

УДК 629.78; 630.52:587/588

*И.М. ДАНИЛИН**Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН**Е. М. МЕДВЕДЕВ**Компания «Геокосмос», Москва**Н.И. АБЭ**Университет Ниигата, Япония**А.Т. ХУДАК**Исследовательская станция Скалистых гор**Лесной службы США, Айдахо, США**Б. САНКТ-ОНГЕ**Университет Квебека, Монреаль, Канада*

ВЫСОКИЕ ТЕХНОЛОГИИ XXI ВЕКА ДЛЯ АЭРОКОСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА И ТАКСАЦИИ ЛЕСОВ. ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

Состояние вопроса и научные проблемы, требующие разрешения

В последние годы лазерное зондирование, являющееся составной частью новейших методов и технологий геоинформатики и цифровой фотограмметрии, все шире используется для визуализации и моделирования различных объектов, создания трехмерных моделей инженерных сооружений, линий электропередач, топографической съемки и, в том числе, мониторинга лесных территорий [4, 5, 7, 11, 16, 24, 29, 33, 35].

Вместе с тем, эффективные алгоритмы фильтрации колоссального количества (десятки и сотни миллиардов) получаемых лазерных сигналов, представленных в облаке точек отраженных импульсов, и достоверная классификация и сегментация сканируемых объектов в мире нигде пока еще не разработаны. Методы построения цифровых моделей местности (ЦММ) лесных территорий и определения по ним лесотаксационных показателей на сегодняшний день не унифицированы, различны в разных странах и у разных авторов, отличаются существенным разнообразием подходов, используемого программно-математического аппарата и эффективностью решений [3, 9, 13, 15, 17-19, 21-23, 25, 28, 32, 34, 36, 37].

Результаты наших исследований в данной области позволили разработать устойчивый и достоверный метод фильтрации и классификации данных авиационного лазерного зондирования при цифровой топографической съемке, основанный на аллометрии параметров лесного полога и автоматизированном дешифрировании изображений («лазерных портретов») лесных насаждений с использованием подходов математической морфологии, оперирующей понятиями теории множеств и нечетких множеств, теории информации, распознавания образов и вероятности, а также основываясь на современных достижениях в обработ-

ке изображений, цифровой фотограмметрии и трехмерной компьютерной графики.

Предлагаемые методические решения не уступают мировому уровню, а в применении методов и алгоритмов трехмерного моделирования структуры, динамики и биомассы леса по данным лазерного зондирования являются пионерными, способствующими более глубокому пониманию многообразных и сложных процессов строения и формирования лесного покрова на обширных пространствах Сибири и бореальной зовы планеты в целом [1, 4, 8, 10].

Алгоритм рассматривается для статистически достоверной выборки участков леса с высокой плотностью, минимальным размером 20×20 м (эталонные «ключи» для обучающей выборки). Достоверно классифицируются плановые (вырубки, гари, шелкопрядники, водные поверхности и пр.) участки поверхности и профильные (насаждения, древостои, отдельно стоящие деревья, инженерные объекты и сооружения) участки, которые интерполируются с использованием топографической и математической процедуры обработки данных в программной оболочке Altexis [8].

При лазерном сканировании оценка запасов древесины и фитомассы леса в каждом конкретном случае сводится к установлению базовых закономерностей изучаемого объекта и определению соотношений между объемами стволов, фитомассой, высотой и диаметрами стволов и крон, которые, в свою очередь, составляют 87-99 % объясненной изменчивости различных фракций фитомассы (стволов деревьев, скелета крон и хвои) и объемов стволовой древесины.

Существует потребность в детальном изучении огромного потенциала использования при мониторинге лесов Интерференционных Радаров с Синтетической Апертурой (ИРСА), прежде всего - с целью определения статических и динамических характеристик лесных

горючих материалов на больших территориях при относительно не больших материальных и финансовых затратах и при любых погодных условиях [2, 6, 26].

Выдвигается гипотеза, что информация, полученная с помощью ИРСА, может быть непосредственно связана с пирологическими параметрами лесного полога, которые, в свою очередь, являются критическими входными данными для разрабатываемых математических моделей развития и поведения лесных пожаров. Кроме того, установлено, что интенсивность обратного рассеяния в радарных изображениях связана с влажностью листвы - другой переменной, которая также имеет большое значение в моделировании лесных пожаров.

Наше исследование направлено на разработку объективных, достоверных и высокоточных дистанционных методов мониторинга лесного покрова и алгоритмов определения биомассы леса, тесно связанных с проведением комплексных теоретических исследований механизмов взаимодействия высокочастотного импульсного лазерного и радарного излучений с дисперсными структурами лесного полога, что является основой для статистической лесоинвентаризации и применения эффективных цифровых методов дистанционного зондирования и, прежде всего, в обширных регионах Сибири, где лесоинвентаризацией охвачена только часть территории, а повторность ее крайне недостаточна, и получение таких данных традиционными методами практически невозможно.

Главной фундаментальной задачей в рамках проблемы, на решение которой направлено исследование, является разработка, развитие и тестирование методов воздушного лазерного сканирования, съемок интерференционными радарами с синтетической апертурой (ИРСА), аэро- и космических снимков высокого и сверхвысокого (субметрового) разрешения при лесозоологическом мониторинге, лесоинвентаризации и специализированном тематическом картографировании на больших территориях на региональном уровне и уровне совокупностей (участков) лесных насаждений, главным образом - с целью определения следующих важнейших характеристик лесного покрова:

1. рельеф, величина уклонов местности, экспозиция,
2. соотношение древесных пород,
3. средняя высота древостоя,
4. густота, полнота древостоя и сумма поперечных сечений стволов деревьев,
5. возрастная структура по классам возраста древостоев,

6. тип и продуктивность почвенных условий,

7. площадь крон и их сомкнутость,

8. объем и весовые характеристики (биомасса) древостоев и насаждений ($\text{м}^3/\text{га}$, $\text{т}/\text{га}$),

9. границы участков леса.

