

УДК 630*52

В.А. Усольцев

Уральский государственный лесотехнический университет,
Ботанический сад УрО РАН, г. Екатеринбург

ПЕРСПЕКТИВЫ 3D-МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ СТРУКТУРЫ ФИТОМАССЫ ЛЕСОВ



Дистанционные методы зондирования лесного покрова в виде крупномасштабной аэрофотосъемки давно используются при инвентаризации наших лесов (Самойлович, 1953, 1964; Моисеев, 1958). В связи с развивающимися возможностями аэрокосмического изучения Земли методы дистанционного зондирования лесного покрова, в том числе его вертикальной и горизонтальной структуры, получают все более широкое применение. Они позволяют отслеживать изменения в лесном покрове на больших территориях и в течение длительного времени с получением качественно новых результатов, существенно снижая трудоемкость работ (Барталев, 2005; Wulder et al., 2006; Лежнин и др., 2010; Лежнин, Полевщикова, 2011).

Дистанционное зондирование Земли с применением ГИС-технологий сегодня используется при оценке различных параметров лесных насаждений, в том числе структуры их фитомассы (Данилин и др., 1998; Усольцев, 1998; Goetz et al., 1999; Päivinen et al., 2001; Wulder et al., 2006; Черных, 2007; Лежнин и др., 2010; Лежнин, Полевщикова, 2011; Ivanova, Ovchinnikova, 2011). В зависимости от целевого назначения дистанционные методы различаются по разрешающей способности изображений, степени их генерализации, трудоемкости работ, скорости обработки данных и т.п.

Хотя использование панхроматических цифровых снимков со спутников Quick Bird-II дает разрешение до 0,6 м и IKONOS - до 1 м и по стоимости сопоставимо с традиционной крупномасштабной аэрофотосъемкой (Данилин, 2003), эти возможности в полной мере пока не реализуются. В частности, для оценки фитомассы лесного покрова используются данные MODIS/TERRA с разрешением до 1 км (Goetz et al., 1999; Zheng et al., 2007; Ivanova, Ovchinnikova, 2011).

Использование лазерных данных низкой плотности регистрации (примерно один лазерный импульс на 1 м²) обеспечивает оценку запаса стволовой древесины со среднеквадратической погрешностью 10-15% (Næsset et al., 2004; Holmgren, 2004). При лазерном сканировании лесопокрытой площади 5 тыс. га в Швеции среднеквадратическая погрешность на уровне насаждений составила при оценке запаса стволовой древесины 14, высоты полога 5 и среднего диаметра крон 9% (Holmgren, Jonsson, 2004; Olsson et al., 2007). При лазерном сканировании древесного полога определение стволового запаса древостоя по уравнению его связи с лазерной оценкой высоты древостоя объясняет 60% его варьирования, а по 2-факторному уравнению связи с лазерными оценками высоты и густоты древостоя – 76% (Watt et al., 2013).

Рассчитанные для лесов Урала (Усольцев, 1998) уравнения связи фитомассы сосновых, еловых, березовых и осиновых древостоев с их высотой показывают неоднозначные результаты в зависимости от оцениваемой фракции фитомассы: они объясняют изменчивость сухой массы стволов на 87, массы ветвей на 68-78 и массы листвы и хвои на 0,4-4,2%.

Для экспресс-оценки фитомассы лесных массивов на больших территориях представляет интерес использование радиолокационного зондирования бортовыми станциями бокового обзора (Першиков, Анферов, 1988; Монахов, Шубина, 1989; Жиров и др., 2001; Le Toan et al., 2004). Установлено, что между количеством фитомассы насаждения и оптической плотностью его радиолокационного изображения коэффициент корреляции находится в пределах от 0,84 до 0,89 (Жиров и др., 2001). Шведское агентство оборонных исследований и фирма Ericsson Microwave Systems разработали систему CARABAS, которая представляет собой уникальный бортовой радар с синтезированной апертурой - PCA (Hellsten et al., 1996) и работает с радарными волнами 3-15 м в диапазоне VHF (ОВЧ). Среднеквадратическая ошибка определения запаса древостоев системой CARABAS на уровне насаждений составляет 19-20% (Fransson et al., 2000; Magnusson, Fransson, 2004; Olsson et al., 2007), несколько меньшая ошибка (16%) получена путем совместного использования систем CARABAS и SPOT HRVIR (Magnusson, Fransson, 2004) и минимальная (12%) – путем совместного использования спутниковых данных SPOT-5 и лазерного зондирования (Fransson et al., 2004).

Использование снимков высокого разрешения со спутника ALOS (ALAV2A127092460) с соответствующей геопозиционной привязкой, а также с радиометрической, геометрической и атмосферной коррекцией и наземными определениями фитомассы на ключевых участках позволило с точностью 57-87% определить фитомассу сосновых и березовых молодняков на землях бывшего сельскохозяйственного пользования Марийского Заволжья на площади соответственно 15,3 и 3,4 тыс. га (Курбанов и др., 2010; Лежнин и др., 2010).

Методы лазерного зондирования лесного полога как эффективного средства контроля экологического состояния лесной растительности достигают сегодня высокой разрешающей способности (Данилин, 2003; Murphy et al., 2012). Лазерный импульс, испускаемый с бортового носителя, способен отражаться от нескольких объектов лесного профиля (основной полог, подлесок, живой напочвенный покров), когда один исходящий импульс может иметь несколько отражений (рис. 1).

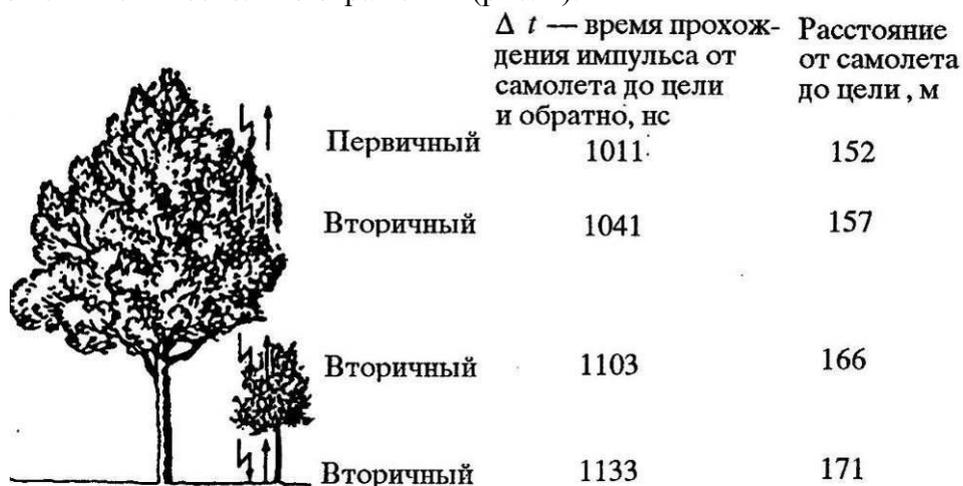


Рис. 1. Схема множественного отражения лазерного импульса от лесного полога высотой 18 м (Nelson et al., 1988).

Поскольку деревья разных древесных пород обладают специфичной конфигурацией вертикального профиля (рис. 2), эта специфика сегодня распознается с помощью лазерной техники, размещаемой на бортовых носителях.

