] // *Bulletin of the Seismological Society of America*. 2009. Vol. 99. P. 681–693.

Effects of topographic variability and lidar sampling density on several DEM interpolation methods / Q. Guo, W. Li, H. Yu [et al.] // *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. 2010. Vol. 76, Iss. 6. P. 701–712.

Ellsworth D., Reich P. Canopy structure and vertical patterns of photosynthesis and related leaf traits in a deciduous forest // *Oecologia*. 1993. Vol. 96, Iss. 2. P. 169–178.

Elmqvist M. Automatic ground modeling using laser radar data // Masters Thesis LiTH-ISY-EX-3061, Department of Electrical Engineering, Linköping University, Linköping, Sweden, 2000. 30 p.

Ene L., Næsset E., Gobakken T. Single tree detection in heterogeneous boreal forests using airborne laser scanning and area-based stem number estimates // *International Journal of Remote Sensing*. 2012. Vol. 33, Iss. 16. P. 5171–5193.

Enquist B. J., Brown J. H., West G. B. Allometric scaling of plant energetics and population density // *Nature*. 1998. Vol. 395. P. 163–165.

Error propagation and scaling for tropical forest biomass estimates / J. Chave, R. Condit, S. Aguilar [et al.] // *Philosophical Transactions of the Royal Society B*. 2004. Vol. 359. P. 409–420.

Esser M. H. Tree trunks and branches as optimum mechanical supports of the crown: I. The trunk // *Bulletin of Mathematical Biophysics*. 1946. Vol. 8. P. 65–74.

Estimated carbon dioxide emissions from tropical deforestation improved by carbon-density maps / A. Baccini, S. J. Goetz, W. S. Walker [et al.] // *Nature Climate Change*. 2012. Vol. 2. P. 182–185.

Estimating and mapping forest age across Canada's forested ecosystems / J. C. Maltman, T. Hermosilla, M. A. Wulder [et al.] // *Remote Sensing of Environment*. 2023. Vol. 90. Article 113529.

Estimating basal area and stem volume for individual trees from lidar data / Q. Chen, P. Gong, D. Baldocchi [et al.] // *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. 2007. Vol. 73, Iss. 12. P. 1355–1365.

Estimating biomass carbon stocks for a Mediterranean forest in central Spain using LiDAR height and intensity data / M. García, D. Riaño, E. Chuvieco [et al.] // *Remote Sensing of Environment*. 2010. Vol. 14. P. 816–830.

Estimating canopy structure of Douglas-fir forest stands from discrete-return LiDAR / N. C. Coops, T. Hilker, M. A. Wulder [et al.] // *Trees – Structure and Function*. 2007. Vol. 21. P. 295–310.

Estimating crown variables of individual trees using airborne and terrestrial laser scanners / S.-E. Jung, D.-A. Kwak, T. Park [et al.] // *Remote Sensing*. 2011. Vol. 3. P. 2346–2363.

Estimating forest stand age from LiDAR-derived predictors and nearest neighbor imputation / E. B. Racine, N. C. Coops, B. St-Onge [et al.] // *Forest Science*. 2014. Vol. 60. P. 128–136.

Estimating *Pinus palustris* tree diameter and stem volume from tree height, crown area and stand-level parameters / C. A. Gonzalez-Benecke, S. A. Gezan, L. J. Samuelson [et al.] // *Journal of Forestry Research*. 2014. Vol. 25. P. 43–52.

Estimating stem volume and biomass of *Pinus koraiensis* using LiDAR data / D. A. Kwak, W. K. Lee, H. K. Cho [et al.] // *Journal of Plant Research*. 2010. Vol. 123. P. 421–432.

Estimating urban above ground biomass with multi-scale LiDAR / P. Wilkes, M. Disney, M. B. Vicari [et al.] // *Carbon Balance and Management*. 2018. Vol. 13. Article 10.

Estimation of annual biomass of individual *Populus euphratica* based on tree-ring data / H. Huang, H. Xu, G. Zhang [et al.] // *Arid Zone Research*. 2018. Vol. 35, Iss. 4. P. 905–911.

Estimation of carbon stocks in New Zealand planted forests using airborne scanning lidar / P. R. Stephens, P. J. Watt, D. Loubser [et al.] // *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2008. Vol. 36. P. 389–394.

Estimation of stem attributes using a combination of terrestrial and airborne laser scanning / E. Lindberg, J. Holmgren, K. Olofsson [et al.] // *European Journal of Forest Research*. 2012. Vol. 131. P. 1917–1931.

Estimation of timber volume and stem density based on scanning laser altimetry and expected tree size distribution functions / M. Maltamo, K. Eerikainen, J. Pitkänen [et al.] // *Remote Sensing of Environment*. 2004. Vol. 90. P. 319–330.

Estimation of tree diameter at breast height (DBH) and biomass from allometric models using LiDAR data: A case of the Lake Broadwater Forest in Southeast Queensland, Australia / Z. M. Bhebhe, X. Liu, Z. Zhang [et al.] // Remote Sensing. 2025. Vol. 17. Article 2523.

Estimation of tropical forest structural characteristics using large-footprint lidar / J. B. Drake, R. O. Dubayah, D. B. Clark [et al.] // Remote Sensing of Environment. 2002. Vol. 79, Iss. 2–3. P. 305–319.

EvalTree – a new resource for the pulp and paper industry in Canada / A. Goodison, G. Sherson, S. Huntley, D. Kerekes // Pulp and Paper Canada. 2007. Vol. 108, Iss. 5. P. 18–20.

Evans J. S., Cushman S. A. Gradient modeling of conifer species using random forests // Landscape Ecology. 2009. Vol. 24. P. 673–683.

Extracting LiDAR indices to characterize multi-layered forest structure using mixture distributions functions / D. Jaskierniak, P. Lane, A. Robinson [et al.] // Remote Sensing of Environment. 2010. Vol. 115. P. 537–585.

Extreme warming challenges sentinel status of kelp forests as indicators of climate change / D. Reed, L. Washburn, A. Rassweiler [et al.] // Nature Communications. 2016. Vol. 7. Article 13757.

FALCON LIDAR Sensor System // TopoSys : [website]. 2003. URL: <http://www.toposys.de/> (date of accessed: 10.01.2025).

Farid A., Goodrich D. C., Sorooshian S. Using airborne lidar to discern age classes of cottonwood trees in a riparian area // Western Journal of Applied Forestry. 2006. Vol. 21, Iss. 3. P. 149–158.

Fast automatic precision tree models from terrestrial laser scanner data / P. Raunonen, M. Kaasalainen, M. Akerblom [et al.] // Remote Sensing. 2013. Vol. 5. P. 491–520.

Ferrarese J., Affleck D., Seielstad C. Conifer crown profile models from terrestrial laser scanning // Silva Fennica. 2015. Vol. 49, Iss. 1. Article id 1106.

Fiel S., Sablatnig R. Automated identification of tree species from images of the bark, leaves or needles // TU Wien, Faculty of Informatics. Technical Report CVL-TR-3, 2010. 60 p.

Field characterization of olive (*Olea europaea* L.) tree crown architecture using terrestrial laser scanning data / I. Moorthya, J. R. Millera, J. A. J. Berni [et al.] // Agricultural and Forest Meteorology. 2011. Vol. 151. P. 204–214.

Finney M. FARSITE: Fire area simulator-model development and evaluation // USDA Forest Service. Research Paper RMRS-RP-4. 2004. 47 p.

Fire behavior modeling for operational decision-making / A. Cardil, S. Monedero, G. Schag [et al.] // Current Opinion in Environmental Science and Health. 2021. Vol. 23. Article 100291.

Flood M., Gutelius B. Commercial implications of topographic terrain mapping using scanning airborne laser radar // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. 1997. Vol. 63, Iss. 4. P. 327–366.

Forest age estimation in northern Arkhangelsk region based on machine learning pipeline on Sentinel-2 and auxiliary data / A. Smolina, S. Illarionova, D. Shadrin [et al.] // Scientific Reports. 2023. Vol. 13. Article 22167.

Forest age mapping based on multiple-resource remote sensing data / X. Yang, Y. Liu, Z. Wu [et al.] // Environmental Monitoring and Assessment. 2020. Vol. 192. Article 734.

Forest and UAV: A bibliometric review / F. Gambella, L. Sistu, D. Piccirilli [et al.] // Contemporary Engineering Sciences. 2016. Vol. 9, Iss. 28. P. 1359–1370.

Forest stand age classification using time series of photogrammetrically derived digital surface models / M. Vastaranta, M. Niemi, M. A. Wulder [et al.] // Scandinavian Journal of Forest Research. 2016. Vol. 31. P. 194–205.

Friedländer H. Die Anwendung von flugzeuggetragenen Laserscannerdaten zur Ansprache dreidimensionaler Strukturelemente von Waldbeständen : Ph. D. Dissertation. University of Freiburg, Freiburg, 2002. 64 p.

From competition to facilitation: How tree species respond to neighbourhood diversity / A. Fichtner, W. Härdtle, Y. Li [et al.] // Ecology Letters. 2017. Vol. 20. P. 892–900.

From forest to product: New solutions for rapid, comprehensive wood and fibre analyses / G. E. Sherson, K. L. Woo, H. F. Jang [et al.] // III ICEP – International Colloquium on Eucalyptus Pulp, 2007. 12 p.

Fusion of airborne LiDAR and digital photography data for tree crowns segmentation and measurement / M. N. Favorskaya, A. N. Tkacheva, I. M. Danilin [et al.] // Intelligent Interactive Multimedia Systems and Services. Smart Innovation, Systems and Technologies. 2015. Vol. 40. P. 191–201.

Gärtner H., Denier C. Application of 3-D laser scanning device to acquire the structure of whole root systems. A pilot study // TRACE – Tree Rings in Archaeology, Climatology and Ecology. 2006. Vol. 4. P. 288294.

Gaussian decomposition and calibration of a novel small-footprint full-waveform digitising airborne laser scanner / W. Wagner, A. Ullrich, V. Ducic [et al.] // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2006. Vol. 60. P. 100–112.