Предыдущими исследованиями были выявлены полезность и возможности использования лазеров с малым диаметром пятна рассеяния сигнала для получения информации, имеющей отношение к типам, условиям, количественным и пространственным характеристикам структурных компонентов и биомассы леса, в том числе - горючих веществ в лесном пологе (в кроновой части) [9, 10, 12, 14, 16-20, 23, 27, 30, 31].

Стоимость лазерного сканирования в течение ряда лет имеет стойкую тенденцию к снижению, что уже сегодня позволяет предложить эффективную альтернативу традиционным наземным лесным измерениям (биометрии) и получения достоверных и точных данных для моделирования развития и распространения лесных пожаров. Ожидается, что стоимость получения таких данных лазерным методом будет составлять порядка 1 доллара США за 1 га, что делает его конкурентоспособным по сравнению с существующими традиционными методами дистанционного зондирования (к примеру - с аналоговой аэрофото съемкой) и значительно менее дорогостоящим по сравнению с наземными измерениями на пробных площадях и при маршрутной таксации.

Вместе с тем, являясь оптическим сканером, лазер имеет некоторые ограничения как источник получения геопространственных данных на обширных лесных территориях. В частности, лазерный импульс не способен проникать через плотные облака, поэтому, так как лазерное сканирование является зависимым от погодных условий, данное обстоятельство нужно учитывать при получении данных в режиме реального времени при неблагоприятных состояниях атмосферы. Напротив, датчики, работающие в микроволновом диапазоне электромагнитного спектра, типа радара, не имеют подобных ограничений, хотя отличаются от лазеров более низким пространственным разрешением получаемых изображений структуры леса.

Мы предлагаем интегрировать лазерную трехмерную геометрию и радарную информацию интенсивности обратного рассеяния, получаемую ИРСА, с физическими характеристиками растительности лесного полога. С этой целью используются статистические и логические методы для оценки параметров, имеющих отношение к различным слоям растительности, включая глубину их распространения и плот-

ность: Физические характеристики плотности крон деревьев и древостоев для заданного размера ячейки (кластера) определяются непосредственно по данным ИПСА, а также других пространственных данных для моделирования распространения лесных пожаров в кронах деревьев. Результаты этого радарного анализа сравниваются с оценками переменных поведения огня в кронах, с данными, полученными оптическими датчиками и устройствами (лазерная, цифровая аэро- и спутниковая съемка) и традиционными наземными методами измерений в полевых условиях.

С экономической точки зрения получение радарных данных на обширных пространствах бореальной зоны будет значительно эффективнее и ниже по стоимости по сравнению с другими методами и технологиями дистанционного зондирования леса, включая лазерное сканирование. Сбор радарных данных может осуществляться с самолетных платформ на относительно больших высотах (6000-12000 м), что позволяет покрывать значительные по площади территории за короткий промежуток времени (3600-7200 км²/час), в любое время суток и при любых погодных условиях и облачности.

Исходя из сказанного выше, радарный метод имеет существенные преимущества по сравнению с оптическими системами дистанционного зондирования в тех случаях, когда сбор данных в режиме реального времени производится при неблагоприятных атмосферных условиях, таких как облачность или задымленность.

Методологические аспекты использования лазерных сканеров, интерференционных радаров с синтетической апертурой и цифровых аэро- и космических снимков высокого и сверхвысокого (субметрового) разрешения являются критическими с точки зрения точной и объективной оценки структуры и биомассы лесов. В рамках выполнения настоящего исследования практически задействованы и протестированы для целей дистанционного лесоэкологического мониторинга и лесоинвентаризации такие бортовые системы авиационного лазерного сканирования, как - ALTM-2050/3100 (Ortech Inc.), TopoSys FALCON, ALS-50 (Leica), бортовые воздушные интерференционные радары с синтетической апертурой IFSAR и SAR PALSAR (NASDA), цифровая трехлинейчатая аэрофотокамера ADS-40 (Leica), а также спутниковые снимки субметрового разрешения, полученные в системах Ikonos, Quick-Bird-II, Ресурс-ДК1 и др.

Другие специфические задачи, решаемые в рамках настоящего исследования:

- Извлечение характеристик лесного покрова посредством интегрированного использования данных лазерного сканирования, радарных, цифровых аэро- и космических снимков субметрового разрешения и данных участковой статистической лесоинвентаризации и картографирования.
- Оценка точностных и стоимостных параметров, преимуществ и недостатков синергетического использования лазерного сканирования, радарных, цифровых аэро- и космических снимков.
- Сравнение метода с другими источниками получения данных дистанционного зондирования.
- Оценка результатов исследований и метода потенциальными пользователями.
- Демонстрация метода правительственным организациям, ведомствам и частным компаниям.

Методы исследований

С целью реализации поставленных задач запланированы следующие мероприятия и используются следующие методы и подходы:

Пользовательские требования:

В связи с тем, что требования по точности оценки структурных элементов лесного покрова и потребности в получении биометрических параметров различны в разных странах, представляется целесообразным получить и детально проанализировать эту информацию в начальной стадии выполнения исследования

Сбор и получение исходных данных:

Подобраны и оформлены испытательные участки и полигоны, достоверно репрезентирующие разнообразие доминирующих типов лесной растительности в Сибири, Канаде, США и Японии с большим перспективным практическим (рыночным) потенциалом для лесоэкологического мониторинга и лесоинвентаризации и заинтересованностью конечных пользователей.

Для того, чтобы подтвердить эффективность и точность метода интегрированного использования данных лазерного сканирования, радарных, цифровых аэро- и космических снимков субметрового разрешения Для крупномасштабной статистической лесоинвентаризации и мониторинга, требуется выполнение полевых лесотаксационных работ и измерений высокой точности и достоверности. Точность таких лесотаксационных работ должна быть на порядок выше, чем точность, достигаемая при типичной инвентаризации лесных насаждений. Часть данных будет использоваться для обучения и калибровки, а другая - для валидации и проверки

качества новой системы. На некоторых испытательных участках уже имеются кондиционные лесотаксационные данные (пробные площади, базы данных измерений модельных деревьев), которые используются для обучения, калибровки и контроля качества дешифрирования данных дистанционного зондирования.