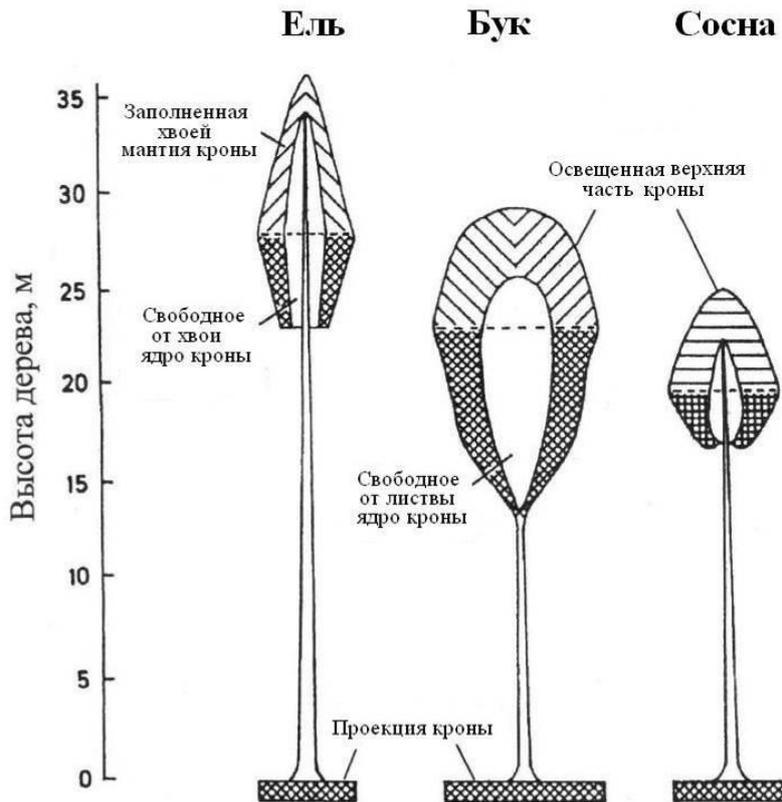


Рис. 2. Вертикальные профили архитектуры крон спелых деревьев трех пород (Усольцев, 2013а).

При множественной регистрации бортовым носителем отраженных лазерных импульсов по характеру группировки точек профиля (point clouds) и его очертанию можно с точностью 95% различать сосну, ель и мелколиственные породы (рис. 3). Сосна отличается от мелколиственной березы характерными сгущениями точек, а ель от прочих – формой кроны (Holmgren, Persson, 2004; Næsset et al., 2004).

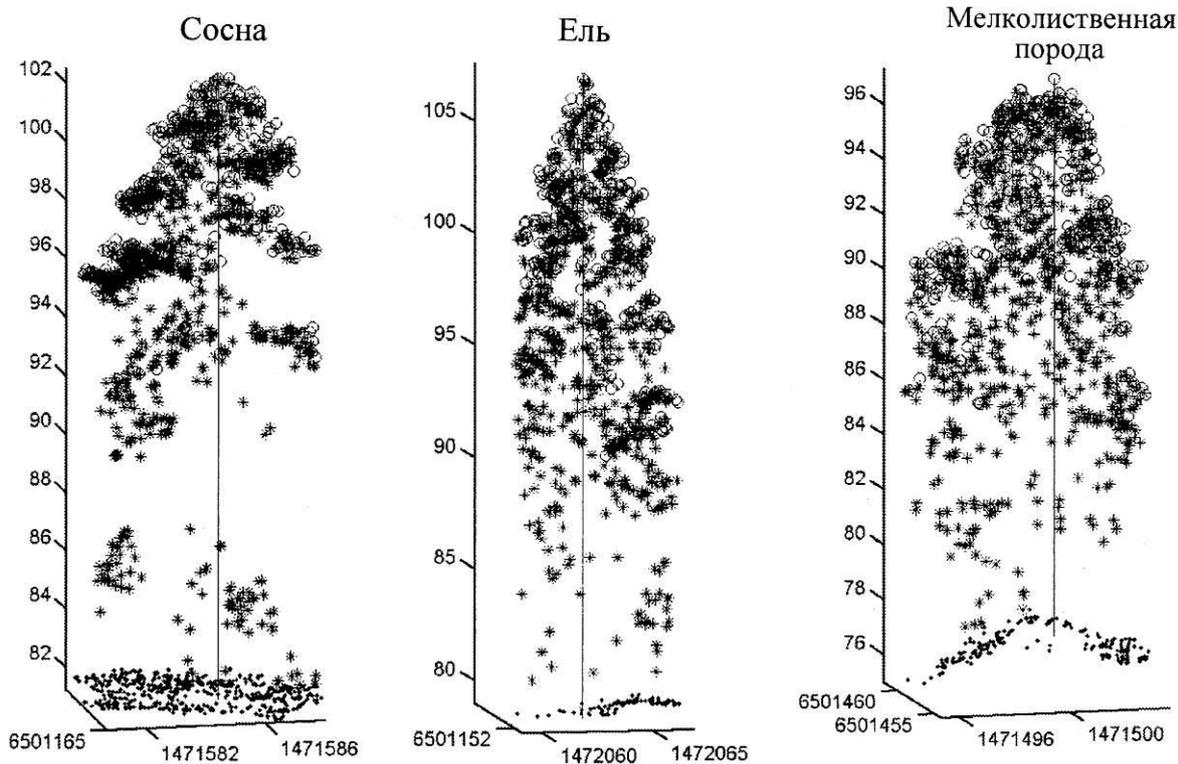


Рис. 3. Множественная регистрация бортовым носителем отраженных лазерных импульсов (laser points) формирует вертикальный профиль деревьев на примере трех древесных пород (Næsset et al., 2004).

По состоянию на 1990-е гг. нами был выполнен анализ становления и развития методов и техники лазерного зондирования земной поверхности, а также лазерной оценки массообразующих показателей, фитомассы и качественных характеристик лесного полога (Усольцев, 1998). В последние годы лазерная техника и возможности обработки результатов лазерного зондирования наземных объектов шагнули далеко вперед.

Один из современных подходов заключается в лазерном сканировании с плотностью, достаточной для получения множества лазерных импульсов на одно дерево (5 импульсов и более на 1 м^2) при использовании технологии видеопреобразователя для записи обратного сигнала с каждого импульса (Steinvall, 2003; Olsson et al., 2007).

Большие перспективы в этом направлении открываются при использовании беспилотных летательных аппаратов (Olsson et al., 2007). Сегодня развитие техники «беспилотников», или «дронов» (drones), происходит нарастающими темпами. Например, портативный дрон «eBee» («Эбби»), разработанный компанией «senseFly», весит всего 630 грамм, имеет модульную (разборную) конструкцию, размещается в обычном кейсе и легко транспортируется вручную (рис. 4). Он оснащен бортовой камерой высокого разрешения 16MP и может быть запущен прямо с рук. Маршрут и траектория движения задаются при помощи Google Maps. По окончании полета «Эбби» по намеченному курсу мягко планирует на землю, после чего его подключают к компьютеру для извлечения данных.



Рис. 4. Беспилотник «Эбби» в работе (слева) и в разобранном состоянии в кейсе (справа) (<http://the-clu.com/2013/01/13/6964/ebec2011-10-1522-31-20800>)

«Эбби» способен находиться в воздухе до 45 минут, осуществляя фотосъемку местности с разрешением до 3 см на один пиксел. Возможности 3-D картографирования были продемонстрированы в Швейцарских Альпах на высоте 3000 м. Швейцарская компания «senseFly» объединила усилия с «Drone Adventures» для создания реалистичной 3-D карты горы Маттерхорн (рис. 5). Несколько беспилотников «Эбби» смогли сделать оцифровку площади в 27 кв. километров менее, чем за один день.

Компания «Titan Aerospace» производит гигантский дрон Solara 50 с 50-метровым размахом крыльев, полностью покрытых солнечными батареями, и с беспроводной связью как многократно более дешевую альтернативу орбитальным спутникам (рис. 6). Он может летать вокруг Земли на высоте 20 км в течение 5 лет, приземляясь лишь на техническое обслуживание. Пока он служит в качестве базовой сотовой станции, заменяя более ста башен на земле, но после установки съемочного оборудования может быть использован для съемки земной поверхности (Liszewski, 2013).