Gaveau D. L. A., Hill R. A. Quantifying canopy height underestimation by laser pulse penetration in small-footprint airborne laser scanning data // Canadian Journal of Remote Sensing. 2003. Vol. 29, Iss. 5. P. 650–657.

Generalized nonlinear mixed-effect model of individual TREE height to crown base for *Larix olgensis* Henry in northeast China / L. Pan, G. Mei, Y. Wang [et al.] // Journal of Sustainable Forestry. 2020. Vol. 39. Article 262.

Generalized or general mixed-effect modelling of tree mortality of *Larix gmelinii* subsp. *principis-rupprechtii* in northern China / X. Zhou, L. Fu, R. P. Sharma [et al.] // Journal of Forestry Research. 2021. Vol. 32. P. 2447–2458.

Generation of crown bulk density for *Pinus sylvestris* L. from lidar / D. Riaño, E. Chuvieco, S. Condés [et al.] // Remote Sensing of Environment. 2004. Vol. 92. P. 345–352.

Geo-referencing forest field plots by co-registration of terrestrial and airborne laser scanning data / M. Hauglin, V. Lien, E. Næsset [et al.] // International Journal of Remote Sensing. 2014. Vol. 35, Iss. 9. P. 3135–3149.

Givnish T. J. Adaptation to sun and shade: A whole-plant perspective // Functional Plant Biology. 1988. Vol. 15, Iss. 2. P. 63–92.

Godin C. Representing and encoding plant architecture: a review // Annals of Forest Science. 2000. Vol. 57. P. 413–438.

Godin C., Caraglio Y. A multiscale model of plant topological structures // Journal of Theoretical Biology. 1998. Vol. 191. P. 1–46.

Godin C., Costes E., Sinoquet H. A method for describing plant architecture which integrates topology and geometry // Annals of Botany. 1999. Vol. 84. P. 343–357.

Godin C., Guedon Y., Costes E. Exploration of a plant architecture database with the AMAPmod software illustrated on an apple tree hybrid family // Agronomie. 1999. Vol. 19. P. 163–184.

Gong P., Sheng Y., Biging G. S. 3D model-based tree measurement from high-resolution aerial imagery // Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. 2002. Vol. 68, Iss. 11. P. 1203–1212.

Gorte B., Pfeifer N. Structuring laser-scanned trees using 3D mathematical morphology // International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. 2004. Vol. 35. P. 1–5.

Gougeon F. A. A crown-following approach to the automatic delineation of individual tree crowns in high spatial resolution aerial images // Canadian Journal of Remote Sensing. 1995. Vol. 21. P. 274–284.

Goutte C., Gaussier E. A probabilistic interpretation of precision, recall and F-score, with implication for evaluation // Advances in Information Retrieval. 2005. Vol. 3408. P. 345–359.

Graph SLAM correction for single scanner MLS forest data under boreal forest canopy / A. Kukko, R. Kaijaluoto, H. Kaartinen [et al.] // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2017. Vol. 132. P. 199–209.

Gray H. R. The form and taper of forest tree stems // Institute paper 32. Imperial Forestry Institute, University of Oxford, 1956. 78 p.

Gupta S., Weinacker H., Koch B. Comparative analysis of clustering-based approaches for 3-D single tree detection using airborne fullwave lidar data // Remote Sensing. 2010. Vol. 2, Iss. 4. P. 968–989.

Guttinger S. The limits of replicability // European Journal for Philosophy of Science. 2020. Vol. 10. P. 1–17.

HALCON // MVtec : [website]. 2003. URL: <http://www.mvtec.de/halcon/> (date of accessed: 10.01.2025).

Hallé F., Oldeman R. A. A., Tomlinson P. B. Tropical trees and forests – An architectural analysis. Berlin : Springer-Verlag, 1978. 441 p.

Harnessing unmanned aerial vehicles and IT's sustainable forestry management – Skyward Solutions / R. Rajaram, R. Ravi, K. Baranidharan [et al.] // International Journal of Zoology and Applied Biosciences. 2024. Vol. 9. P. 9–19.

Harwin S., Lucieer A. Assessing the accuracy of georeferenced point clouds produced via multi-view stereopsis from unmanned aerial vehicle (UAV) imagery // Remote Sensing. 2012. Vol. 4. P. 1573–1599.

Hay G. J., Marceau D. J. Multi-scale object-specific analysis (MOSA): An integrative approach for multi-scale landscape analysis // Remote Sensing and Digital Image Analysis. Dordrecht : Kluwer Academic Press, 2004. P. 71–92.

Height to crown base modelling for the main tree species in even-aged pedunculate oak forest: A case study from Central Croatia / S. Martín-García, I. Balenović, L. Jurjević [et al.] // South-East European Forestry. 2021. Vol. 12. P. 1–11.

Heinzel J. N., Weinacker H., Koch B. Prior-knowledgebased single-tree extraction // International Journal of Remote Sensing. 2011. Vol. 32, Iss. 17. P. 4999–5020.

Heinzel J., Koch B. Exploring full-waveform LiDAR parameters for tree species classification // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2011. Vol. 13. P. 152–160.

Hengl T. Finding the right pixel size // Computers & Geosciences. 2006. Vol. 32, Iss. 9. P. 1283–1298.

Henning J. G., Radtke P. J. Detailed stem measurements of standing trees from ground-based scanning lidar // Forest Science. 2006. Vol. 52. P. 67–80.

Heurich M. Evaluierung und Entwicklung von Methoden zur automatisierten Erfassung von Waldstrukturen aus Daten flugzeuggetragener Fernerkundungssensoren // Forstlicher Forschungsberichte München. 2006. No. 202. 377 p.

Heyder U. Automatische Delinierung und Klassifizierung von Bäumen aus Laser-und Multispektraldaten : Diploma-thesis. Freiburg : University of Freiburg, 2003. 87 p.

High-fidelity national carbon mapping for resource management and REDD+ / G. P. Asner, J. Mascaro, C. Anderson [et al.] // Carbon Balance and Management. 2013. Vol. 8. Article 7.

Highly accurate tree models derived from terrestrial laser scan data: A method description / J. Hackenberg, C. Morhart, J. Sheppard [et al.] // Forests. 2014. Vol. 5, Iss. 5. P. 1069–1105.

High-resolution forest age mapping based on forest height maps derived from GEDI and ICESat-2 space-borne lidar data / X. Lin, R. Shang, J. M. Chen [et al.] // Agricultural and Forest Meteorology. 2023. Vol. 339. Article 109592.

High-resolution forest carbon stocks and emissions in the Amazon / G. P. Asner, G. V. N. Powell, J. Mascaro [et al.] // Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. 2010. Vol. 107. P. 16738–16742.

HIGH-SCAN: The first European-wide attempt to derive single tree information from laser scanner data / J. Hyypä, M. Schardt, H. Haggrén [et al.] // The Photogrammetric Journal of Finland. 2001. Vol. 17. P. 58–68.

Hilmers T., Schmied G., Pretzsch H. Legacy effects of past thinning modulate drought stress reactions at present // Scandinavian Journal of Forest Research. 2022. Vol. 37. P. 182–199.

Hjelm B. Stem taper equations for poplars growing on farmland in Sweden // Journal of Forestry Research (Harbin). 2013. Vol. 24. P. 15–22.

Hofton M. A., Minster J. B., Blair J. B. Decomposition of laser altimeter waveforms // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2000. Vol. 38. P. 1989–1996.

Holmgren J. Prediction of tree height, basal area and stem volume in forest stands using airborne laser scanning // Scandinavian Journal of Forest Research. 2004. Vol. 19, Iss. 6. P. 543–553.

Holmgren J., Persson Å. Identifying species of individual trees using airborne laser scanner // Remote Sensing of Environment. 2004. Vol. 90. P. 415–423.

Holmgren J., Persson Å. Identifying species of individual trees using airborne laser scanner // Remote Sensing of Environment. 2004. Vol. 90. P. 415–423.

Hosoi F., Nakai Y., Omasa K. 3-D voxel-based solid modeling of a broad-leaved tree for accurate volume estimation using portable scanning lidar // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2013. Vol. 82. P. 41–48.

Hosoi F., Omasa K. Factors contributing to accuracy in the estimation of the woody canopy leaf area density profile using 3-D portable lidar imaging // Journal of Experimental Botany. 2007. Vol. 58. P. 3463–3473.

Hosoi F., Omasa K. Voxel-based 3-D modeling of individual trees for estimating leaf area density using high-resolution portable scanning lidar // IEEE Transactions on GeoScience and Remote Sensing. 2006. Vol. 44. P. 3610–3618.

Houghton R. A. Land-use change and the carbon cycle // Global Change Biology. 1995. Vol. 1. P. 275–287.

How does biomass allocation change with size and differ among species? An analysis for 1200 plant species from five continents / H. Poorter, A. M. Jagodzinski, R. Ruiz-Peinado [et al.] // New Phytologist. 2015. Vol. 208. P. 736–749.

How neighborhood affects tree diameter increment – New insights from terrestrial laser scanning and some methodical considerations / D. Seidel, N. Hoffmann, M. Ehbrecht [et al.] // Forest Ecology and Management. 2015. Vol. 336. P. 119–128.

Hu X., Chen W., Xu W. Adaptive mean shift-based identification of individual trees using airborne LiDAR data // Remote Sensing. 2017. Vol. 9. Article 148.

Huang X., Zhang L. An adaptive mean-shift analyses approach for object extraction and classification from urban hyperspectral imagery // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2008. Vol. 46. P. 4173–4185.

Hug C., Ullrich A., Grimm A. Litemapper 5600 – A waveform digitizing lidar terrain and vegetation mapping system // Proceedings of the ISPRS Working Group VIII/2, Laser Scanners for Forest and Landscape Assessment. 2004. Vol. 36. Part 8/W2. P. 24–29.

Hugershoff R. Die Bildmessung und ihre forstlichen Anwendungen // Deutsche Forstwirtschaft. 1939. Vol. 21, Iss. 50. P. 612–615.