Создание геоинформационной базы данных, включающей информацию о лесных насаждениях и их местонахождении и данные дистанционного зондирования:

Данные лазерного и радарного сканирования представляются в виде геотрансформированной (введенной в систему реальных географических координат) базы данных и цифровой фотокарты, совместимых в форматах с системами автоматизированного проектирования (САПР) и с основными геоинформационными системами - ArcView, ArcINFO, MapINFO и т. д. В таких системах данные лазерной локации обычно используются для последующей специализированной постобработки. Данные сканирования импортируются в оболочку ГИС в виде растровых и векторных слоев. Предыдущий базовый слой включает цифровую модель земной поверхности (ЦМЗП) и лесной растительности (ЦМР) в виде сетки, наряду с автоматически геокодированными цифровыми аэро- и космическими снимками и отсканированными в растровом формате топографическими картами местности; последний слой включает дешифрированные (распознанные) в полуавтоматическом режиме различные объекты, такие как участки леса, дороги, водные поверхности, здания, сооружения и т. д.

Выполняется подбор спутниковых снимков высокого разрешения и доступных данных космической съемки в системах LANDSAT ETM+, IRS, PERSYPC, а также систем нового поколения, таких как: QuickBird-II, IKONOS, PERSYPC ДК-1, EARLYBIRD, ORBVVIEW-3, RADARSAT, ALOS, ADEOS и др.

Подготовка и процедуры лазерного и радарного сканирования и цифровой аэросъемки выполняются, по меньшей мере, в четырех группах наиболее представленных ландшафтов и лесных территорий (по принципу репрезентативности ландшафтного и биологического разнообразия лесных экосистем), в широтном градиенте в Сибири - вдоль Енисейского меридиана, от границы с Монголией - до арктических тундр и побережья Северного Ледовитого Океана. В каждой ландшафтной группе съемкой покрывается территория не менее 150 км².

Исследование данных спутниковой съемки:

- Предварительная обработка данных (геометрическая и радиометрическая коррекция).

- Классификация по параметрам лесного покрова с использованием существующих методов обработки данных, основываясь на спектральных сигнатурах и текстурных характеристиках изображений.

- Верификация результатов классификации.

Исследование данных лазерного сканирования:

- Применение существующих статистических методов для оптимизации и достоверного разделения «первичных» и «вторичных» лазерных импульсов, основываясь на исходных данных сканирования.

- Расчет параметров трехмерных моделей кроновых структур и древостоев на основе исходных «первичных» импульсов.

- Расчет параметров трехмерных моделей кроновых структур и древостоев на основе исходных «вторичных» импульсов.

- Интерполяция исходных данных сканирования.

- Разработка эффективных алгоритмов сегментации и сепарации деревьев и древостоев и их структурных элементов.

- Расчет лесотаксационных показателей по данным лазерного сканирования.

- Верификация результатов математического моделирования на координатных пробных площадях и тестовых участках.

Синергетическое использование различных типов сенсоров:

- Интегрирование результатов классификации лазерного сканирования, радарной и цифровой воздушной и спутниковой съемки.

- Изучение методических и технологических преимуществ и недостатков синергетического использования различных типов сенсоров.

- Лабораторное моделирование и визуализация операционных возможностей перспективных приборов и инструментов дистанционного зондирования для целей лесозоологического мониторинга и лесной таксации, на примере таких систем, как: ALTM, FALCON, ADS, ALS, RSAL, Pi-SAR, ADEOS.

Контроль качества работы системы:

- Оценка стоимостных показателей разработанного метода в сравнении с существующими методами таксации и мониторинга леса, с целью содействия процессу принятия решений органами и структурами управления лесами, природопользователями и частными компаниями по использованию нового подхода и его дальнейшего совершенствования.

- Оценка возможностей полноценной замены традиционных подходов и способов наземных полевых измерений и мониторинга,

инновационными методами и технологиями дистанционного зондирования.

- Оценка полученных результатов конечными пользователями.

Результаты и обсуждение

В течение подготовки и развития настоящего исследования была выполнена необходимая предварительная экспериментальная работа: проведены полеты и получены данные авиационного лазерного и радарного сканирования, спутниковые снимки, собраны необходимые полевые материалы на наземных полигонах и пробных площадях. В настоящее время обработка полученных на трансектах данных полевых исследований в основном закончена и требуется уточнение некоторых пространственных и биометрических параметров лесных экосистем районов работ.

Выполнены тематическая обработка и дешифрирование спутниковых снимков, полученных в системах Ресурс, IRS-1D/LISS-3, LANDSAT и IKONOS на районы исследований (рис. 1, 2).

С точки зрения конечных результатов исследования, относительно высокая стоимость спутниковых снимков сверхвысокого разрешения IKONOS и QuickBird-II (порядка \$2.500-5.000 за одну сцену, размером 11×11 км и 16×16 км соответственно) на сегодняшний день является существенным ограничивающим фактором для их использования в системе дистанционного мониторинга и таксации леса. Значи-

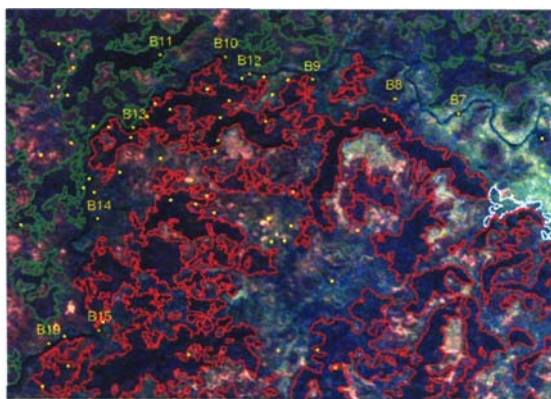
тельно больший интерес с точки зрения перспективного и эффективного использования разрабатываемой методики, на наш взгляд, представляют бортовые системы воздушного лазерного и радарного сканирования, интегрированные с цифровой аэросъемкой.