Оборудованные специальной камерой беспилотные вертолеты (автокоптеры) сегодня картируют лесной полог (Pattu, 2013), давая возможность легко создавать интерактивные 3-D карты любого пейзажа (рис. 7). Подобных моделей сконструировано множество (рис. 8).

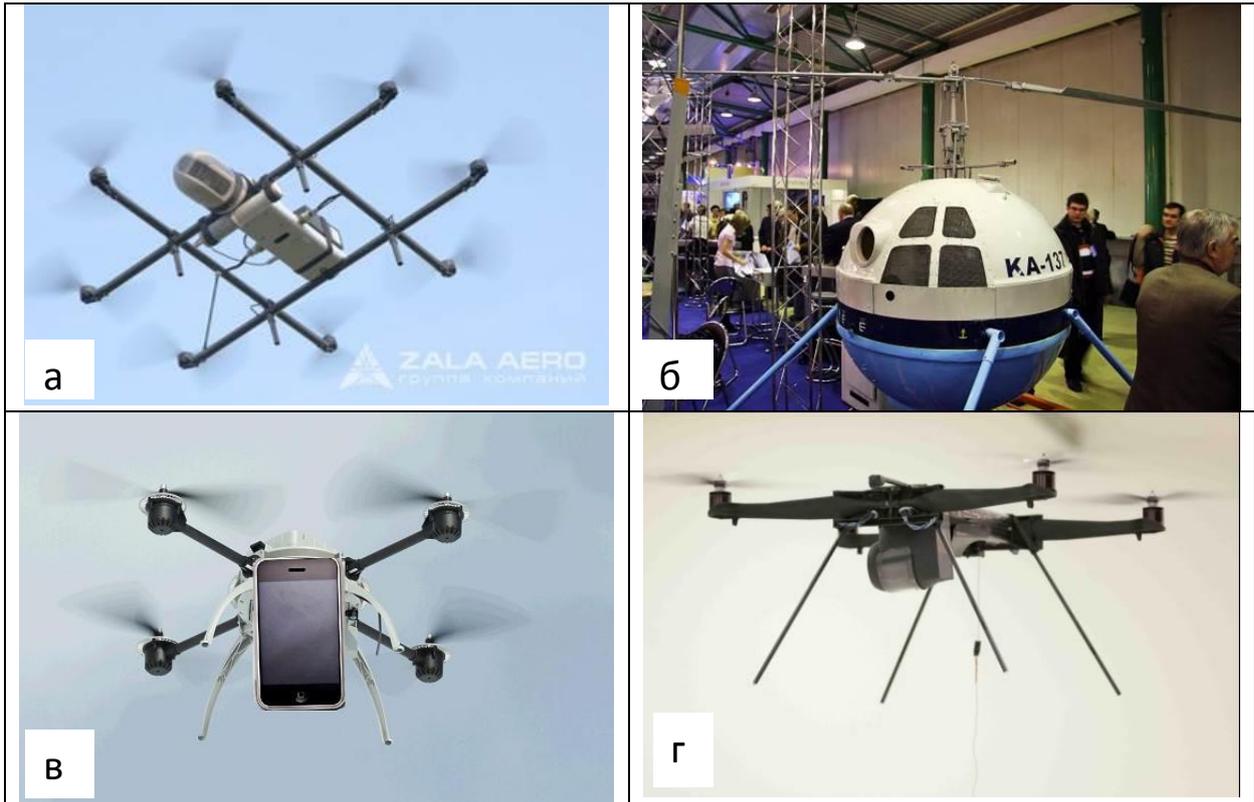


Рис. 8. Беспилотные вертолеты: (а) «ZALA 421-22», взлётная масса 8 кг (<http://zala.aero/category/production/bla/helicopters/>); (б) Ка-137. Многоцелевой беспилотник, взлетная масса 280 кг (<http://www.helicopter.su/enc/vertoleti/ka-137.html>); (в) «летающий смартфон» (<http://www.popsci.com/category/tags/uas>); (г) дрон PARC на силовом кабеле длиной 300 м с системой камер высокого разрешения (http://paranormal-news.ru/news/letajushhij_robot_shpion_sposoben_ostavatsja_v_vozdukke_vechno/2012-12-06-5788)

С развитием методической и технической базы аэрокосмического зондирования лесного покрова и методов экологического моделирования на ее основе выполняется параметризация архитектуры деревьев для разработки 3-D моделей отражательной и фильтрующей способности лесного полога (рис. 9 и 10).

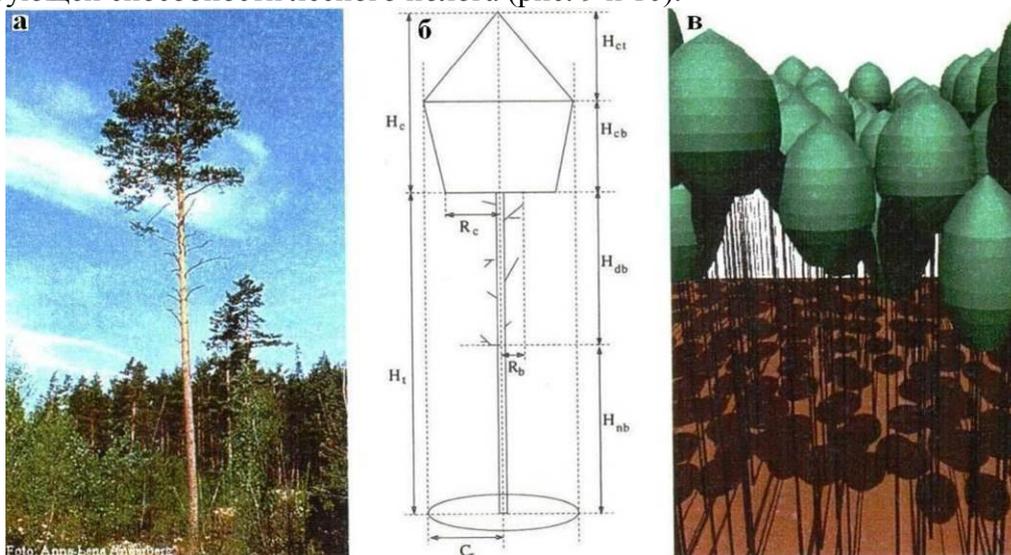


Рис. 9. Фотография спелого 20-метрового дерева сосны обыкновенной (а), его геометрическая модель (б) и 3-D визуализация древостоя (в) как основа моделирования с учетом его отражательной и фильтрующей характеристик (Widlowski et al., 2003).



Рис. 10. Пример 3-D «архитектурной» модели лесного полога (Widlowski et al., 2003).

Филиал ФГУП «Рослесинфорг»– «Севзаплеспроект» получает 3D модель лесного полога (от деревьев основного яруса до травяного покрова) при сверх-высоком разрешении 30 см с помощью уникального израильского фотограмметрического комплекса «A3 VisionMAP». Комплекс состоит из цифровой камеры, установленной на самолетах класса Ан-30 и Ту-134, и наземной системы автоматизированной обработки

данных (<http://vitusltd.ru/blog/lesozaschita/6781>). Съемка ведется с высоты 7-10 км.

На небольших участках леса для получения 3-D изображения лесного полога используется наземная система лазерного сканирования, которая состоит из лазерного сканера кругового обзора и полевого персонального компьютера со специализированным программным обеспечением. Точность сканирования в пределах 4 мм (<http://www.aspector.ru/Lazernye-skanery.htm>).

Лазерное зондирование лесного полога сегодня является составной частью новейших методов и технологий геоинформатики и цифровой фотограмметрии (рис. 11), которое по многим показателям превосходит не только другие, известные сегодня дистанционные методы изучения и измерения параметров лесного полога (Lefsky et al., 2002, 2005; Данилин, 2003; Lim, Treitz, 2004; Maltamo et al., 2004; Stone et al., 2012), но и методы наземной таксации (Næsset, 2002; Næsset et al., 2004). Современные лазерные дендрометры дают достаточно высокую точность также при наземном определении таксационных параметров лесного полога (Skovsgaard et al., 1998).