Hulshof C. M., Swenson N. G., Weiser M. D. Tree height-diameter allometry across the United States // Ecology and Evolution. 2015. Vol. 5. P. 1193–1204.

Identifying and quantifying structural characteristics of heterogeneous boreal forest using laser scanner data / M. Maltamo, P. Packalén, X. Yu [et al.] // Forest Ecology and Management. 2005. Vol. 216. P. 41–50.

Impact of introduced herbivores on understory vegetation along a regional moisture gradient in Patagonian beech forests / M.-V. Piazza, L. A. Garibaldi, T. Kitzberger [et al.] // Forest Ecology and Management. 2016. Vol. 366. P. 11–22.

Implications of sensor configuration and topography on vertical plant profiles derived from terrestrial lidar / K. Calders, J. Armston, G. Newnham [et al.] // Agricultural and Forest Meteorology. 2014. Vol. 194. P. 104–117.

Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees / J. Chave, M. Rejou-Mechain, A. Burquez [et al.] // Global Change Biology. 2014. Vol. 20. P. 3177–3190.

Improving individual tree crown delineation and attributes estimation of tropical forests using airborne LiDAR data / W. Wan Mohd Jaafar, I. Woodhouse, C. Silva [et al.] // Forests. 2018. Vol. 9. Article 759.

Improving the efficiency and accuracy of individual tree crown delineation from high-density lidar data / B. Hu, J. Li, L. Jing [et al.] // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2014. Vol. 26. P. 145–155.

Imputation of individual longleaf pine (*Pinus palustris* Mill.) tree attributes from field and LiDAR data / C. A. Silva, A. T. Hudak, L. A. Vierling [et al.] // Canadian Journal of Remote Sensing. 2016. Vol. 42. P. 554573.

Imputation to predict height to crown base for trees with predicted heights / E. Allensworth, H. Temesgen, B. Frank, A. Gray // Forest Ecology and Management. 2021. Vol. 498. Article 119574.

Incorporating tree- and stand-level information on crown base height into multivariate forest management inventories based on airborne laser scanning / M. Maltamo, T. Karjalainen, J. Repola [et al.] // Silva Fennica. 2018. Vol. 52. Article 10006.

Individual tree crown delineation from airborne laser scanning for diseased larch forest stands / C. Barnes, H. Balzter, K. Barrett [et al.] // Remote Sensing. 2017. Vol. 9. Article 231.

Individual tree detection and classification with UAV-based photogrammetric point clouds and hyperspectral imaging / O. Nevalainen, E. Honkavaara, S. Tuominen [et al.] // *Remote Sensing*. 2017. Vol. 9. Article 185.

Individual tree detection and crown delineation from unmanned aircraft system (UAS) LiDAR in structurally complex mixed species eucalypt forests / D. Jaskierniak, A. Lucieer, G. Kuczera [et al.] // *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2021. Vol. 171. P. 171–187.

Individual tree detection using UAV-lidar and UAV-SfM data: A tutorial for beginners / M. Mohan, R. V. Leite, E. N. Broadbent [et al.] // *Open Geosciences*. 2021. Vol. 13. P. 1028–1039.

Individual tree segmentation and tree height estimation using leaf-off and leaf-on UAV-LiDAR data in dense deciduous forests / Q. Chen, T. Gao, J. Zhu [et al.] // *Remote Sensing*. 2022. Vol. 14. Article 2787.

Integrating drone-based LiDAR and multispectral data for tree monitoring / B. Savinelli, G. Tagliabue, L. Vignali [et al.] // *Drones*. 2024. Vol. 8. Article 744.

International benchmarking of terrestrial laser scanning approaches for forest inventories / X. Liang, J. Hyypä, H. Kaartinen [et al.] // *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2018. Vol. 144. P. 137–179.

International benchmarking of the individual tree detection methods for modeling 3-D canopy structure for silviculture and forest ecology using airborne laser scanning / Y. Wang, J. Hyypä, X. Liang [et al.] // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2016. Vol. 54. P. 5011–5027.

Invasive plants transform the three-dimensional structure of rain forests / G. P. Asner, R. F. Hughes, P. M. Vitousek [et al.] // *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 2008. Vol. 105. P. 4519–4523.

Isolating individual trees in a savanna woodland using small footprint lidar data / Q. Chen, D. Baldocchi, P. Gong [et al.] // *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. 2006. Vol. 72, Iss. 8. P. 923–932.

ISS observations offer insights into plant function / E. N. Stavros, D. Schimel, R. Pavlick [et al.] // *Nature Ecology and Evolution*. 2017. Vol. 1. Article 194.

Jacobs M., Rais A., Pretzsch H. How drought stress becomes visible upon detecting tree shape using terrestrial laser scanning (TLS) // *Forest Ecology and Management*. 2021. Vol. 489. Article 118975.

Jacobs S. M., Drew D. M. Using tree physiology to better understand the effect of environmental factors on wood fibre properties // *TAPPSA – International Convention Center, Durban, ZA*, 2002. 100 p.

Jakubowski M. K., Guo Q., Kelly M. Tradeoffs between lidar pulse density and forest measurement accuracy // *Remote Sensing of Environment*. 2013. Vol. 130. P. 245–253.

Jaskierniak D., Kuczera G., Benyon R. J. Predicting long-term streamflow variability in moist eucalypt forests using forest growth models and a sapwood area index // *Water Resources Research*. 2016. Vol. 52. P. 3052–3067.

Jensen J. R. Remote sensing of the environment: An earth resource perspective. New York : Pearson Prentice Hall Inc., 2007. 592 p.

Kalliovirta J., Tokola T. Functions for estimating stem diameter and tree age using tree height, crown width and existing stand database information // Silva Fennica. 2005. Vol. 39. P. 227–248.

Kass M., Witkin A., Terzopoulos D. Snakes: Active contour models // International Journal of Computer Vision. 1998. Vol. 1. P. 321–331.

Ke Y., Quackenbush L. J. A review of methods for automatic individual tree crown detection and delineation from passive remote sensing // International Journal of Remote Sensing. 2011. Vol. 32. P. 4725–4747.

Kennedy M. C., Johnson M. C., Harrison S. C. Model predictions of post-wildfire woody fuel succession and fire behavior are sensitive to fuel dynamics parameters // Forest Science. 2020. Vol. 67. P. 30–42.

Keyser T., Smith F. W. Influence of crown biomass estimators and distribution on canopy fuel characteristics in ponderosa pine stands of the Black Hills // Forest Science. 2010. Vol. 56, Iss. 2. P. 156–165.

Kiang N. Y. Savannas and Seasonal Drought: The Landscape leaf Connection Through Optimal Stomatal Control, Ph.D. dissertation, Department of Environmental Science, Policy, and Management, University of California at Berkeley, Berkeley, California, 2002. 303 p.

Kingsbury N. G. Complex wavelets for shift invariant analysis and filtering of signals // Journal of Applied and Computational Harmonic Analysis. 2001. Vol. 10, Iss. 3. P. 234–253.

Koch B., Heyder U., Weinacker H. Detection of individual tree crowns in airborne lidar data // Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. 2006. Vol. 72. P. 357–363.

Kokare M., Biswas P. K., Chatterji B. N. Texture image retrieval using rotated wavelet filters // Pattern Recognition Letters. 2007. Vol. 28. P. 1240–1249.

Krajnc L., Farrelly N., Harte A. M. The influence of crown and stem characteristics on timber quality in softwoods // Forest Ecology and Management. 2019. Vol. 435. P. 8–17.

Kraus K., Pfeifer N. Determination of terrain models in wooded areas with airborne scanner data // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 1998. Vol. 53. P. 193–203.

Kuželka K., Slavík M., Surový P. Very high density point clouds from UAV laser scanning for automatic tree stem detection and direct diameter measurement // Remote Sensing. 2020. Vol. 12. Article 1236.

Landscape-scale parameterization of a tree-level forest growth model: a k-nearest neighbor imputation approach incorporating LiDAR data / M. J. Falkowski, A. T. Hudak, N. L. Crookston [et al.] // Canadian Journal of Forest Research. 2010. Vol. 40, Iss. 2. P. 184–199.

Laser altimetry waveform measurement of vegetation canopy structure / D. J. Harding, J. B. Blair, J. B. Garvin [et al.] // Proceedings of the International

Geoscience and Remote Sensing Symposium-IGARSS'94. ESA Scientific & Technical Pub. Noordwijk, The Netherlands, 1994. P. 1251–1253.

Layer stacking: A novel algorithm for individual forest tree segmentation from LiDAR point clouds / E. Ayrey, S. Fraver, J. A. Kershaw [et al.] // Canadian Journal of Remote Sensing. 2017. Vol. 43. P. 16–27.

Lefsky M. A., Cohen W. B. Selection of remotely sensed data // Remote Sensing of Forest Environments, Concepts and Case Studies. Kluwer Academic Publishers : Norwell, 2003. P. 13–46.

Liaw A., Wiener M. Classification and regression by Random Forest // R News. 2002. Vol. 2. P. 18–22.

Lidar remote sensing for ecosystem studies / M. A. Lefsky, W. B. Cohen, G. G. Parker [et al.] // Bioscience. 2002. Vol. 52. P. 19–30.

Lidar remote sensing of forest canopy structure and related biophysical parameters at the H. J. Andrews experimental forest, Oregon, USA / M. A. Lefsky, W. B. Cohen, S. A. Acker [et al.] // Natural Resources Management using Remote Sensing and GIS. 1997. P. 79–91.

LiDAR remote sensing of forest structure / K. Lim, P. Treitz, M. Wulder [et al.] // Progress in Physical Geography. 2003. Vol. 27. P. 88–106.

Lidar remote sensing of the canopy structure and biophysical properties of Douglas-fir western hemlock forests / M. A. Lefsky, W. B. Cohen, S. A. Acker [et al.] // Remote Sensing of Environment. 1999. Vol. 70. P. 339–361.