Лазерное сканирование лесного покрова выполнено с использованием бортовых комплексов ALTM-1020/2050/3100 на полигонах в Красноярском и Хабаровском краях, Ханты-Мансийском и Ямало-Ненецком автономных округах, в Якутии, Канаде, США и Японии, на общей площади около 3000 км².

В течение развития методики изучались и апробировались различные подходы при обработке данных авиационного лазерного сканирования. Можно считать, что базовые методические и технологические элементы, необходимые при зондировании леса лазерными сканерами, разработаны.

Лазерное сканирование в целом обеспечивает получение облака точек с известными координатами - x , y , z . Данное облако точек является основой для построения цифровой модели земной поверхности (ЦМЗП), которая включает точки земли, точки растительности и точки, отраженные от зданий и сооружений. При обработке данных и классификации (разделении) точек земли и растительности, становится возможным построение цифровой модели земной поверхности и цифровой модели растительности (ЦМР) (рис. 3, 4).

Сегментом между ЦМР и ЦМЗП является цифровая модель высотной структуры сово-



р. Бахта 15.09.2000 г. М 1 : 500 000

- 15 Сибирские северотаежные лиственнично-елово-кедровые леса, местами в сочетании со сфагновыми болотами
- 16 Сибирские среднетаежные елово-пихово-кедровые леса, местами в сочетании со сфагновыми болотами и березняками
- * 17 Локализация наземных пробных площадей и снимков высокого (1 м) разрешения

Рис. 1. Спутниковый снимок РЕСУРС МСУ-Э среднего (45 м) разрешения лазерного транsekта в Красноярском крае (63-64° с. ш., 89-91° в. д.), классифицированный по преобладающим типам лесного покрова методом максимального подоби



Рис. 2. Карманный компьютер Compaq iPAQ PocketPC для работы со спутниковыми изображениями IKONOS на координатных пробных площадях

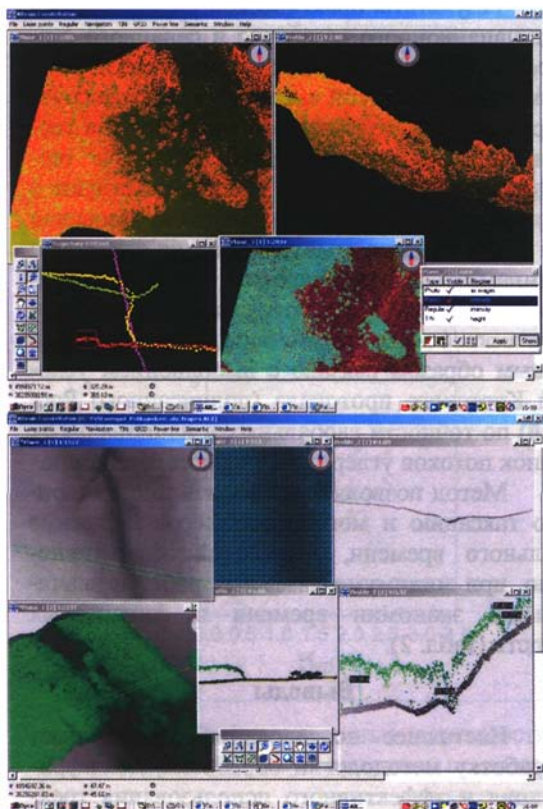


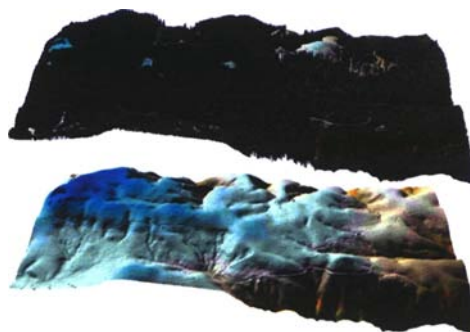
Рис. 3. Визуализация лазерно-локационных данных, выделение коридоров и измерение параметров лесной растительности в плановой и профильной проекциях Altaxis 2.0

купности деревьев и древостоя (ЦМД), которая представляет собой основной базовый элемент лазерного сканирования леса. Цифровая модель древостоя служит основой для получения основных морфометрических параметров деревьев и их совокупностей с использованием статистических методов.

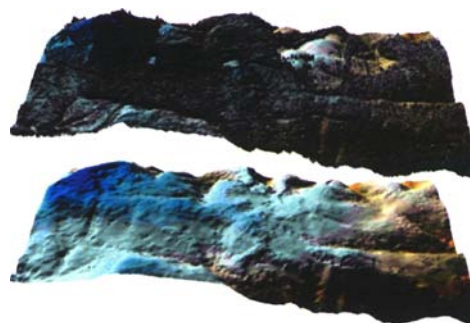
Предлагаемый нами метод обеспечивает детальную сегментацию модели высоты дерева и древостоя в отдельные части деревьев (крона, отдельные ветви, ствол), которые в последующем используются для точной биометрической оценки, как отдельных деревьев, так и древостоев в целом (рис. 5).

Как было установлено исследованиями, точность определения ЦМЗП по данным лазерного сканирования, изменяется в пределах от 15 см до 1 м, в зависимости от угла наклона рельефа. Вместе с тем, для построения модели высоты древостоя (ЦМД) - это более чем адекватный показатель. Отдельные деревья в бореальной зоне могут быть измерены с точностью порядка 10-15 см при частоте импульсного сканирования 30КГц и выше.