Принцип работы системы лазерного сканирования показан на рис. 11. Импульсно-периодический лазер ближнего инфракрасного диапазона оптически совмещен с диафрагмой антенны, которая сканирует лазерным лучом полосу местности, обычно поперек направления полета летательного аппарата, на котором установлен прибор (рис. 12).

Время отражения лазерного луча от земли и различных морфоструктурных элементов (фракций фитомассы) лесной растительности измеряется в глобальной системе позиционирования (Global Positioning System - GPS) и приводится к скорости света, составляющей порядка 30 см за одну наносекунду. По времени распространения импульсов света от лазера до отражающей поверхности и обратно (с точностью до 1 миллисекунды) расстояние от лазера до сканируемой поверхности определяется с точностью до 1 см. Положение летательного аппарата при каждом измерении фиксируется с помо-

щью GPS. Вращательные движения главного лепестка антенны определяются креном летательного аппарата, угол наклона и направление которого определяются бортовой инерциальной навигационной системой, и с ее помощью вычисляются расстояния от самолета до земли. После суммирования этих значений с текущим местоположением самолета находятся истинные координаты точек отражения на поверхности земли и лесной растительности (Данилин, 2003).

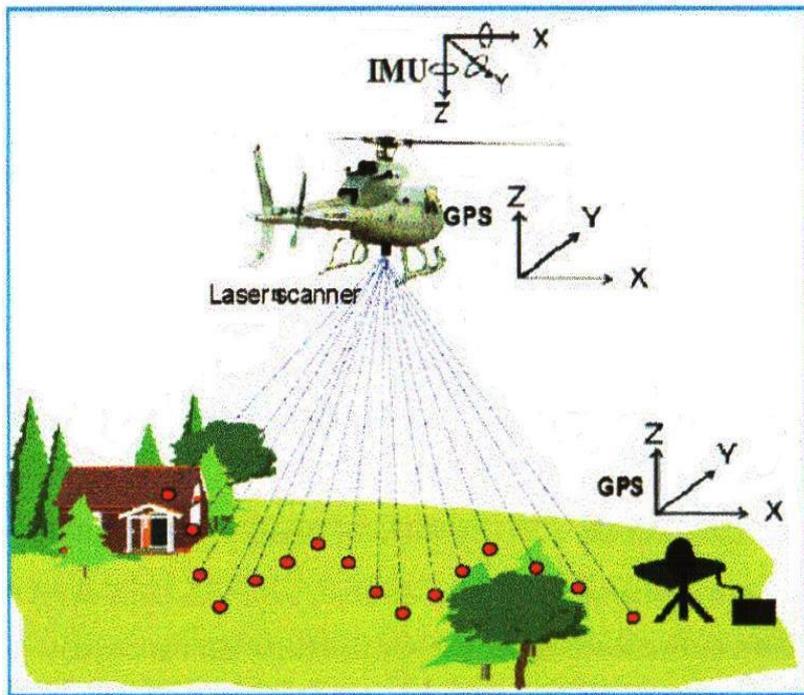


Рис. 11. Общая схема системы лазерного сканирования земной поверхности и лесного покрова (Данилин, 2003).

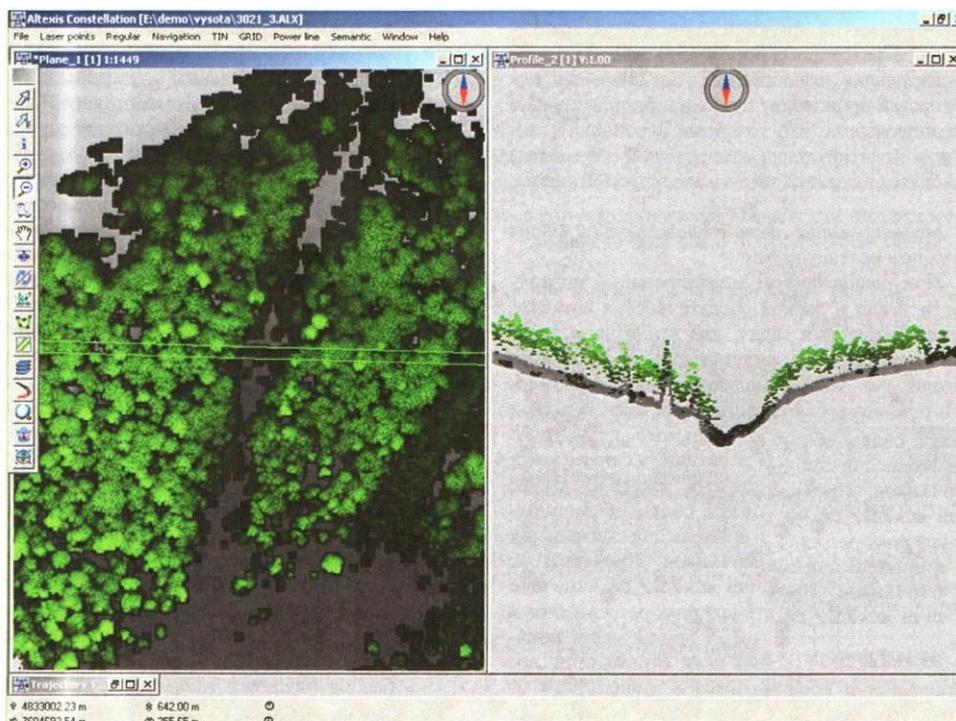


Рис. 12. Синтезированные лазерно-локационные изображения структуры лесного покрова и рельефа местности в формате представления лесорастительных и топографических данных программного комплекса Altexis 2.0 (Данилин, Фаворская, 2011).

Лазерное сканирование сопровождается синхронной цифровой видеосъемкой, обеспечивающей разрешение на местности 10-15 см с высоты 300 м при размере кадра 200 м вдоль и 100 м поперек направления полета. В результате в цифровом формате получают лазерную трехмерную фотографию древостоя и его плановое пространственное изображение высокой степени детализации (рис. 13, 14 и 15).

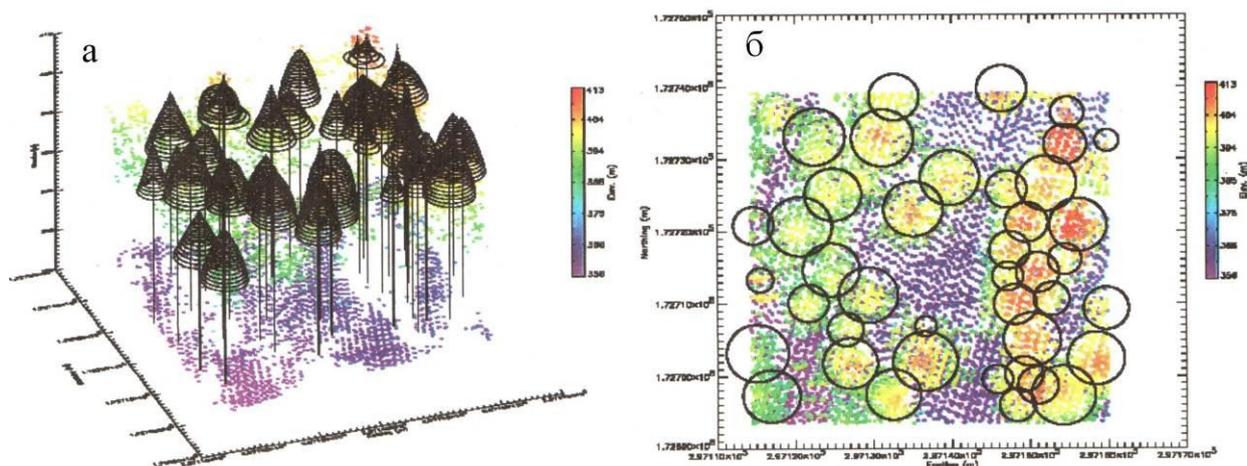


Рис. 13. Пример 3-D «архитектурной» модели лесного полога на участке площадью 0,4 га (а) и плановая проекция полога древостоя с оконтуренными кронами деревьев основного яруса (б) (Данилин и др., 2005).