Lidar sampling for large-area forest characterization: A review / M. A. Wulder, J. C. White, R. F. Nelson [et al.] // Remote Sensing of Environment. 2012. Vol. 121. P. 196–209.

LIDAR-based geometric reconstruction of boreal type forest stands at single tree level for forest and wildland fire management / F. Morsdorf, E. Meier, B. Kötz [et al.] // Remote Sensing of Environment. 2004. Vol. 92. P. 353–362.

Lin Y., Hyypä J. Multiecho-recording mobile laser scanning for enhancing individual tree crown reconstruction // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2012. Vol. 50. P. 4323–4332.

Linking crown structure with tree ring pattern: methodological considerations and proof of concept / H. Pretzsch, S. Ahmed, M. Jacobs [et al.] // Trees. 2022. Vol. 36. P. 1349–1367.

Long-term terrestrial laser scanning measurement station to continuously monitor structural and phenological dynamics of boreal forest canopy / M. B. Campos, P. Litkey, Y. Wang [et al.] // Frontiers in Plant Science. 2021. Vol. 11. Article 606752.

Lowman M. D., Rinker H. B. Forest Canopies. San Diego : Academic, 2004. 544 p.

Macleod G. A., Krabill W. B. Gross-merchantable timber volume estimation using an airborne LIDAR system // Canadian Journal of Remote Sensing. 1986. Vol. 12. P. 7–18.

Maclean G., Martin G. Merchantable timber volume estimation using cross-sectional photogrammetric and densitometric methods // Canadian Journal of Forest Research. 1984. Vol. 14. P. 803–810.

Magnussen S., Boudewyn P. Derivations of stand heights from airborne laser scanner data with canopy-based quantile estimators // Canadian Journal of Forest Research. 1998. Vol. 28. P. 1016–1031.

Magnussen S., Eggermon P., LaRicca V. N. Recovering tree heights from airborne laser scanner data // Forest Science. 1999. Vol. 45. P. 407–422.

Mallet C., Bretar F. Full-waveform topographic lidar: State-of-the-art // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2009. Vol. 64. P. 1–16.

Mapping forest age using national forest inventory, airborne laser scanning, and Sentinel-2 data / J. Schumacher, M. Hauglin, R. Astrup [et al.] // Forest Ecosystems. 2020. Vol. 7. Article 60.

Mapping forest stand age in China using remotely sensed forest height and observation data / C. Zhang, W. Ju, J. M. Chen [et al.] // Journal of Geophysical Research: Biogeosciences. 2014. Vol. 119. P. 1163–1179.

Mapping forest type and age in China's plantations / Z. Yu, H. Zhao, S. Liu [et al.] // Science of the Total Environment. 2020. Vol. 744. Article 140790.

Mapping global forest age from forest inventories, biomass and climate data / S. Besnard, S. Koirala, M. Santoro [et al.] // Earth System Science Data. 2021. Vol. 13. P. 4881–4896.

Mapping planted forest age using LandTrendr algorithm and Landsat 5–8 on the Loess Plateau, China / P. Li, H. Li, B. Si [et al.] // Agricultural and Forest Meteorology. 2024b. Vol. 344. Article 109795.

Mapping snags and understory shrubs for a LiDAR-based assessment of wildlife habitat suitability / S. Martinuzzi, L. A. Vierling, W. A. Gould [et al.] // Remote Sensing of Environment. 2009. Vol. 113. P. 2533–2546.

Mapping snowpack depth beneath forest canopies using airborne lidar / C. Hopkinson, M. Sitar, L. Chasmer [et al.] // Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. 2004. Vol. 70, Iss. 3. P. 323–330.

Mapping spatial distribution of forest age in China / Y. Zhang, Y. Yao, X. Wang [et al.] // Earth and Space Science. 2017. Vol. 4. P. 108–116.

Mapping stand age dynamics of the Siberian larch forests from recent Landsat observations / D. Chen, T. V. Loboda, A. Krylov [et al.] // Remote Sensing of Environment. 2016. Vol. 187. P. 320–331.

Mapping surface fuel models using lidar and multispectral data fusion for fire behavior / M. Mutlu, S. C. Popescu, C. Stripling [et al.] // Remote Sensing of Environment. 2008. Vol. 112. P. 274–285.

Marker-free registration of forest terrestrial laser scanner data pairs with embedded confidence metrics / D. Kelbe, J. van Aardt, P. Romanczyk [et al.] // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2016. Vol. 54, Iss. 7. P. 4314–4330.

Mazerolle M. J. Improving data analysis in herpetology: using Akaike's Information Criterion (AIC) to assess the strength of biological hypotheses // *Amphibia-Reptilia*. 2006. Vol. 27. P. 169–180.

Mean shift-based clustering analysis of multispectral remote sensing imagery / S. Bo, L. Ding, H. Li [et al.] // *International Journal of Remote Sensing*. 2009. Vol. 30. P. 817–827.

Measuring heights to crown base and crown median with LiDAR in a mature, even-aged loblolly pine stand / T. J. Dean, Q. V. Cao, S. D. Roberts [et al.] // *Forest Ecology and Management*. 2009. Vol. 257. P. 126–133.

Meyer F., Beucher S. Morphological segmentation // *Journal of Visual Communication and Image Representation*. 1990. Vol. 1. P. 21–46.

Mitsopoulos I. D., Dimitrakopoulos A. P. Estimation of canopy fuel characteristics of Aleppo pine (*Pinus halepensis* Mill.) forests in Greece based on common stand parameters // *European Journal of Forest Research*. 2014. Vol. 133. P. 73–79.

Modeling airborne laser scanning data for the spatial generation of critical forest parameters in fire behavior modeling / D. Riaño, E. Meier, B. Allgöwer [et al.] // *Remote Sensing of Environment*. 2003. Vol. 86. P. 177–186.

Modeling black spruce wood fiber attributes with terrestrial laser scanning / G. Giroud, R. Schneider, R. A. Fournier [et al.] // *Canadian Journal of Forest Research*. 2019. Vol. 49, Iss. 6. P. 661–669.

Modeling fuels and fire effects in 3D: Model description and applications / F. Pimont, R. Parsons, E. Rigolot [et al.] // *Environmental Modelling & Software*. 2016. Vol. 80. P. 225–244.

Modeling lumber bending stiffness and strength in natural black spruce stands using stand and tree characteristics / C. Liu, S. Y. Zhang, A. Cloutier, T. Rycabel // *Forest Ecology and Management*. 2007. Vol. 242. P. 648–655.

Modeling of the bacterial growth curve / M. H. Zwietering, I. Jongenburger, F. M. Rombouts [et al.] // *Applied and Environmental Microbiology*. 1990. Vol. 56. P. 1875–1881.

Modeling radiation and photosynthesis of a heterogeneous savanna woodland landscape with a hierarchy of model complexities / Q. Chen, D. Baldocchi, P. Gong [et al.] // *Agricultural and Forest Meteorology*. 2008. Vol. 148, Iss. 6–7. P. 1005–1020.

Modeling the influence of competition, climate, soil, and their interaction on height to crown base for Korean pine plantations in Northeast China / Y. Yan, J. Wang, S. Liu [et al.] // *European Journal of Forest Research*. 2024. Vol. 143. P. 1627–1640.

Modelling canopy fuel dynamics of maritime pine stands in North-West Spain / A. D. Ruiz-González, F. Castedo-Dorado, J. A. Vega [et al.] // *International Journal of Wildland Fire*. 2015. Vol. 24. P. 92–102.

Modelling canopy fuel variables in *Pinus pinaster* Ait. and *Pinus radiata* D. Don stands in northwestern Spain / I. Gómez-Vázquez, F. Crecente-Campo,

U. Diéguez-Aranda [et al.] // *Annals of Forest Science*. 2013. Vol. 70, Iss. 2. P. 1–12.

Modelling crown width–diameter relationship for Scots pine in the central Europe / R. P. Sharma, L. Bílek, Z. Vacek [et al.] // *Trees*. 2017. Vol. 31. P. 1875–1889.

Modelling individual tree height to crown base of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) and European beech (*Fagus sylvatica* L.) / R. P. Sharma, Z. Vacek, S. Vacek [et al.] // *PLoS ONE*. 2017. Vol. 12. Article e0186394.

Molteberg D., Hoibo O. Development and variation of wood density, kraft pulp yield and fibre dimension in young Norway spruce // *Wood Science and Technology*. 2006. Vol. 40. P. 173–189.

Moore P. T., Van Miegroet H., Nicholas N. S. Relative role of understory and overstory in carbon and nitrogen cycling in a southern Appalachian spruce-fir forest // *Canadian Journal of Forest Research*. 2007. Vol. 37. P. 2689–2700.

Multi-scale segmentation of forest areas and tree detection in lidar images by the attentive vision method / R. Palenichka, F. Doyon, A. Lakhssassi [et al.] // *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 2013. Vol. 6. P. 1313–1323.

Muth C. C., Bazzaz F. A. Tree canopy displacement and neighborhood interactions // *Canadian Journal of Forest Research*. 2003. Vol. 33. P. 1323–1330.

Naesset E. Determination of mean tree height of forest stands using airborne laser scanner data // *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*. 1997a. Vol. 52. P. 49–56.

Naesset E. Estimating timber volume of forest stands using airborne laser scanner data // *Remote Sensing of Environment*. 1997b. Vol. 61. P. 246–253.

Naesset E., Bjerknes K.-O. Estimating tree heights and number of stems in young forest stands using airborne laser scanner data // *Remote Sensing of Environment*. 2001. Vol. 78. P. 328–340.

Næsset E., Økland T. Estimating tree height and tree crown properties using airborne scanning laser in a boreal nature reserve // *Remote Sensing of Environment*. 2002. Vol. 79. P. 105–115.

NASA Goddard's LiDAR, hyperspectral and thermal (G-LiHT) airborne imager / B. D. Cook, L. A. Corp, R. F. Nelson [et al.] // *Remote Sensing*. 2013. Vol. 5. P. 4045–4066.

Nayar S. K., Ikeuchi K., Kanade T. Surface reflection: physical and geometrical perspectives // *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 1991. Vol. 13. P. 611–634.