Выявлено, что при точном определении высоты деревьев определяющими факторами являются частота сканирования и густота (про-



а)



б)

Рис. 4. Цифровая модель земной поверхности на основе автоматизированной классификации лазерных (а) и радарных (б) импульсов, отраженных от поверхности лесного полога (5×10^5 первый отраженный сигнал, верхнее фото, б) - X-диапазон) и земли (2.7×10^5 последний отраженный сигнал, нижнее фото, «очищенное» от лесной растительности, б) - P-диапазон) на тестовом участке Капитол Форест, штат Вашингтон ($46^{\circ}56' - 46^{\circ}57'$ с. ш., $124^{\circ}38' - 124^{\circ}40'$ з.д.)

(Credit: Ward Carson, USDA Forest Service)

ницаемость) лесного полога. В бореальной зоне на покрытых лесом территориях в большинстве случаев существуют прогалы в лесном пологе. К примеру, на лазерных трансектах в Красноярском крае и в Якутии более 30 % лазерных импульсов первого порядка («first pulse data») отражаются и фиксируются непосредственно от земли без какого-либо взаимодействия с лесным пологом. При увеличении частоты сканирования до 50-100 КГц становится возможным получение детальных морфометрических параметров отдельных деревьев и промежутков между ними.

Полученные результаты показывают высокие корреляции и соответствия между лазерными измерениями и наземной биометрией структурных и весовых компонентов лесных насаждений, выполненной на координатных пробных площадях (высота древостоя - $R^2 = 0.98$; высота основания кроны - $R^2 = 0.87$; сомкнутость полога - $R^2 = 0.85$; фитомасса дре-

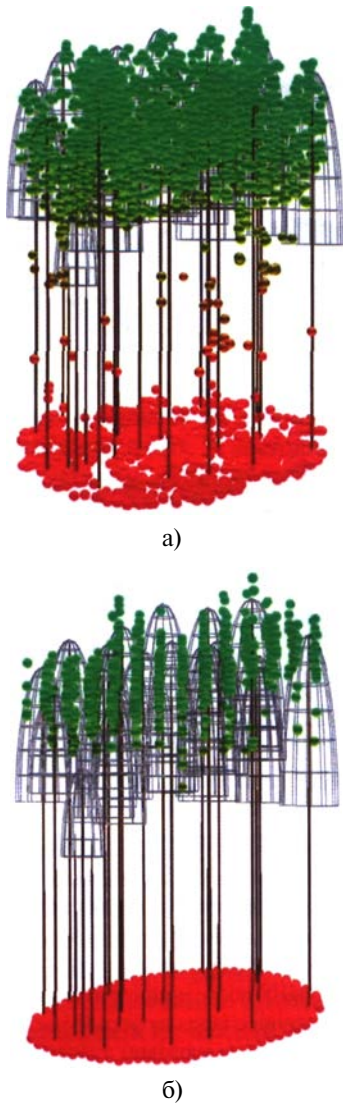


Рис. 5. «Сочлененная» реконструкция морфологической структуры лиственничного древостоя по данным лазерного (а) и радарного (б) сканирования (точки, окрашенные зеленым и красным цветом) и наземным измерениям на координатной пробной площади ($63^{\circ}34'08''$ с. ш., $90^{\circ}47'15''$ в. д.)

востоя и кроновой части - $R^2 = 0.87-0.98$) (рис. 6, 7).

Были получены следующие стандартные ошибки при определении средней высоты, суммы площадей поперечных сечений стволов, объемов стволов и их биомассы по данным авиационного лазерного зондирования - 3 %, 9 %, 7-10 % и 5-10 %, соответственно.

В целом, точность лазерных определений биометрических и таксационных показателей деревьев и древостоев с использованием аллометрических функций оказалась выше, чем при традиционных наземных лесоинвентаризационных работах (табл. 1).

Результаты практической апробации метода авиационного лазерного и радарного сканирования леса в сочетании с цифровой аэро- и космической съемкой высокого и сверхвысокого разрешения, спутниковой навигацией и геопозиционированием, интегрированных в геоинформационных системах, свидетельствуют о высокой перспективности его использования для целей анализа и моделирования структуры и динамики лесного покрова, статистической лесоинвентаризации и оперативного лесоэкологического мониторинга бореальной зоны, что тесным образом связано с выполнением условий Киотского протокола (подписанного Россией) по точности глобальных и национальных оценок потоков углерода в экосистемах Земли.

Метод позволяет проводить дистанционную таксацию и мониторинг лесов в режиме реального времени, с высокой эффективностью, при минимуме наземных работ и значительной экономии времени и финансовых средств (табл. 2).

Выводы

Настоящее исследование обеспечивает разработку методологии обработки, дешифрирования и эффективного использования трехмерных данных дистанционного зондирования высокого и сверхвысокого разрешения в системе мониторинга лесного покрова, касающихся закономерностей пространственного распределения структурных компонентов и биомассы лесных экосистем и, в том числе, динамики растительных горючих материалов. Ожидается, что развитие данной методологии позволит создавать достоверные и высокоточные лесные карты и базы данных различного тематического содержания, которые найдут применение в различных сферах использования, включая оперативный мониторинг природных экосистем, стратегическое и тактическое планирование лесо- и природопользования, объективную оценку параметров состояния и динамики лесных насаждений, включая их биомассу, моделирование развития и распространения катастрофических лесных пожаров и оценку различных природных рисков.