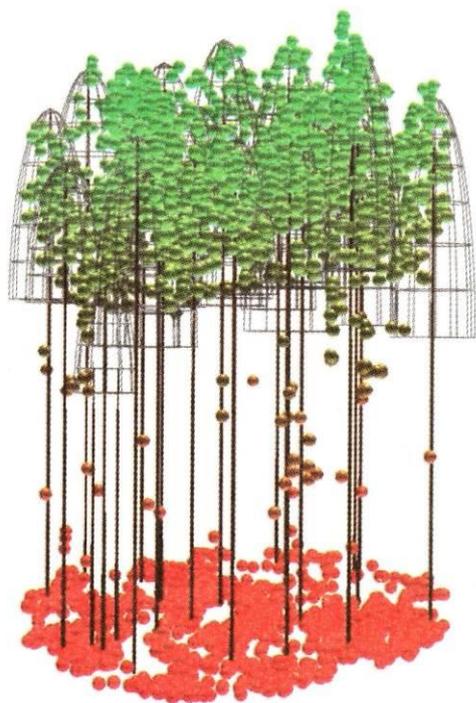


Рис. 14. Сочлененная 3-D реконструкция морфоструктуры лиственного древостоя по данным лазерной локации и по наземным измерениям (окрашено соответственно зеленым и красным цветом) (Данилин, Фаворская, 2011).

Для калибровки результатов современной аэрокосмической съемки и разработки цифровых 3-D моделей фитомассы лесного полога необходимы наземные данные о вертикально-фракционной структуре деревьев и древостоев, стратифицированные по ярусам и фракциям фитомассы. Однако сегодня физиками при исследовании структуры растительного покрова не учитывается вертикально-фракционная организация лесного полога, и она описывается с позиций теории «мутных сред» (Выгодская, Горшкова, 1987), рассматривается как пористая реакционноспособная (Гришин, 1981) либо как многофазная пористо-дисперсная среда (Бурасов, 2006), а при радиолокационном зондировании лесной полог рассматривается как случайная дискретная, анизотропная, дисперсионная либо как «плотноупакованная» среда (Magazinnikova, Yakubov, 1998; Якубов и др., 2002; Калинкевич и др., 2008; Атутов и др., 2007, 2009) (рис. 16).

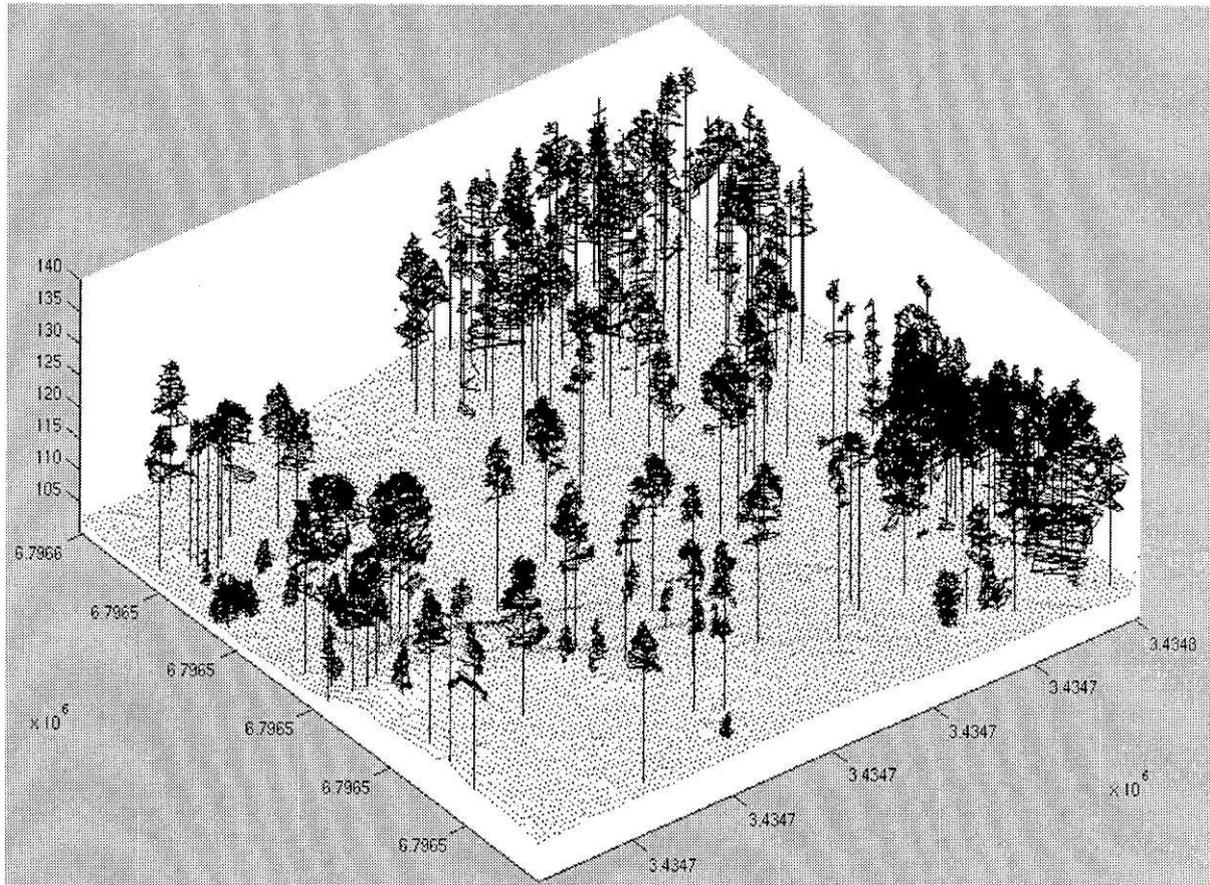


Рисунок 15. Трехмерная (3-D) реконструкция морфоструктуры древостоя по данным лазерной локации. По результатам наземных обмеров крон 50 деревьев установлено, что множественное лазерное сканирование дает более точную картину профиля лесного полога, по крайней мере, верхней его части, по сравнению с наземной съемкой (Puysalo, 2000).

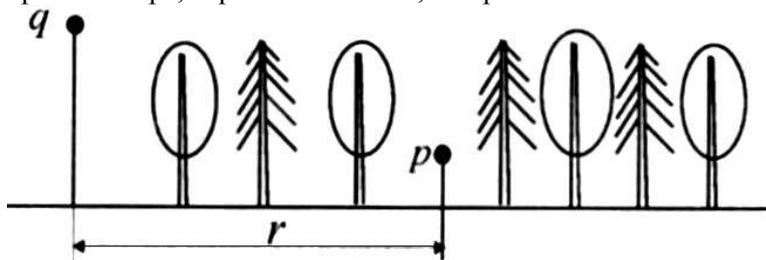


Рис. 16. Геометрия эксперимента по оценке ослабляющих свойств лесного покрова путем радиолокационного зондирования; q – полуволновой вибратор (передатчик радиоволн метрового диапазона); p – приемник сигнала; r – расстояние между передатчиком и приемником, на котором определяется степень ослабления поля лесным пологом (Атутов и др., 2009).

В двух последних монографиях (Усольцев, 2013а,б) автором предложен альтернативный подход, показана многофакторная природа горизонтальной и вертикальной структуры фитомассы деревьев, а также возможности и результаты ее описания методом регрессионного анализа с использованием базовых положений традиционной лесной таксации.