Neighborhood competition modulates the link between crown structure and tree ring variability in monospecific and mixed forest stands / S. Ahmed, T. Hilmers, E. Uhl [et al.] // *Forest Ecology and Management*. 2024. Vol. 560. Article 121839.

Nelson R. F., Gregoire T. G., Oderwald R. G. The effects of fixed-area plot width on forest canopy height simulation // *Forest Science*. 1998. Vol. 44. P. 438–444.

Nelson R. F., Krabill W. B., Maclean G. A. Determining forest canopy characteristics using airborne laser data // *Remote Sensing of Environment*. 1984. Vol. 15. P. 201–212.

Nelson R. F., Krabill W., Tonelli J. Estimating forest biomass and volume using airborne laser data // *Remote Sensing of Environment*. 1988b. Vol. 24. P. 247–267.

Nelson R. F., Swift R. N., Krabill W. B. Using airborne lasers to estimate forest canopy and stand characteristics // *Journal of Forestry*. 1988. Vol. 86. P. 31–38.

Nelson R. Modeling forest canopy heights: the effects of canopy shape // *Remote Sensing of Environment*. 1997. Vol. 60. P. 327–334.

Nelson R., Oderwald R., Gregoire T. G. Separating the ground and airborne laser sampling phases to estimate tropical forest basal area, volume, and biomass // *Remote Sensing of Environment*. 1997. Vol. 60. P. 311–326.

Neural network guided interpolation for mapping canopy height of China's forests by integrating GEDI and ICESat-2 data / X. Liu, Y. Su, T. Hu [et al.] // *Remote Sensing of Environment*. 2022. Vol. 269. Article 112844.

Neuville R., Bates J. S., Jonard F. Estimating forest structure from UAV-mounted LiDAR point cloud using machine learning // *Remote Sensing*. 2021. Vol. 13. Article 352.

New opportunities for forest remote sensing through ultra-high-density drone lidar / J. R. Kellner, J. Armston, K. C. Markus Birrer [et al.] // *Surveys in Geophysics*. 2019. Vol. 40. P. 959–977.

Niemann K. O., Adams S., Hay G. Automated tree crown identification using digital orthophoto mosaics // *Proceedings of the International Forum on Automated Interpretation of High Spatial Resolution Digital Imagery for Forestry*, Victoria, BC, Natural Resources Canada, Canadian Forest Service, Pacific Forestry Center, 1999. P. 105–113.

Nilsson M. Estimation of tree heights and stand volume using an airborne lidar system // *Remote Sensing of Environment*. 1996. Vol. 56. P. 1–7.

Ni-Meister W., Jupp D. L. B., Dubayah R. O. Modeling lidar waveforms in heterogenous and discrete canopies // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2002. Vol. 39, Iss. 9. P. 1943–1958.

No saturation in the accumulation of alien species worldwide / H. Seebens, T. M. Blackburn, E. E. Dyer [et al.] // *Nature communications*. 2017. Vol. 8. P. 1–9.

Nondestructive estimates of above-ground biomass using terrestrial laser scanning / K. Calders, G. Newnham, A. Burt [et al.] // *Methods in Ecology and Evolution*. 2015. Vol. 6, Iss. 2. P. 198–208.

Non-destructive tree volume estimation through quantitative structure modelling: Comparing UAV laser scanning with terrestrial LiDAR / B. Brede, K. Calders, A. Lau [et al.] // *Remote Sensing of Environment*. 2019. Vol. 233. Article 111355.

Nonlinear mixed-effects height to crown base model based on both airborne LiDAR and field datasets for *Picea crassifolia* kom. trees in northwest China / Z. Yang, Q. Liu, P. Luo [et al.] // Forest Ecology and Management. 2020. Vol. 474. Article 118323.

Nonlinear mixed-effects height to crown base model for moso bamboo (*Phyllostachys heterocycla* (Carr.) mitford cv. *pubescens*) in Eastern China / X. Zhou, Y. Zheng, F. Guan [et al.] // Forests. 2022. Vol. 13. Article 823.

Normalized Burn ratio plus (NBR+): A new index for Sentinel-2 imagery / E. Alcaras, D. Costantino, F. Guastaferro [et al.] // Remote Sensing. 2022. Vol. 14. Article 1727.

Oker-Blom P. Photosynthetic radiation regime and canopy structure in modeled forest stands // Acta Forestalia Fennica. 1986. Vol. 197. P. 1–44.

Oliver C. D., Stephens E. P. Reconstruction of a mixed-species forest in Central New England // Ecology. 1977. Vol. 58. P. 562–572.

Omasa K., Hosoi F., Konishi A. 3D lidar imaging for detecting and understanding plant responses and canopy structure // Journal of Experimental Botany. 2007. Vol. 58. P. 881–898.

On the use of binary partition trees for the tree crown segmentation of tropical rainforest hyperspectral images / G. Tochon, J. B. Feret, S. Valero [et al.] // Remote Sensing of Environment. 2015. Vol. 159. P. 318–331.

On the use of unmanned aerial systems for environmental monitoring / S. Manfreda, M. McCabe, P. Miller [et al.] // Remote Sensing. 2018. Vol. 10. Article 641.

Optimization of an airborne laser altimeter for remote sensing of vegetation and tree canopies / J. B. Blair, D. B. Coyle, J. Bufton [et al.] // IGARSS-'94 – surface and atmospheric remote sensing: technologies data analysis and interpretation. Pasadena, CA: IEEE, 1994. P. 939–941.

Ørka H. O., Næsset E., Bollandsas O. M. Classifying species of individual trees by intensity and structure features derived from airborne laser scanner data // Remote Sensing of Environment. 2009. Vol. 113, Iss. 6. P. 1163–1174.

Paris C., Valduga D., Bruzzone L. A hierarchical approach to three-dimensional segmentation of LiDAR data at single-tree level in a multilayered forest // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2016. Vol. 54. P. 4190–4203.

Parker G. G., Harding D. J., Berger M. L. A portable LiDAR system for rapid determination of forest canopy structure // Journal of Applied Ecology. 2004. Vol. 41. P. 755–767.

Parsons R. A., Mell W. E., McCauley P. Linking 3D spatial models of fuels and fire: Effects of spatial heterogeneity on fire behavior // Ecological Modelling. 2011. Vol. 222. P. 679–691.

Performance and sensitivity of individual tree segmentation methods for UAV-LiDAR in multiple forest types / K. Ma, Z. Chen, L. Fu [et al.] // Remote Sensing. 2022. Vol. 14. Article 298.

Persson A. Extraction of Individual Trees Using Laser Radar Data : Masters Thesis EX013. Goteborg : Chalmers University of Technology, 2001. 28 p.

Persson Å., Holmgren J., Södermann U. Detecting and measuring individual trees using an airborne laser scanner // Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. 2002. Vol. 68. P. 925–932.

Persson H. J., Ekstrom M., Ståhl G. Quantify and account for field reference errors in forest remote sensing studies // Remote Sensing of Environment. 2022. Vol. 283. Article 113302.

Pinz A. Tree isolation and species classification // Proceedings of the International Forum on Automated Interpretation of High Spatial Resolution Digital Imagery for Forestry, Victoria. Natural Resources Canada, Canadian Forest Service, Pacific Forestry Center, 1999. P. 127–139.

Pitas I. Digital image processing algorithms and applications. New York : John Wiley & Sons, Inc, 2000. 432 p.

Pollock R. The automatic recognition of individual trees in aerial images of forests based on a synthetic tree crown model : Ph. D. Dissertation. Vancouver : University of British Columbia, 1996. 172 p.

Popescu S. C. Estimating biomass of individual pine trees using airborne lidar // Biomass and Bioenergy. 2007. Vol. 31. P. 646–655.

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 // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. 2004. Vol. 70. P. 589–604.

Popescu S. C., Wynne R. H., Nelson R. F. Estimating plot level heights with lidar: Local filtering with a canopy height based variable window size // Computers and Electronics in Agriculture. 2002. Vol. 37. P. 71–95.

Popescu S. C., Wynne R. H., Nelson R. F. Measuring individual tree crown diameter with lidar and assessing its influence on estimating forest volume and biomass // Canadian Journal of Remote Sensing. 2003. Vol. 29. P. 564–577.

Popescu S. C., Zhao K. A voxel-based lidar method for estimating crown base height for deciduous and pine trees // Remote Sensing of Environment. 2008. Vol. 112. P. 767–781.

Popescu S., Wynne R., Scrivani J. Fusion of small footprint lidar and multispectral data to estimate plot-level volume and biomass in deciduous and pine forests in Virginia, USA // Forest Science. 2004. Vol. 50. P. 551–565.

Precise aboveground biomass estimation of plantation forest trees using the novel allometric model and UAV-borne LiDAR / J. Lin, D. Chen, S. Yang [et al.] // Frontiers in Forests and Global Change. 2023. Vol. 6. Article 1166349.

Predicting and calibrating height to crown base: a case for Dahurian larch (*Larix gmelinii* Rupr.) in Northeastern China / J. Wang, L. Jiang, D. Gaire [et al.] // Canadian Journal of Forest Research. 2022. Vol. 52. P. 1303–1319.

Predicting height to crown base of *Larix olgensis* in Northeast China using UAV-LiDAR data and nonlinear mixed effects models / X. Liu, Y. Hao, F. R. A. Widagdo [et al.] // Remote Sensing. 2021. Vol. 13. Article 1834.

Predicting individual tree attributes from airborne laser point clouds based on the random forests technique / X. Yu, J. Hyypä, M. Vastaranta [et al.] // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2011. Vol. 66. P. 28–37.

Predicting stand age in managed forests using National Forest Inventory field data and airborne laser scanning / M. Maltamo, H. Kinnunen, A. Kangas [et al.] // Forest Ecosystems. 2020. Vol. 7. Article 44.

Predicting stem total and assortment volumes in an industrial *Pinus taeda* L. forest plantation using airborne laser scanning data and Random Forest / C. A. Silva, C. Klauberg, A. T. Hudak [et al.] // Forests. 2017. Vol. 8. Article 254.