Исследование будет способствовать получению новых знаний и выявлению закономерностей структурно-функциональной организации и биологической продуктивности лесных экосистем бореальной зоны и окажет существенное воздействие на развитие различных областей науки и новых технологий. Полученные результаты послужат основой для развития принципиально новой методологии и технологии дистанционного зондирования лесного по-

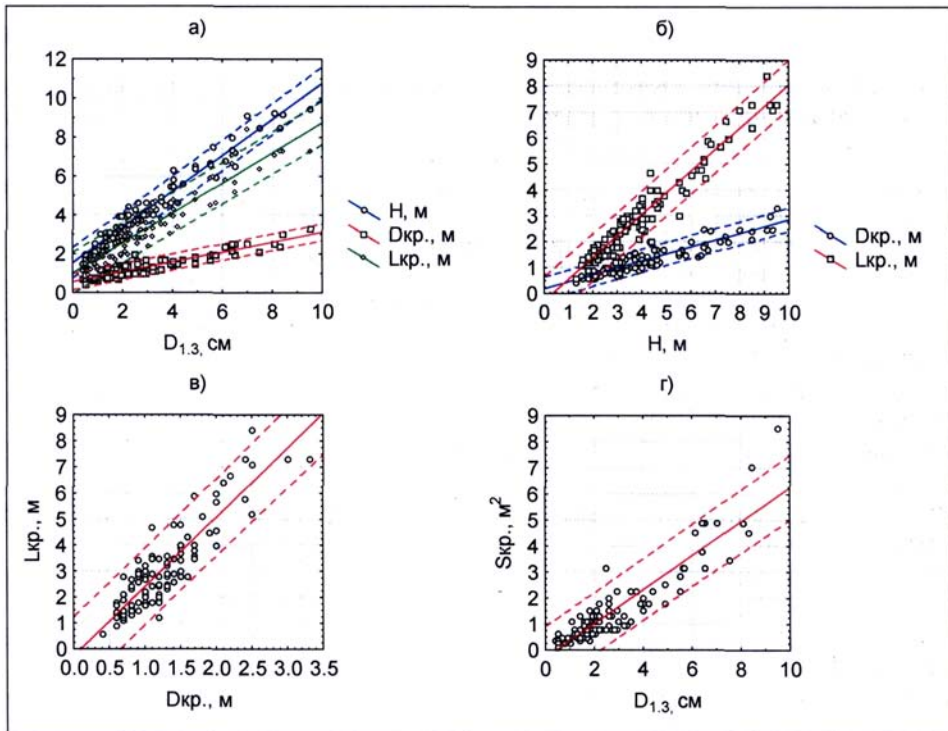


Рис. 6. Парные линейные зависимости между морфометрическими показателями деревьев лиственницы, полученные по лазерно-локационным данным и наземным измерениям на координатных пробных площадях:

а) - H , $L_{кр.}$, $D_{кр.}$ $f(D_{1.3})$; б) - $L_{кр.}$, $D_{кр.}$ $f(H)$; в) - $L_{кр.}$ $f(D_{кр.})$; г) - $S_{кр.}$ $f(D_{1.3})$, где H - высота дерева, м; $L_{кр.}$ - длина кроны; $D_{кр.}$ - диаметр кроны; $D_{1.3}$ - диаметр ствола на высоте 1.3 м от его основания; $S_{кр.}$ - площадь кроны

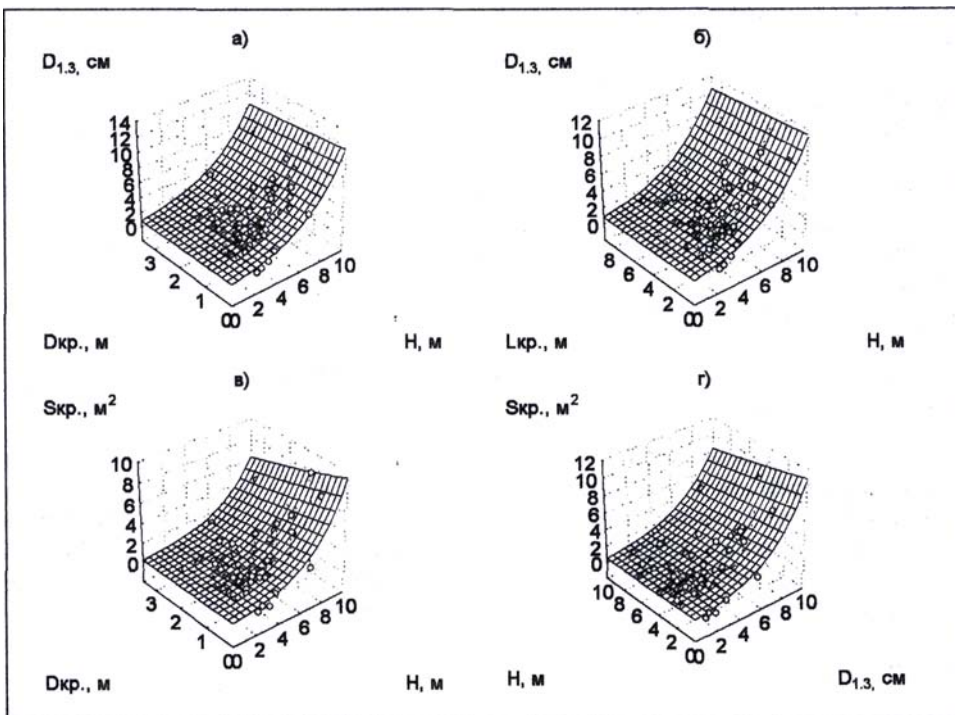


Рис. 7. Трехмерное поле распределения морфометрических параметров деревьев в лиственничнике, полученное в результате сопряженной регрессии лазерно-локационных и наземных данных:

а) - $D_{1.3} f(H, D_{кр.})$, б) - $D_{1.3} f(H, L_{кр.})$, в) - $S_{кр.} f(H, D_{кр.})$, г) - $S_{кр.} f(H, D_{1.3})$

Таблица 1

Объемы стволовой древесины и фитомасса (абсолютно сухая масса) лиственничных древостоев, фактические и вычисленные по лазерно-локационным данным (Красноярский край)