В первой из них (Усольцев, 2013а) исследованы типы горизонтальной структуры насаждений на материалах картирования 18 пробных площадей, заложенных в 20-40-летних естественных сосняках и 20-летних культурах сосны в степной зоне на территории Тургайского прогиба (Аман-Карагайский бор). В результате анализа горизонтального распределения деревьев на оцифрованных планах пробных площадей исследуемые сосняки распределены по трем типам горизонтальной структуры: групповому, смешанному (группово-случайному) и случайному. Преобладающий в возрасте 20 лет групповой тип распределения деревьев к возрасту 40 лет сменяется случайным. В культурах сосны рядовой посадки к возрасту 20 лет регулярный характер размещения деревьев нарушается, и они формируют групповой тип горизонтальной структуры.

<p style="text-align: center;"><i>В.А. Усольцев</i></p> <p style="text-align: center;">Продукционные показатели и конкурентные отношения деревьев. Исследование зависимостей</p>  <p style="text-align: center;"><i>Caring for the Forest: Research in a Changing World</i></p> <p style="text-align: center;">Код доступа: http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/2627</p>	<p style="text-align: center;"><i>В.А. Усольцев</i></p> <p style="text-align: center;">Вертикально-фракционная структура фитомассы деревьев. Исследование закономерностей</p>  <p style="text-align: center;"><i>Caring for the Forest: Research in a Changing World</i></p> <p style="text-align: center;">Код доступа: http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/2771</p>
---	---

Применение современных компьютерных программ Adobe Photoshop, AutoCAD и CorelDRAW к закартированным пробным площадям позволило в автоматизированном режиме выполнить большой комплекс вычислений 10 разных индексов конкуренции и распределить деревья-конкуренты по нескольким концентрическим зонам влияния относительно каждого из 72 центральных, или модельных деревьев в естественных сосняках и 69 – в культурах, у которых определена фракционная структура фитомассы дерева.

Предложен метод оценки степени влияния конкуренции на фитомассу дерева посредством расчета 5760 регрессионных моделей, включающих в качестве независимых переменных не только индекс конкуренции, но и основные таксационные показатели дерева – диаметр ствола и высоту. При увеличении радиуса влияния коэффициент детерминации регрессионных уравнений и уровень значимости индекса конкуренции вначале возрастают, а достигнув максимума, по мере дальнейшего удаления от центрального дерева снижаются. Оптимальный радиус влияния, установленный по величине коэффициента детерминации, в естественных сосняках зависит от типа распределения деревьев и составляет для группового (в 20 лет) и случайного (в 40 лет) распределений при регрессионной оценке надземной фитомассы соответственно 1,8 и 5,0 м. В 20-летних культурах сосны величина оптимального значения радиуса конкурентного влияния на точность оценки фитомассы дерева составляет 3,0-3,5 м. Поскольку культуры и естественные сосняки в возрасте 20 лет характеризуются одним и тем же (групповым) типом горизонтальной структуры, установленное их различие по величине оптимального радиуса влияния «соседей» на фитомассу объясняется меньшей густотой культур (3,2-8,6 тыс. экз/га) по сравнению с естественными сосняками (12,3-44,4 тыс. экз/га). Составлены таблицы для оценки фитомассы деревьев в естественных сосняках и культурах по трем входам – высоте дерева, диаметру ствола и величине индекса конкуренции при оптимальном расстоянии от центрального дерева.

Во второй монографии (Усольцев. 2013б) на основе методов весовой таксации фракционного состава фитомассы и современных методов многофакторного регрессионного анализа установлено, что вертикально-фракционное распределение фитомассы

деревьев не является инвариантным. Разработаны статистически значимые регрессионные модели вертикального распределения кумулятивной (нарастающей в направлении сверху вниз) фитомассы хвои и скелета ветвей по 1-метровым слоям кроны дерева в связи с возрастом и таксационными показателями деревьев и древостоев. Сравнение естественных сосняков и культур показало наличие общих трендов для тех и других: кумулятивная фитомасса равноудаленных от пня мутовок увеличивается по мере увеличения возраста дерева, а у равновозрастных деревьев она повышается по мере улучшения добротности местообитания. Однако в числовом выражении закономерности в естественных сосняках и культурах различаются в несколько раз.

Многофакторный регрессионный анализ распределения по вертикальному профилю кроны ее фитонасыщенности, характеризующей степень «локационной прозрачности» и эффективности использования пространства роста, показал, что названное распределение также не является инвариантным. Установлено, что фитонасыщенность кроны в естественных сосняках снижается по высотному градиенту в направлении от ее вершины к основанию; при равном удалении от пня она снижается с возрастом, а у равновозрастных деревьев она снижается по мере улучшения добротности местообитания, и эти же закономерности характерны для культур сосны в тех же условиях. Однако количественные характеристики названной закономерности в естественных сосняках и культурах различаются в несколько раз.

Общая фитонасыщенность хвои среднего дерева в естественных сосняках снижается с 0,7-0,8 кг/м³ в возрасте 13 лет до 0,2-0,3 кг/м³ в возрасте 110 лет, а в культурах сосны соответственно с 1,0-1,2 кг/м³ в 9 лет до 0,1-0,3 кг/м³ в 50 лет. При одном и том же возрасте увеличение фитонасыщенности хвои пропорционально диаметру ствола в древостое на всем исследованном возрастном интервале. При формировании как естественных сосняков, так и культур сосны наиболее эффективно используют пространство роста деревья-лидеры.

Предложено два метода регрессионного анализа вертикально-фракционного распределения массы корней. В результате установлены закономерности ее изменения по вертикальному профилю в связи с таксационными показателями деревьев. Оказалось, что модель, построенная с соблюдением статистической корректности (соблюдение нормальности распределения остатков по Гошу, введение поправок Финни на логарифмирование, использование критерия Акайке), но не учитывающая возраст дерева, дает 27%-ное смещение результатов, а модель, рассчитанная без акцентирования на статистической корректности, но с учетом возраста дает смещение, меньшее в 3 раза. По-видимому, важно обеспечение корректности не столько статистической процедуры модели, сколько ее структуры на основе предварительного содержательного анализа (Лиёпа, 1980), который в многофакторном пассивном эксперименте трудно поддается формализации.

Предложенные результаты исследования горизонтальной структуры сосновых древостоев, с одной стороны (Усольцев, 2013а), и подеревные многофакторные регрессионные зависимости и закономерности вертикально-фракционного распределения фитомассы деревьев в надземной и подземной сферах на тех же пробных площадях (Усольцев, 2013б) вкуче с 3-D моделями архитектуры и морфологии полога (см. рис. 13 - 15), с другой стороны, а также материалы сплошного перечета деревьев на пробных площадях создают возможность 3-D моделирования вертикально-фракционного распределения фитомассы на уровне древостоя.

Для калибровки данных аэро- и космической съемки фитомассы деревьев и насаждений и 3-D моделирования структуры их фитомассы на ее основе необходимы данные непосредственных измерений деревьев на пробных площадях. Все необходимые для этого исходные данные могут быть взяты в приложениях двух упомянутых монографий (Усольцев, 2013а, б). В частности, приведены оцифрованные планы горизонтальных проекций кроны на 18 пробных площадях, результаты обмера и картирования 2684 деревьев на них, фактические данные надземной фитомассы и таксационных

показателей 122 модельных (центральных) деревьев, данные распределения фитомассы корней по градациям их толщины и глубине проникновения в почвогрунт у 27 модельных деревьев, фактические данные фитомассы 360 модельных деревьев, взятых по ступеням толщины на 36 пробных площадях, результаты измерений фитомассы и линейных размеров 4192 мутовок по вертикальному профилю крон, фактические показатели содержания сухого вещества в хвое (323 определения) и ветвях (160 определений), а также содержания сухого вещества и плотности в древесине и коре стволов (2884 определения) и, наконец, ведомости перечета деревьев по ступеням толщины на 36 пробных площадях.