Predicting wood fiber attributes using local-scale metrics from terrestrial LiDAR data: A case study of Newfoundland conifer species / D. Blanchette, R. A. Fournier, J. E. Luther, J.-F. Côté // Forest Ecology and Management. 2015. Vol. 347. P. 116–129.

Predicting wood quantity and quality attributes of balsam fir and black spruce using airborne laser scanner data / J. E. Luther, R. Skinner, R. A. Fournier [et al.] // Forestry. 2014. Vol. 87. P. 313–326.

Prediction of species specific forest inventory attributes using a nonparametric semi-individual tree crown approach based on fused airborne laser scanning and multispectral data / J. Breidenbach, E. Næsset, V. Lien [et al.] // Remote Sensing of Environment. 2010. Vol. 114. P. 911–924.

Prediction of stem attributes by combining airborne laser scanning and measurements from harvesters / J. Holmgren, A. Barth, H. Larsson [et al.] // Silva Fennica. 2012. Vol. 46, Iss. 2. P. 227–239.

Prediction of wood quality in small-diameter Douglas-fir using site and stand characteristics / C. D. Morrow, T. M. Gorman, J. W. Evans [et al.] // Wood and Fiber Science. 2013. Vol. 5, No. 1. P. 49–61.

Predictive modeling of black spruce (*Picea mariana* (Mill.) BSP) wood density using stand structure variables derived from airborne LiDAR data in boreal forests of Ontario / B. Pokharel, A. Groot, D. G. Pitt [et al.] // Forests. 2016. Vol. 7, Iss. 12. P. 311.

Preparata F. P., Hong S. J. Convex hulls of finite sets of points in two and three dimensions // Communications of the Association for Computing Machinery. 1977. Vol. 20. P. 87–93.

Pretzsch H. Canopy space filling and tree crown morphology in mixed-species stands compared with monocultures // Forest Ecology and Management. 2014. Vol. 327. P. 251–264.

Pretzsch H. The effect of tree crown allometry on community dynamics in mixed-species stands versus monocultures. A review and perspectives for modeling and silvicultural regulation // Forests. 2019. Vol. 10. Article 810.

Pretzsch H. Tree growth as affected by stem and crown structure // Trees. 2021a. Vol. 35. P. 947–960.

Pretzsch H. Trees grow modulated by the ecological memory of their past growth: Consequences for monitoring, modelling, and silvicultural treatment // *Forest Ecology and Management*. 2021b. Vol. 487. Article 118982.

Pretzsch H., Rais A. Wood quality in complex forests versus even-aged monocultures: Review and perspectives // *Wood Science and Technology*. 2016. Vol. 50. P. 845–880.

Pyne S. J., Andrews P. L., Laven R. D. Introduction to wildland fire. 2nd ed. New York : John Wiley & Sons, 1996. 808 p.

Pyysalo U., Hyypä H. Reconstructing tree crowns from laser scanner data for feature extraction // *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2002. Vol. 34. P. 218–221.

Quantifying Australian forest floristics and structure using small footprint LiDAR and large scale aerial photography / P. K. Tickle, A. Lee, R. M. Lucas [et al.] // *Forest Ecology and Management*. 2006. Vol. 223. P. 379–394.

Quantifying forest above ground carbon content using LiDAR remote sensing / G. Patenaude, R. A. Hill, R. Milne [et al.] // *Remote Sensing of Environment*. 2004. Vol. 93. P. 368–380.

QUIC-fire: A fast-running simulation tool for prescribed fire planning / R. Linn, S. Goodrick, S. Brambilla [et al.] // *Environmental Modelling & Software*. 2019. Vol. 125. Article 104616.

Rate of tree carbon accumulation increases continuously with tree size / N. L. Stephenson, A. J. Das, R. Condit [et al.] // *Nature*. 2014. Vol. 507. P. 90–93.

Realistic 3D-modeling of forest growth with natural effect / M. N. Favorskaya, A. G. Zotin, I. M. Danilin [et al.] // *Advances in Intelligent Decision Technologies. Smart Innovation, Systems and Technologies*. 2010. Vol. 4. P. 191–199.

Reconstructing long-term forest age of China by combining forest inventories, satellite-based forest age and forest cover data sets / J. Xia, X. Xia, Y. Chen [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*. 2023. Vol. 128. Article e2023JG007492.

Reduced model complexity for efficient characterisation of savanna woodland structure using terrestrial laser scanning / L. Luck, M. Kaestli, L. B. Hutley [et al.] // *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2023. Vol. 118. Article 103255.

Reitberger J., Krzystek P., Stilla U. 3D segmentation and classification of single trees with full waveform LiDAR data // *Proceedings of SilviLaser 2008, 8th international conference on LiDAR applications in forest assessment and inventory*, Edinburgh, UK, 2008c. P. 216–226.

Reitberger J., Krzystek P., Stilla U. Analysis of full waveform LIDAR data for the classification of deciduous and coniferous trees // *International Journal of Remote Sensing*. 2008a. Vol. 29. P. 1407–1431.

Reitberger J., Krzystek P., Stilla U. Benefit of airborne full waveform lidar for 3D segmentation and classification of single trees // ASPRS 2009 Annual Conference. Baltimal, MD, United States, 2009a. P. 1–9.

Relationships between body size and abundance in ecology / E. P. White, S. M. Ernest, A. J. Kerkho [et al.] // Trends in Ecology and Evolution. 2007. Vol. 22. P. 323–330.

Remote sensing of foliar mass and chlorophyll as indicators of forest health: Preliminary results from a project in Norway / S. Solberg, E. Næsset, L. Aurdal [et al.] // Proceedings of ForestSat 2005 (31 May–03 June, Borås, Sweden (Report 8a of the National Board of Forestry, Sweden)), 2005. P. 105–109.

Remote sensing of species mixtures in conifer plantations using LiDAR height and intensity data / D. N. Donoghue, P. J. Watt, N. J. Cox [et al.] // Remote Sensing of Environment. 2007. Vol. 110, Iss. 4. P. 509–522.

Remote sensing technologies for enhancing forest inventories: A review / J. C. White, N. C. Coops, M. A. Wulder [et al.] // Canadian Journal of Remote Sensing. 2016. Vol. 42. P. 619–641.

Repola J. Biomass equations for Scots pine and Norway spruce in Finland // Silva Fennica. 2009. Vol. 43, Iss. 4. P. 625–647.

Reulke R., Haala N. Tree species recognition with fuzzy texture parameters // Combinatorial Image Analysis. Lecture Notes in Computer Science. 2004. Vol. 3322. P. 607–620.

Review of methods of small-footprint airborne laser scanning for extracting forest inventory data in boreal forests / J. Hyypä, H. Hyypä, D. Leckie [et al.] // International Journal of Remote Sensing. 2008. Vol. 29. P. 1339–1366.

Richardson J. J., Moskal L. M. Strengths and limitations of assessing forest density and spatial configuration with aerial LiDAR // Remote Sensing of Environment. 2011. Vol. 115. P. 2640–2651.

Ritchie J. C. Airborne laser altimeter measurements of landscape topography // Remote Sensing of Environment. 1995. Vol. 53. P. 91–96.

Ruiz-González A. D., Álvarez-González J. G. Canopy bulk density and canopy base height equations for assessing crown fire hazard in *Pinus radiata* plantations // Canadian Journal of Forest Research. 2011. Vol. 41. P. 839–850.

Sandberg D. V., Ottmar R. D., Cushon G. H. Characterizing fuels in the 21st century // International Journal of Wildland Fire. 2001. Vol. 10. P. 381–387.

SAR-based estimation of above-ground biomass and its changes in tropical forests of Kalimantan using L-and C-Band / A. Berninger, S. Lohberger, M. Stängel [et al.] // Remote Sensing. 2018. Vol. 10. Article 831.

Schimleck L. R., Evans R., Matheson A. C. Estimation of *Pinus radiata* D. Don clear wood properties by near-infrared spectroscopy // Journal of Wood Science. 2002. Vol. 48. P. 132–137.

Scott J. H., Reinhardt E. D. Assessing crown fire potential by linking models of surface and crown fire behavior // USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station, Research Paper RMRS-RP-29, 2001. 59 p.

Segmentation of individual trees from TLS and MLS data / L. Zhong, L. Cheng, H. Xu [et al.] // IEEE J. Sel. Topics Appl. Earth Observ. Remote Sens. 2017. Vol. 10, No. 2. P. 774–787.

Serra J. Image analysis and mathematical morphology 2. Theoretical advances. London : Academic press, 1982. 610 p.

Shi J., Malik J. Normalized cuts and image segmentation // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2000. Vol. 22. P. 888–905.

Shifts in tree functional composition amplify the response of forest biomass to climate / T. Zhang, Ü. Niinemets, J. Sheffield [et al.] // Nature. 2018. Vol. 556. P. 99–102.

Shivers B. D., Borders B. E. Sampling Techniques for Forest Resource Inventory. New York : Wiley, 1996. 346 p.

Shrub height and crown projection area are effective predictors in above-ground biomass models for multi-stemmed European hazel / J. Pajtić, B. Konopka, I. Barka [et al.] // Forest Ecosystems. 2025. Vol. 13. Article 100316.

SiDroForest: a comprehensive forest inventory of Siberian boreal forest investigations including drone-based point clouds, individually labeled trees, synthetically generated tree crowns, and Sentinel-2 labeled image patches // F. van Geffen, B. Heim, F. Brieger [et al.] // Earth System Science Data. 2022. Vol. 14. P. 4967–4994.

Simple method for direct crown base height estimation of individual conifer trees using airborne LiDAR data / L. Luo, Q. Zhai, Y. Su [et al.] // Optics Express. 2018. Vol. 26, Iss. 10. P. A562–A578.

SimpleTree – An efficient open source tool to build tree models from TLS clouds / J. Hackenberg, H. Spiecker, K. Calders [et al.] // Forests. 2015. Vol. 6, Iss. 11. P. 4245–4294.