№ п. п.	Координаты центров пробных площадей	Состав и возраст (лет) древостоев по породам	Густота, деревьев/га	Объемы стволовой древесины, м ³ /га		Отклонение		Надземная фитомасса древостоя, тонн/га		Отклонение	
				факт	вычисл.	м ³	%	факт	вычисл.	т	%
1	63°27'00"с.ш. 91°43'23"в.д.	9Л(210)1К(190) +Е(170)	386	145	148	3.0	2.1	90.1	91.8	1.7	1.9
2	63°27'55"с.ш. 91°36'09"в.д.	7Л(180)3К(180) ед. Е(110)Б(100)	550	69	66	-3.0	-4.3	40.1	38.9	-1.2	-3.0
3	63°30'22"с.ш. 91°16'53"в.д.	10Л(200)	360	143	145	2.0	1.4	85.2	86	0.8	0.9
4	63°32'13"с.ш. 91°02'26"в.д.	9Л(200)1Е(180) +Б(90)	380	152	155	3.0	2.0	93.0	93.5	0.5	0.5
5	63°32'40"с.ш. 90°58'47"в.д.	9Л(140)1Е(120) +К(120)	418	170	173	3.0	1.8	104.3	106.7	2.4	2.3
6	63°34'08"с.ш. 90°47'15"в.д.	10Л(160)+К(160)	547	131	137	6.0	4.6	79.0	80.3	1.3	1.7
7	63°36'24"с.ш. 90°29'55"в.д.	9Л(200)1Е(170) ед. К(170)Б(100)	200	94	95	1.0	1.1	56.6	57.2	0.6	1.1
8	63°38'26"с.ш. 90°14'35"в.д.	9Л(220)1Е(200)	220	159	161	2.0	1.3	95.0	96.0	1.0	1.1
9	63°39'55"с.ш. 90°03'06"в.д.	9Л(180)1К(160) ед. Е(160)Б(80)	412	297	293	-4.0	-1.3	175.0	173.1	-1.9	-1.1
10	63°40'50"с.ш. 89°56'30"в.д.	10Л(210) ед. К(200)	227	160	161	1.0	0.6	96.0	97.5	1.5	1.6
11	63°37'54"с.ш. 89°44'05"в.д.	10Л(260)+К(270)	225	162	157	-5.0	-3.1	97.5	95.6	-1.9	-2.0
12	63°27'01"с.ш. 89°33'21"в.д.	7Л(200)3К(200) ед. Е(170)Б(90)	395	287	296	9.0	3.1	166.3	170.0	3.7	2.2
13	63°17'23"с.ш. 89°23'55"в.д.	10Л(210) ед. К(250)Е(180)	209	100	99	-1.0	-1.0	57.0	56.5	-0.5	-0.9
14	63°09'05"с.ш. 89°15'42"в.д.	9Л(250)1Е(200) +Б(100)	380	147	150	3.0	2.0	88.6	89.5	0.9	1.0
15	63°07'17"с.ш. 89°14'06"в.д.	9Л(160)1Е(140)	470	289	291	2.0	0.7	171.3	172.6	1.3	0.8
16	63°06'29"с.ш. 89°13'14"в.д.	6Л(240)3К(210) 1Е(200) ед. Б(80)	410	321	316	-5.0	-1.6	188.0	186.0	-2.0	-1.1
17	63°04'47"с.ш. 89°11'33"в.д.	9Б(40)1Ос(40) ед. Е(30)	690	107	109	2.0	1.9	75.8	77.0	1.2	1.6

крова и формирования геоинформационных систем природно-ресурсного и природоохранного содержания и, в перспективе, имеют высокую потенциальную коммерческую ценность на рынке дистанционного зондирования и геоинформационных услуг.

Библиографический список

1. Абэ Н. Обоснование назначения рубок ухода в лесных культурах криптомерии японской с использованием данных космической

съемки и ГИС // Лесн. таксация и лесоустройство. - 2001. - № 1(30). - С. 126-131.

2. Балтер Б. М., Егоров В. В. Определение удельных объемов древесины леса по данным радарного зондирования в метровом диапазоне волн // Исслед. Земли из космоса. - 2004. - № 4. - С. 52-62

Экономическая эффективность метода лазерной таксации леса по укрупненным показателям (в расчете на 1 млн га, III разряд лесоустройства)

Традиционные технологии			Лазерная таксация	
Виды работ	Стоимость, тыс. руб.		Виды работ	Стоимость, тыс. руб.
	Наземное лесо-устройство	Наземная таксация с камеральным дешифрированием аэрофотоснимков		
Аналоговая аэрофото-съемка М 1:25000, с печатью аэрофотоснимков)	3250	3250	Лазерная, цифровая аэро- и видеосъемка с обработкой и представлением данных	1450
Подготовительные	304	304	Подготовительные	304
Полевые	8000	4000	Полевые	250
Камеральные	3200	3200	Камеральные	3000
ИТОГО:	14754	10754	ИТОГО:	5004
В переводе на 1 га, руб.	14.8	10.8	В переводе на 1 га, руб.	5.0
Превышение стоимости по сравнению с лазерной таксацией, в переводе на 1 га, руб.	+9.8	+5.8		0

3. Данилин И. М. Морфологическая классификации и определение запаса и фитомассы древостоев по данным воздушного лазерного сканирования // Лесн. таксация и лесоустройство. - 2003. - № 1(32). - С. 30-36.

4. Данилин И. М., Медведев Е. М. Оценка структуры и состояния лесного покрова на основе лазерного сканирования и цифровой аэро- и космической съемки // География и природные ресурсы. - 2005. - № 1 (в печати).

5. Данилин И. М., Сведта Т. Лазерное профилирование лесного полога // Лесоведение. - 2001. - № 6. - С. 64-69.

6. Канашенков А. И., Ведешин Л. А. Аэрокосмические радары метрового диапазона: возможности и перспективы использования в дистанционном зондировании Земли // Исслед. Земли из космоса. - 2004. - № 3. - С. 88-96.

7. Медведев Е. М., Григорьев А. В. С лазерным сканированием на вечные времена // Геопрофи. - 2003. - № 1. - С. 5-10.

8. Программный комплекс ALTEXIS. М.: Компания Геокосмос, 2005.

<http://www.geokosmos.ru/page.php?id=480>.

9. Andersen H. E., McGaughey R. J., Reutebuch S. E. Estimating forest canopy fuel parameters using LIDAR data // Rem. Sens. Environ., 2005, 94: 441-449.