Известно, что количество имитационных моделей растительных сообществ примерно соответствует числу модельеров, т.е. каждый приступающий к моделированию такого объекта на дедуктивном уровне имеет свою концепцию моделирования, в какой-то степени альтернативную, но чаще – «улучшенную». Примерно то же происходит при разработке моделей на индуктивном уровне, когда аналитик идет не от концепции, а от эксперимента. Любой результат в науке – относителен. Во второй из упомянутых монографий (Усольцев, 2013 б) показано, как на основе одного и того же эмпирического материала можно получить разные эмпирические модели с разными характеристиками их адекватности. Точно так же приведенные в двух книгах результаты регрессионного анализа пространственной структуры фитомассы лесного полога и составленные на основе регрессионных моделей справочно-нормативные таблицы представляют собой реализацию лишь одного авторского подхода из бесчисленного множества иных (см., например: Севко, Коцан, 2011, 2012). Фактический материал, приведенный в приложениях двух книг, уникален как по количеству заложенных пробных площадей, так и по степени детальности выполненных измерений пространственной структуры фитомассы деревьев и древостоев сосны естественного и искусственного происхождения.

Опубликованная в двух книгах база исходных данных послужит основой для разработки методик, а также для верификации и валидации будущими энтузиастами продвинутых имитационных 3-D моделей структуры фитомассы лесных сообществ, и им не придется сталкиваться с обычной в таких случаях проблемой нехватки эмпирической информации, на что сетовал в свое время Ю.М. Свирежев (1981), и выполнять повторно весь комплекс выполненных автором этих книг измерений или какой-то их части.

Список использованной литературы

Атутов Е.Б., Ломухин Ю.Л. Среднее поле в лесной среде // Радиотехника и электроника. 2007. Т. 52, № 11. С. 1360-1366.

Атутов Е.Б., Дагуров П.Н., Ломухин Ю.Л. Ослабляющие свойства лесного покрова // III Всероссийская конференция «Радиолокация и радиосвязь». Ин-т радиоэлектроники РАН. 26-30 октября 2009. С. 536-540 (<http://jre.cplire.ru/jre/library/3conference/pdf/p001.pdf>).

Барталев С.А. Валидация результатов выявления и оценки площадей поврежденных пожарами лесов по данным спутникового мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. М.: ИКИ РАН, 2005. С. 343-353.

Бурасов Д.М. Математическое моделирование низовых лесных и степных пожаров и их экологических последствий: Автореф. дис. ...канд. ф.-м. наук. Томск: ТГУ, 2006. 17 с.

Выгодская Н.Н., Горшкова И.И. Теория и эксперимент в дистанционных исследованиях растительности. М.: Гидрометеиздат, 1987. 248 с.

Гришин А.М. Математические модели лесных пожаров. Томск: Изд-во Томского ун-та, 1981. 278 с.

Данилин И.М. Морфологическая структура, продуктивность и дистанционные методы таксации древостоев Сибири: Автореф. дис. ... докт. С.-х. наук. Красноярск: СибГТУ, 2003. 35 с.

Данилин И.М., Медведев Е.М., Мельников С.Р. Лазерная локация Земли и леса: Учеб. Пособие. Красноярск: Ин-т леса СО РАН, 2005. 182 с.

Данилин И.М., Фаворская М.Н. Моделирование структуры лесного покрова и рельефа местности по данным лазерной локации // Лесная таксация и лесоустройство. 2011. № 1-2 (45-46). С. 40-47.

Данилин И.М., Черкашин В.П., Михайлова И.А. Компьютерное картографирование и дистанционное зондирование в геоинформационных системах: Учеб. Пособие. Красноярск: СибГТУ, 1998. 98 с.

Жиров А.И., Монахов А.К., Шубина М.А. Оценка фитомассы высокопродуктивных сосновых насаждений по материалам радиолокационной съемки // Лесной журнал. 2001. № 4. С. 132-134.

Калинкевич А.А., Манаков В.Ю., Арманд Н.А., Крылова М.С. О механизме обратного рассеяния электромагнитных волн сосновым лесом в метровом диапазоне длин волн // Радиотехника и электроника. 2008. Т. 53. № 10. С.1223-1235.

Курбанов Э.А., Лежнин С.А., Александрова Т.Л., Валиуллина Р.Р. Оценка фитомассы молодняков сосны Вятско-Марийского вала по спутниковым снимкам // Лесные экосистемы в условиях изменения климата: биологическая продуктивность, мониторинг и адаптационные технологии: Матер. Междунар. Конф. Йошкар-Ола: МарГТУ, 2010. С. 143-147.

Лежнин С.А., Незамаев С.А., Новокшонова Е.В., Комарова И.В. Оценка фитомассы молодняков березы Заволжской песчаной низменности по спутниковым снимкам // Лесные экосистемы в условиях изменения климата: биологическая продуктивность, мониторинг и адаптационные технологии: Матер. Междунар. Конф. Йошкар-Ола: МарГТУ, 2010. С. 168 -173.

Лежнин С.А., Полевщикова Ю.А. Динамика спектральных характеристик лесного покрова молодняков Марийского Заволжья по спутниковым снимкам // Лесные экосистемы в условиях изменения климата: биологическая продуктивность и дистанционный мониторинг: Матер. Междунар. Семинара. Йошкар-Ола: МарГТУ, 2011. С. 19-23.

Лиела И.Я. Динамика древесных запасов: прогнозирование и экология. Рига: Зинатне, 1980. 170 с.

Моисеев В.С. Применение измерительного дешифрирования в лесном хозяйстве. М.:Л.: Гослесбумиздат, 1958. 30 с.

Монахов А.К., Шубина М.А. Зависимость радиолокационного изображения лесов от их строения // Лесное хоз-во. 1989. № 4. С. 41-42.

Першиков В.П., Анферов В.М. Радиолокационное зондирование лесных территорий с борта вертолета Ми-8 // Аэрокосмический мониторинг лесных ресурсов зоны интенсивного ведения лесного хозяйства. Львов, 1988. С. 84.

Самойлович Г. Г. Применение аэрофотосъемки и авиации в лесном хозяйстве. М.-Л.: Гослесбумиздат, 1953. 476 с.

Самойлович Г.Г. Применение аэрофотосъемки и авиации в лесном хозяйстве. 2-е изд. М.: Лесная пром-сть, 1964. 485 с.

Свирижев Ю.М. Моделирование окружающей среды и проблема недостатка информации // Математические модели в экологии и генетике. М.: Наука, 1981. С. 17-22.

Севко О.А., Коцан В.В. Методика создания цифровой модели пространственного распределения деревьев по материалам постоянных пробных площадей с использованием ГИС-технологий // Труды Белорусского государственного технологического университета (Минск). 2011. № 1: Лесное хозяйство. С. 53-57.

Севко О.А., Коцан В.В. Оценка влияния пространственной структуры на таксационные показатели древостоев с использованием цифровой модели пространственно-

го распределения деревьев // Труды Белорусского государственного технологического университета (Минск). 2012. № 1: Лесное хозяйство. С. 57-59.

Усольцев В.А. Формирование банков данных о фитомассе лесов. Екатеринбург: УрО РАН, 1998. 541с.

Усольцев В.А. Продукционные показатели и конкурентные отношения деревьев. Исследование зависимостей. Екатеринбург: УГЛТУ, 2013а. 560 с.

(<http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/2627>).

Усольцев В.А. Вертикально-фракционная структура фитомассы деревьев. Исследование закономерностей. Екатеринбург: УГЛТУ, 2013б. 603 с.

(<http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/2771>).

Черных В.Л. Геоинформационные системы в лесном хозяйстве. Йошкар-Ола: МарГТУ, 2007. 200 с.