Single tree species classification from Terrestrial Laser Scanning data for forest inventory / A. Othmani, L. F. C. Lew Yan Voon, C. Stolz, A. Piboule // Pattern Recognition Letters. 2013. Vol. 34. P. 2144–2150.

Single-tree detection in high-density LiDAR data from UAV-based survey / M. Balsi, S. Esposito, P. Fallavollita [et al.] // European Journal of Remote Sensing. 2018. Vol. 51. P. 679–692.

Single-tree forest inventory using lidar and aerial images for 3D treetop positioning, species recognition, height and crown width estimation / I. Korpela, B. Dahlin, H. Schäfer [et al.] // International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2007. Vol. 36. P. 227–233.

Soille P. Morphological Image Analysis: Principles and Applications. New York : Springer, 1999. 319 p.

Soille P. Morphological Image Analysis: Principles and Applications. 2nd ed. Berlin : Springer-Verlag, 2003. 391 p.

Sokolova M., Japkowicz N., Szpakowicz S. Beyond accuracy, F-score and ROC: A family of discriminant measures for performance evaluation // Advances in Artificial Intelligence. Berlin, Heidelberg : Springer, 2006. P. 1015–1021.

Solberg S., Naesset E., Bollandsas O. M. Single tree segmentation using airborne laser scanner data in a structurally heterogeneous spruce forest // *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 2006. Vol. 72. P. 1369–1378.

Spatial partitioning of biomass and diversity in a lowland Bolivian forest: Linking field and remote sensing measurements / E. N. Broadbent, G. P. Asner, M. Peña-Claros [et al.] // *Forest Ecology and Management*. 2008. Vol. 255. P. 2602–2616.

Spatial pattern of forest ages in China retrieved from national-level inventory and remote sensing imageries / M. Dai, T. Zhou, L. L. Yang [et al.] // *Geographical Research*. 2011. Vol. 30, Iss. 1. P. 172–184.

Staiger R., Ettel M. Untersuchung des Laserscanners IMAGER 5003 von Zoller & Fröhlich // *DGPF-Tagungsband*. 2003. Vol. 12. P. 293–300.

Stovall A. E. L., Shugart H. H. Improved biomass calibration and validation with terrestrial LiDAR: Implications for future LiDAR and SAR missions // *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 2018. Vol. 11. P. 3527–3537.

Straub B.-M., Heipke C. Automatic extraction of trees for 3D-City models from images and height data // *Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images*. 2001. P. 267–277.

St-Onge B. A., Achaichia N. Measuring forest canopy height using a combination of lidar and aerial photography data // *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2001. Vol. 34. P. 131–137.

Sun C., Cao S., Sanchez-Azofeifa G. A. Mapping tropical dry forest age using airborne waveform LiDAR and hyperspectral metrics // *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2019. Vol. 83. Article 101908.

Surface lidar remote sensing of basal area and biomass in deciduous forests of eastern Maryland, USA / M. A. Lefsky, D. Harding, W. B. Cohen [et al.] // *Remote Sensing of Environment*. 1999. Vol. 67. P. 83–98.

Swenson N. G., Enquist B. J. The relationship between stem branch wood specific gravity and the ability of each measure to predict leaf area // *American Journal of Botany*. 2008. Vol. 95, No. 4. P. 516–519.

Swetnam T. L., Falk D. A. Application of metabolic scaling theory to reduce error in local maxima tree segmentation from aerial lidar // *Forest Ecology and Management*. 2014. Vol. 323. P. 158–167.

Tabachnick B. G., Fidell L. S. *Using multivariate statistics*. (3rd ed. New York, NY, Harper Collins, 1996. 880 p.

Tallo: a global tree allometry and crown architecture database / T. Jucker, F. J. Fischer, J. Chave [et al.] // *Global Change Biology*. 2022. Vol. 28. P. 5254–5268.

Tang L., Shao G. Drone remote sensing for forestry research and practices // *Journal of Forestry Research*. 2015. Vol. 26. P. 791–797.

Tao S. L., Wu F. F., Guo Q. H. Segmenting tree crowns from terrestrial and mobile LiDAR data by exploring ecological theories // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2015. Vol. 110. P. 66–76.

Taubin G. Geometric signal processing on polygonal meshes. STAR – State of The Art Report. Eurographics, 2000. 11 p.

Tenenbaum J. B., de Silva V., Langford J. C. A global geometric framework for nonlinear dimensionality reduction // Science. 2000. Vol. 290 (5500). P. 2319–2323.

Ter-Mikaelian M. T., Korzukhin M. D. Biomass equations for sixty-five North American tree species // Forest Ecology and Management. 1997. Vol. 97. P. 1–24.

The accuracy of estimating individual tree variables with airborne laser scanning in a boreal nature reserve / M. Maltamo, K. Mustonen, J. Hyypä [et al.] // Canadian Journal of Forest Research. 2004. Vol. 34. P. 1791–1801.

The enigma of the rise of angiosperms: Can we untie the knot? / L. Augusto, T. J. Davies, S. Delzon [et al.] // Ecology Letters. 2014. Vol. 17. P. 1326–1338.

The GEDI simulator: A large-footprint waveform lidar simulator for calibration and validation of space borne missions / S. Hancock, J. Armston, M. Hofton [et al.] // Earth and Space Science. 2018. Vol. 6. P. 294–310.

The geoscience laser altimeter system (GLAS) laser transmitter / R. Afzal, A. W. Yu, J. L. Dallas [et al.] // IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics. 2007. Vol. 13, Iss. 3. P. 511–536.

The global ecosystem dynamics investigation: high-resolution laser ranging of the Earth's forests and topography / R. Dubayah, J. B. Blair, S. Goetz [et al.] // Science of Remote Sensing. 2020. Vol. 1. Article 100002.

The influence of trunk cavity on tree vitality and heartwood/sapwood characteristics of *Populus euphratica* Oliv. / R. Mumin, Ü. Halik, T. Aishan [et al.] // Chinese Journal of Ecology. 2021. Vol. 40. P. 3070–3077.

The past matters: Previous management strategies modulate current growth and drought responses of Norway spruce (*Picea abies* H. Karst.) / G. Schmied, T. Hilmers, E. Uhl [et al.] // Forests. 2022. Vol. 13. Article 243.

The role of LiDAR in sustainable forest management / M. A. Wulder, C. W. Bater, N. C. Coops [et al.] // Forestry Chronicle. 2008. Vol. 84. P. 807–826.

The role of lidar systems in fuel mapping / A. Ferraz, F. Bretar, S. Jacquemoud [et al.] // Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores de Coimbra INESC – Coimbra. Technical Report. 2009. No. 13. 37 p.

The use of airborne lidar to assess avian species diversity, density, and occurrence in a pine/aspen forest / R. Clawges, K. Vierling, L. Vierling [et al.] // Remote Sensing of Environment. 2008. Vol. 122. P. 2064–2073.

Thevenaz P., Unser M. Optimization of mutual information for multiresolution image registration // IEEE Transactions on Image Processing. 2000. Vol. 9. P. 2083–2099.

Thies M., Spoecker H. Evaluation and future prospects of terrestrial laser scanning for standardized forest inventories // *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2004. Vol. 36. P. 192–197.

Three-dimensional reconstruction of stems for assessment of taper, sweep and lean based on laser scanning of standing trees / M. Thies, N. Pfeifer, D. Winterhalder [et al.] // *Scandinavian Journal of Forest Research*. 2004. Vol. 19. P. 571–581.

Tiede D., Hochleitner G., Blaschke T. A full GIS-based workflow for tree identification and tree crown delineation using laser scanning // *Proceedings of CMRT 05, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2005. Vol. 36. P. 9–14.

Time for a plant structural economics spectrum // H. Verbeek, M. Bauters, T. Jackson [et al.] // *Frontiers in Global Change*. 2019. Vol. 2. Article 43.

Tkacheva A. A., Danilin I. M. The use of laser scanning data for modelling forest landscape scenes // *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*. 2017. Vol. 10. P. 727–740.

Towards a worldwide wood economics spectrum / J. Chave, D. Coomes, S. Jansen [et al.] // *Ecology Letters*. 2009. Vol. 12. P. 351–366.

Towards automated and operational forest inventories with T-LiDAR / A. Othmani, A. Piboule, M. Krebs [et al.] // *11th International Conference on LiDAR Applications for Assessing Forest Ecosystems (SilviLaser 2011)*, Hobart, Australia, 2011. P. 1–9.

Towards spatially explicit quantification of pre- and postfire fuels and fuel consumption from traditional and point cloud measurements / A. T. Hudak, A. Kato, B. C. Bright [et al.] // *Forest Science*. 2020. Vol. 66. P. 428–442.

Tree species classification from fused active hyperspectral reflectance and LIDAR measurements / E. Puttonen, J. Suomalainen, T. Hakala [et al.] // *Forest Ecology and Management*. 2010. Vol. 260. P. 1843–1852.

Tree species classification of individual trees in Sweden by combining high resolution laser data with high resolution near-infrared digital images / Å. Persson, J. Holmgren, U. Söderman [et al.] // *International Archives of Photogrammetry*. 2004. Vol. 36. P. 204–207.

Tree Species Classification Using Airborne LiDAR – Effects of Stand and Tree Parameters, Downsizing of Training Set, Intensity Normalization, and Sensor Type / I. Korpela, H. O. Ørka, M. Maltamo [et al.] // *Silva Fennica*. 2010. Vol. 44, Iss. 2. P. 319–339.

Tree species differentiation using intensity data derived from leaf-on and leaf-off airborne laser scanner data / S. Kim, R. J. McGaughey, H.-E. Andersen [et al.] // *Remote Sensing of Environment*. 2009. Vol. 113, Iss. 8. P. 1575–1586.

Tree species traits determine the success of LiDAR-based crown mapping in a mixed temperate forest / J. H. Hastings, S. V. Ollinger, A. P. Ouimette [et al.] // *Remote Sensing*. 2020. Vol. 12. Article 309.