10. Danilin I. M., Medvedev E. M. Forest inventory and biomass assessment by the use of airborne laser scanning method (example from

Siberia). Int. Arch. Photogramm. Rem. Sens. and Spat. Inf. Sci. 2004. Vol. XXXVI. Part 8/W2. P. 139-144.

11. Danilin I., Medvedev E., Sweda T. Use of airborne laser terrain mapping system for forest inventory in Siberia // Precision Forestry. Proc. First Int. Precision Forestry Cooperative Symp., Seattle, Washington, June 17-20, 2001, University of Washington. P. 67-75.

12. Gobakken T., Naesset E. Estimation of diameter and basal area distributions in coniferous forest by means of airborne laser scanner data // Scand. J. For. Res. 2004. V. 19. № 6. P. 529-542.

13. Harding D. J., Lefsky M. A., Parker G. G., Blair J. B. Laser altimeter canopy height profiles, methods and validation for closed-canopy, broadleaf forests // Rem. Sens. Environ. 2001. V. 76. P. 283-297.

14. Holmgren J. Prediction of tree height, basal area and stem volume in forest stands using airborne laser scanning // Scand. J. For. Res. 2004. V. 19. № 6. P. 543-553.

15. Holmgren J., Persson Å. Identifying species of individual trees using airborne laser scanner // Rem. Sens. Environ. 2004. V. 90. № 4. P. 415-423.

16. Hudak A. T., Lefsky M. A. et al. Integration of lidar and Landsat ETM+ data for estimating and mapping forest canopy height // Rem. Sens. Environ. 2002. V. 82. № 2/3. P. 397-416.

17. Lefsky M. A., Cohen W. B., Harding D. J. et al. Lidar remote sensing of aboveground biomass in three biomes // Global Ecology and Biogeography. 2002. V. 11. № 5. P. 393-400.

18. Lefsky M. A., Hudak A. T., Cohen W. B., Acker S. A. Patterns of covariance

between forest stand and canopy structure in the Pacific Northwest // *Rem. Sens. Environ.* 2005. V. 95. № 4. P. 517-531.

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

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

21. Lim K., Treitz P. M., Wulder M. et al. LiDAR remote sensing of forest structure // *Progress in Physical Geography.* 2002. V. 27. P. 88-106.

22. Maltamo M., Eerikäinen K., Pitkänen J. et al. Estimation of timber volume and stem density based on scanning laser altimetry and expected tree size distribution functions // *Rem. Sens. Environ.* 2004. V. 90. № 3. P. 319-330.

23. Means J. E., Acker S. A., Fitt B. J. et al. Predicting forest stand characteristics with airborne scanning lidar // *Photogramm. Eng. & Rem. Sens.* 2000. V. 66. № 11. P. 1367-1371.

24. Medvedev E. M. Digital automatic orthophoto production with laser locator and aerial photography data // *Int. Arch. Photogramm. Rem. Sens. and Spat. Inf. Sci.* 2003. V. XXXII. Part 6W8/1.

25. Morsdorf F., Meier E., Kötz B. et al. LiDAR-based geometric reconstruction of boreal type forest stands at single tree level for forest and wildland fire management // *Rem. Sens. Environ.* 2004. V. 92. № 3. P. 353-362.

26. Murakami K., Sato M. Possibility of polarimetric SAR for environmental study // *Proc. Ninth Symp. Joint Siberian Permafrost Studies Between Japan and Russia in 2000.* Hokkaido Research Center for North Eurasia and North Pacific Regions, Hokkaido Univ., Japan. 2001. P. 239-246.

27. Naesset E. Accuracy of forest inventory using airborne laser scanning: evaluating the first

Nordic full-scale operational project // *Scand. J. For. Res.* 2004. V. 19. № 6. P. 554-557.

28. Naesset E., Bollandsås O. M., Gobakken T. Comparing regression methods in estimation of biophysical properties of forest stands from two different inventories using laser scanner data // *Rem. Sens. Environ.* 2005. V. 94. № 4. P. 541-553.

29. Naesset E., Gobakken T., Holmgren J. et al. Laser scanning of forest resources: the Nordic experience // *Scand. J. For. Res.* 2004. V. 19. № 6. P. 482-499.

30. Nelson R., Short A., Valenti M. Measuring biomass and carbon in Delaware using an airborne profiling LIDAR // *Scand. J. For. Res.* 2004. V. 19. № 6. P. 500-511.

31. Patenaude G., Hill R. A., Milne R. et al. Quantifying forest above ground carbon content using LiDAR remote sensing // *Rem. Sens. Environ.* 2004. V. 93. № 3. P. 368-380.

32. Persson Å., Holmgren J., Söderman U. Detecting and measuring individual trees using airborne laser scanning // *Photogramm. Eng. & Rem. Sens.* 2002. V. 68. № 9. P. 925-932.

33. Remote Sensing of Forest Environments. Concepts and Case Studies / Ed. by M.A. Wulder and S.E. Franklin. Kluwer Academic Pub., 2003. 519 p.

34. Riaño D., Chuvieco E., Condés S. et al. Generation of crown bulk density for *Pinus sylvestris* L. from lidar // *Rem. Sens. Environ.* 2004. V. 92. № 3. P. 345-352.

35. St-Onge B., Jumelet J., Cobello M., Véga C. Measuring individual tree height using a combination of stereophotogrammetry and lidar // *Can. J. For. Res.* 2004. V. 34. № 10. P. 2122-2130.

36. Wulder M. A., Hall R. J., Coops N. C., Franklin S. E. High spatial resolution remotely sensed data for ecosystem characterization // *Bio-Science.* 2004. V. 54. № 6. P. 511-521.

37. Yu X., Hyypä J., Kaartinen H., Maltamo M. Automatic detection of harvested trees and determination of forest growth using airborne laser scanning // *Rem. Sens. Environ.* 2004. V. 90. № 4. P. 451-462.