Якубов В.П., Тельпуховский Е.Д., Цепелев Г.М., Миронов В.Л., Кашкин В.Б. Сверхширокополосное зондирование лесного полога // Журнал радиоэлектроники. 2002. № 10 (<http://jre.cplire.ru/alt/oct02/2/text.html>).

Fransson J.E.S., Walter F., Ulander L.M.H. Estimation of forest parameters using CARABAS-II VHF SAR data // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2000. Vol. 38. P. 720-727.

Fransson J.E.S., Magnusson M., Holmgren J. Estimation of forest stem volume using optical SPOT-5 satellite and laser data in combination // Proceedings of IGARSS 2004 Symposium, Science for Society. Anchorage, Alaska, 2004. 5 pages (DVD-ROM).

Goetz S., Prince S., Goward S., Thawley M., Small J. Satellite remote sensing of primary production: an improved production efficiency modeling approach // Ecological Modelling. 1999. Vol. 122. P. 239-255.

Hellsten H., Ulander L.M.H., Gustavsson A., Larsson B. Development of VHF CARABAS II SAR // G.S. Ustach (ed.), SPIE. 1996. Vol. 2747. Radar Sensor Technology. P. 48-60.

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. P. 543-553.

Holmgren J., Jonsson T. Large scale airborne laser scanning of forest resources in Sweden // Proceedings of the ISPRS working group VIII/2, Laser-Scanners for Forest and Landscape Assessments, Freiburg, Germany, 2004-10-03 to 2004-10-06. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2004. Vol. 36. Part 8/W2. P. 157-160.

Holmgren J., Persson Å. Identifying species of individual trees using airborne laser scanning // Remote Sens. Environ. 2004. Vol. 90. P. 415-423.

Ivanova Y., Ovchinnikova N.F. Comparison of forest ecosystems NPP in West Sayan Mountains with remote sensing and ground observation data // Boreal Forests in a Changing World: Challenges and Needs for Actions. Proceedings of 15th IBFRA International Science Conference. August 15-21 2011. Krasnoyarsk: Sukachev Institute of Forest SB RAS. 2011. P. 319-322.

Le Toan T., Quegan S., Woodward I., Lomas M., Delbart N., Picard G. Relating radar remote sensing of biomass to modeling of forest carbon budgets // Climatic Change. 2004. Vol. 67. P. 379-402.

Lefsky M.A., Cohen W.B., Harding D.J. et al. Lidar remote sensing of aboveground biomass in three biomes // Global Ecol. & Biogeogr. 2002. Vol. 11. No. 5. P. 393-400.

Lefsky M.A., Turner D.P., Guzy M., Cohen W.B. Combining lidar estimates of aboveground biomass and Landsat estimates of stand age for spatially extensive validation of modeled forest productivity // Remote Sens. Environ. 2005. Vol. 95. No. 4. P. 549-558.

Lim K.S., Treitz P.M. Estimation of aboveground biomass from airborne discrete return laser scanner data using canopy-based quantile estimators // Scand. J. For. Res. 2004. Vol. 19. No. 6. P. 558-570.

- Liszewski A. These solar-powered giant winged drones could replace satellites // Gizmodo. 2013. August 21 (<http://gizmodo.com/these-solar-powered-giant-winged-drones-could-replace-s-1178053714#>).
- Magazinnikova A.L., Yakubov V.P. Attenuation of coherent radiation in forest regions // Microwave and Optical Technology Letters. 1998. Vol.19. No. 2. P. 164-168.
- Magnusson M., Fransson J.E.S. Combining airborne CARABAS-II VHF SAR data and optical SPOT-4 satellite data for estimation of forest stem volume // Canadian Journal of Remote Sensing. 2004. Vol. 30. P. 661-670.
- Maltamo M., Eerikainen K., Pitkänen J. et al. Estimation of timber volume and stem density based on scanning laser altimetry and expected tree size distribution functions // Remote Sens. Environ. 2004. Vol. 90. No. 3. P. 319-330.
- Murphy G. Evaluation of an occlusion adjustment model for predicting hidden stems when using terrestrial laser scans in natural and plantation forests in Australia and USA // New Zealand Journal of Forestry Science. 2012. Vol. 42. P. 57-63.
- Næsset E. Predicting forest stand characteristics with airborne scanning laser using a practical two-stage procedure and field data // Remote Sensing of Environment. 2002. Vol. 80. No. 1. P. 88-99.
- Næsset E., Gobakken T., Holmgren J., Hyypä H. et al. Laser scanning of forest resources: the Nordic experience // Scandinavian Journal of Forest Research. 2004. Vol. 19. P. 482-489.
- 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. No. 10. P. 31-38.
- Olsson H., Egberth M., Engberg J., Fransson J.E.S. et al. Current and emerging operational uses of remote sensing in Swedish forestry // McRoberts R.E., Reams G.A., Van Deusen P.C., McWilliams W.H. (eds.). Proceedings of the XVIIth annual forest inventory and analysis symposium; October 3-6, 2005; Portland, ME. Gen. Tech. Rep. WO-77. Washington, DC: U.S. Department of Agriculture, Forest Service. 2007. P. 39-46.
- Päivinen R., Lehtikoinen M., Schuck A. et al. Combining earth observation data and forest statistics. European Forest Institute and JRC: Italy, 2001. 101 pp.
- Parry W. Camera-equipped autocoverters map forest treetops // Scientific American. 2013, October 31 (<http://www.scientificamerican.com/article.cfm?id=camera-equipped-autocoverters-map-forest-treetops>).
- Pyysalo U. A method to create a three-dimensional forest model from laser scanner data // Photogramm. J. Finland. 2000. Vol. 17. P. 34-42.
- Skovsgaard J.P., Johannsen V.K., Vanclay J.K. Accuracy and precision of two laser dendrometers // Forestry. 1998. Vol. 71. No 2. P. 131-139.
- Steinvall O. Laser systems for vegetation and terrain mapping – a look at present and future technologies and capabilities // Proceedings from ScandLaser Scientific Workshop on airborne laser scanning of forests, held in Umeå, Sweden, September 3-4. Swedish University of Agricultural Sciences, Department of forest resource management and geomatics. 2003. Working Paper 112. P. 9-20.
- Stone C., Penman T., Turner R. Determining an optimal model for processing lidar data at the plot level: results for a *Pinus radiata* plantation in New South Wales, Australia // New Zealand Journal of Forestry Science. 2012. Vol. 42. P. 191-205 (<http://www.scionresearch.com/general/publications/nzjfs>).
- Watt M.S., Adams T., Marshall H., Pont D., Lee J., Crawley D., Watt P. Modelling variation in *Pinus radiata* stem volume and outerwood stress-wave velocity from LiDAR metrics // New Zealand Journal of Forestry Science. 2013. Vol. 43. No. 1. P. 1-7. (doi:10.1186/1179-5395-43-1 (<http://www.nzjforestryscience.com/content/pdf/1179-5395-43-1.pdf>)).
- Widlowski J.-L., Verstraete M., Pinty B., Gobron N. Allometric relationships of selected European tree species: Parametrizations of tree architecture for the purpose of 3-D can-

opy reflectance models used in the interpretation of remote sensing data. European Commission, Joint Research Centre. 2003. TP 440, I-21020. Ispra (VA), Italy. 61 pp.

Wulder M.A., White J.C., Fournier R.A., Luther J.E., Magnussen S. Spatially explicit large area biomass estimation; three approaches using forest inventory and remotely sensed imagery in a GIS // *Sensors*. 2006. Vol. 8. P. 529-560.

Zheng D., Heath L.S., Ducey M.J. Forest biomass estimated from MODIS and FIA data in the Lake States: MN, WI, and MI, USA // *Forestry*. 2007. Vol. 80. P. 265-278.

Рецензент статьи: проректор по научной работе УГЛТУ, доктор с.-х. наук, профессор С.В. Залесов