Tuceryan M., Jain A. K. Texture analysis // The Handbook of Pattern Recognition and Computer Vision. 2nd ed. World Scientific Publishing Co., 1998. P. 207–248.

Two-level mixed-effects height to crown base model for moso bamboo (*Phyllostachys edulis*) in Eastern China / X. Zhou, Y. Zhou, X. Zhang [et al.] // Frontiers in Plant Science. 2023. Vol. 14. Article 1095126.

Ullman S. The interpretation of structure from motion (PDF) // Proceedings of the Royal Society of London. 1979. Vol. 203 (1153). P. 405–426.

Uncertainty in the spatial distribution of tropical forest biomass: a comparison of pan-tropical maps / E. T. A. Mitchard, S. S. Saatchi, A. Baccini [et al.] // Carbon Balance and Management. 2013. Vol. 8. Article 10.

Use of airborne LiDAR and aerial photography in the estimation of individual tree heights in forestry / J. C. Suárez, C. Ontiveros, S. Smith [et al.] // Computers & Geosciences. 2005. Vol. 31. P. 253–262.

Use of large-footprint scanning airborne lidar to estimate forest stand characteristics in the Western Cascades of Oregon / J. E. Means, S. A. Acker, D. J. Harding [et al.] // Remote Sensing of Environment. 1999. Vol. 67. P. 298–308.

Use of vegetation change tracker, spatial analysis, and random forest regression to assess the evolution of plantation stand age in Southeast China / J. Diao, T. Feng, M. Li [et al.] // Annals of Forest Science. 2020. Vol. 77, Iss. 2. Article 27.

Using a multistructural object-based lidar approach to estimate vascular plant richness in Mediterranean forests with complex structure / J. Lopatin, M. Galleguillos, F. E. Fassnacht [et al.] // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2015. Vol. 12. P. 1008–1012.

Using individual tree crown approach for forest volume extraction with aerial images and laser point clouds / J. Hyypä, T. Mielonen, H. Hyypä [et al.] // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2005. Vol. 36. Part 3. P. 144–149.

Using linear mixed model and dummy variable model approaches to construct compatible single-tree biomass equations at different scales – A case study for Masson pine in Southern China / L. Y. Fu, W. S. Zeng, S. Z. Tang [et al.] // Journal of Forest Science. 2012. Vol. 58, Iss. 3. P. 101–115.

Using terrestrial laser scanning to constrain forest ecosystem structure and functions in the Ecosystem Demography model (ED2.2) / F. Meunier, S. M. K. Moorthy, M. Peaucelle [et al.] // Geoscientific Model Development. 2022. Vol. 15. P. 4783–4803.

Using tree detection algorithms to predict stand sapwood area, basal area and stocking density in *Eucalyptus regnans* forest / D. Jaskierniak, G. Kuczera, R. J. Benyon [et al.] // Remote Sensing. 2015. Vol. 7. P. 7298–7323.

Usoltsev V. A., Shobairi O., Tsepordey I. S. Feedback modelling of natural stand and plantation biomass to changes in climatic factors (temperatures and

precipitation): A special case for two-needle pines in Eurasia // *Journal of Climate Change*. 2020. Vol. 6, Iss. 2. P. 15–32.

Valentine H. T., Ludlow A. R., Furnival G. M. Modeling crown rise in even-aged stands of Sitka spruce or loblolly pine // *Forest Ecology and Management*. 1994. Vol. 69. P. 189–197.

Validation of the ICESat vegetation product using crown-area-weighted mean height derived using crown delineation with discrete return lidar data / Y. Pang, M. Lefsky, H. E. Andersen [et al.] // *Canadian Journal of Remote Sensing*. 2008. Vol. 34. P. 471–484.

Valladares F., Niinemets U. The architecture of plant crowns: From design rules to light capture and performance // *Functional Plant Ecology*. Boca Raton : CRC Press, 2007. P. 101–150.

van Laar A., Akca A. Forest mensuration. Göttingen : Cuvillier Verlag, 1997. 418 p.

van Leeuwen M., Nieuwenhuis M. Retrieval of forest structural parameters using LiDAR remote sensing // *European Journal of Forest Research*. 2010. Vol. 129. P. 749–770.

van Wagner C. E. Conditions for the start and spread of crown fire // *Canadian Journal of Forest Research*. 1977. Vol. 7. P. 24–34.

Vauhkonen J. Estimating crown base height for Scots pine by means of the 3D geometry of airborne laser scanning data // *International Journal of Remote Sensing*. 2010. Vol. 31. P. 1213–1226.

Vazirabad Y. F., Karslioglu M. O. Lidar for biomass estimation // *Biomass – Detection, Production and Usage*. Canada : IntechOpen, 2011. P. 3–26.

Vepakomma U., St-Onge B., Kneeshaw D. Response of a boreal forest to canopy gap openings: Assessing vertical and horizontal tree growth with multi-temporal lidar data // *Ecological Applications*. 2011. Vol. 21. P. 99–121.

Vincent L., Soille P. Watersheds in digital spaces: An efficient algorithm based on immersion simulations // *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 1991. Vol. 13. P. 583–598.

Vosselman G. On the estimation of planimetric offsets in laser altimetry data // *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2002. Vol. 34. P. 375–380.

Wallace L., Lucieer A., Watson C. S. Evaluating tree detection and segmentation routines on very high resolution UAV LiDAR data // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2014. Vol. 52. P. 7619–7628.

Wang L., Gong P., Biging G. S. Individual tree-crown delineation and treetop detection in high-spatial-resolution aerial imagery // *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. 2004. Vol. 70. P. 351–357.

Wang Y., Weinacker H., Koch B. A lidar point cloud based procedure for vertical canopy structure analysis and 3D single tree modelling in forest // *Sensors*. 2008. Vol. 8. P. 3938–3951.

Wehr A., Lohr U. Airborne laser scanning – an introduction and overview // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 1999. Vol. 54. P. 68–82.

Weishampel J. F., Ranson K. J., Harding D. J. Remote sensing of forest canopies // *Selbyana*. 1996. Vol. 17. P. 6–14.

Weltz M. A., Ritchie J. C., Fox H. D. Comparison of laser and field measurements of vegetation height and canopy cover // *Water Resources Research*. 1994. Vol. 30. P. 1311–1319.

What do ecological regions tell us about wood quality? A case study in eastern Canadian white spruce / P. Lenz, M. Deslauriers, C.-H. Ung [et al.] // *Canadian Journal of Forest Research*. 2014. Vol. 44, Iss. 11. P. 1383–1393.

Willoughby J. Drone mapping with DJI Terra. 2023. URL: <https://www.heliguy.com/blogs/posts/dji-launch-dji-terra-drone-mapping-tool/> (date of accessed: 02.12.2025).

Wing M. G., Eklund A., Sessions J. Applying LiDAR technology for tree measurements in burned landscapes // *International Journal of Wildland Fire*. 2010. Vol. 19. P. 104–114.

Wolf B.-M., Heipke C. Automatic extraction and delineation of single trees from remote sensing data // *Machine Vision and Applications*. 2007. Vol. 18. P. 317–330.

Wright W. G. Investigation of taper as a factor in measurement of standing timber // *Journal of Forestry*. 1923. Vol. 21. P. 569–581.

Wynne R. H. Lidar remote sensing of forest resources at the scale of management // *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. 2006. Vol. 72. P. 1310–1314.

Xu L., Oja E. Randomized hough transform (RHT) – Basic mechanisms, algorithms, and computational complexities // *CVGIP-Image Understanding*. 1993. Vol. 57. P. 131–154.

Yao W., Krzystek P., Heurich M. Tree species classification and estimation of stem volume and DBH based on single tree extraction by exploiting airborne full-waveform LiDAR data // *Remote Sensing of Environment*. 2012. Vol. 123. P. 368–380.

Yin D., Wang L. How to assess the accuracy of the individual tree-based forest inventory derived from remotely sensed data: A review // *International Journal of Remote Sensing*. 2016. Vol. 37. P. 4521–4553.

Yin D., Wang L. Individual mangrove tree measurement using UAV-based LiDAR data: Possibilities and challenges // *Remote Sensing of Environment*. 2019. Vol. 223. P. 34–49.

Yoon J. S., Shin J. I., Lee K. S. Land cover characteristics of airborne LiDAR intensity data: A case study // *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. 2008. Vol. 9. P. 463–466.

Young B., Evans D. L., Parker R. C. Methods for comparison of lidar and field measurements of loblolly pine // Proceedings, Second International Conference on Geospatial Information in Agriculture and Forestry, Lake Buena Vista, Florida, 2000. P. 193–199.

Zeide B., Pfeifer P. Fractal dimension is used to characterized tree crown // Forest Science. 1991. Vol. 37. P. 1253–1265.

Zhao K., Popescu S., Nelson R. LiDAR remote sensing of forest biomass: A scale-invariant estimation approach using airborne lasers // Remote Sensing of Environment. 2009. Vol. 113. P. 182–196.

Zhen Z., Quackenbush L. J., Zhang L. Trends in automatic individual tree crown detection and delineation – Evolution of LiDAR data // Remote Sensing. 2016. Vol. 8. Article 333.

Научное издание

Усольцев Владимир Андреевич

ПРИМЕНЕНИЕ ЛИДАРОВ В ЛЕСНОЙ ТАКСАЦИИ

ISBN 978-5-94984-978-1



Редактор Н. Ф. Тофан
Оператор компьютерной верстки О. А. Казанцева

Подписано к использованию 02.04.2026.

Уч.-изд. л. 25. Объем 17 Мб.

Тираж 500 экз. (1-й завод 6 экз.).

Заказ №

ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет».
620100, Екатеринбург, Сибирский тракт, 37.
Редакционно-издательский отдел. Тел. 8 (343) 221-21-44.

Типография ООО «ИЗДАТЕЛЬСТВО УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ ЦЕНТР УПИ».
620062, РФ, Свердловская область, Екатеринбург, пер. Лобачевского, 1, оф. 15.
Тел.: 8 (343) 362-91-16.