

Рыльский И.А.¹

ПОДХОДЫ К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ТАКСАЦИОННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЛЕСА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АЭРОКОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ И ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ

АННОТАЦИЯ

В статье рассмотрены подходы к комплексному решению проблемы определения таксационных показателей и описаний с использованием дистанционных методов и ограниченных по объему наземных работ. В качестве источников данных дистанционного зондирования предлагается использовать материалы космических многозональных съемок сверхвысокого разрешения, данные воздушного лазерного сканирования с пилотируемых носителей, цветную цифровую аэрофотосъемку в тесной комбинации друг с другом, что позволяет взаимно нивелировать недостатки каждого из методов.

С помощью космических снимков выполняется комплекс работ по дешифрированию породного состава, бонитета леса. Обработка космических снимков (ортотрансформирование) ведется с использованием в том числе и аэросъемочных данных (лазерное сканирование дает ЦМР, по которой ведется ортокоррекция, данные аэрофотоснимков с аппаратной привязкой используются для геопривязки космических данных).

Наземные работы представлены натурными измерениями отдельных деревьев на крайне ограниченных по объему площадях. Результаты натурных измерений используются в качестве эталона для оценки точности и определения численных зависимостей между геометрическими параметрами, которые могут быть получены по данным дистанционного зондирования (высота и диаметр кроны), и параметрами, которые не могут быть получены прямыми дистанционными методами (диаметр ствола, фитомасса, прочее). В работе рассмотрены основные технологические способы получения и обработки данных, общие подходы и отдельные частные рекомендации по порядку выполнения работ. На примере значительного объема выполненных работ обосновывается возможность решения основных проблем, стоящих при определении таксационных показателей с большей точностью и меньшей стоимостью.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: дистанционное зондирование Земли, инвентаризация и мониторинг лесов, дистанционный мониторинг лесов, лазерная локация, цифровая аэро- и космическая фотосъемка, лидар, обработка изображений, геоинформационные системы, Красноярский край.

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, Ленинские горы, д. 1, 119991, Москва, Россия, *e-mail*: rilskiy@mail.ru

Илья А. Рыльский¹

APPROACHES TO THE DETERMINATION OF TAXATION INDICATORS OF FORESTS USING AEROSPACE IMAGES AND LIDAR DATA

ABSTRACT

The article is dedicated to overview the approaches for solving basic problems of defining taxation parameters and forest inventorying using remote sensing methods without massive terrestrial surveying. Authors suggest using remote sensing data (high resolution space images), digital multispectral airborne data, LIDAR data (using manned vehicles) in a combination that allows to avoid weak point of each method.

Satellite images were used for depiction of forest type and taxation classes of trees. Satellite image processing (orthorectification) has been implemented using airborne data: the LIDAR data has been used to produce DEM for orthocorrection, aerial images with measured center coordinates and orientation angles were used for collection of ground control points for georeferencing.

Terrestrial researches described in the article include physical measurements of trees (as etalons values) and their parameters made on very small areas. These measurements are used as control values when proving results of remote sensing data processing, or for defining equations between parameters that can be measured using remote sensing data (tree height, diameter of canopy) and parameters that can not (log diameter, biomass, etc.). Basic and specific data processing technologies are briefly described, some practical recommendations are included. Based upon vast area of surveying and data processing, authors prove the ability to solve basic taxation problems and tasks using less efforts with better precision and higher speed.

KEYWORDS: Remote sensing, forest inventory, forest monitoring, LIDAR, airborne laser scanning, digital aerial imagery, space images, image processing, GIS, geoinformatics.

ВВЕДЕНИЕ

Появление новейших методов сбора геоданных (спутниковые снимки сверхвысокого разрешения, лазерное сканирование с воздуха, гиперспектральные съемки и т. п.) требует постоянного проведения исследований того, как указанные методы могут изменить и улучшить информационное обеспечение задач, решавшихся ранее альтернативными методами. Комплексирование этих методов позволяет нивелировать недостатки одних технологий за счет преимуществ других.

На фоне постепенного роста внимания к проблемам леса и попыток более эффективного использования ресурсов в целом логично было бы ожидать повышения требований по информационному обеспечению – «интеллектуализации» отрасли. Тем не менее, несмотря на то, что вышеописанные методы по отдельности применяются в самых различных областях хозяйства (в том числе и в РФ), их совместное использование не нашло применения в практике информационного обеспечения лесоустроительных работ.

¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Leninskie Gory, 1, 119991, Moscow, Russia, e-mail: rilskiy@mail.ru

Действительно, подобное развитие имеет место в странах, не богатых природными ресурсами и с высоким уровнем жизни (Западная и Северная Европа), один из лидеров в этом отношении – Финляндия. В России традиционный подход к таксации описывается формулой «минимальная цена и минимальное правдоподобие», при этом ни качество собственно таксации лесов, ни возможности по перспективному развитию отрасли в расчет не принимаются. В качестве одного из аргументов сторонников существующего положения дел используется тезис о том, что все характеристики не могут быть получены дистанционными методами, а раз все равно нужны полевые работы, то никакие высокие технологии особо не нужны.

Тем не менее, эти подходы не могут без конца поддерживаться на фоне курса на цифровую экономику, и рано или поздно будут заменены более интеллектуальными методиками. Поэтому целью данной работы явилась разработка подходов и технологии автоматизированного определения таксационных показателей лесных участков с использованием материалов дистанционного зондирования Земли (аэрофотосъемка в видимом диапазоне, космическая многозональная съемка) и воздушного лазерного сканирования.

В ходе исследования ставились следующие задачи:

- получение данных таксационных описаний лесных выделов и составление тематических лесных карт (планов лесонасаждений, окрашенных по породам);
- разработка рекомендаций и методологии работ по автоматизированному определению таксационных показателей лесных участков на основе данных лазерной локации и цифровой аэросъемки, позволяющих обрабатывать эти данные и получать таксационные характеристики всех категорий земель лесного фонда;
- максимальное снижение доли полевых работ.

Работы выполнялись на площади 110 км² на двух участках (полигонах), расположенных в Устюгском и Мостовском участковых лесничествах Красноярского края. Данная территория расположена в умеренном поясе, климат территории – резко континентальный. Регион отличается значительными запасами леса и интенсивно использует данную ресурсную базу. Леса отличаются достаточно высокой продуктивностью, что создает хорошие предпосылки для экономической обоснованности использования данной методики.

При выполнении работ использована условная система координат на базе WGS84, проекция UTM.

Общая схема работ выглядела следующим образом:

Этап 1. Выполнение аэросъемочных работ с одновременным фотографированием территории (цифровые фотоснимки, RGB, разрешение 20 см) и выполнением воздушного лазерного сканирования с плотностью лучше 4 точек на 1 м².

Этап 2. Получение и первичная обработка данных космической сканерной съемки (видимый + ближний инфракрасный диапазон) с детальностью 50 см на ту же территорию, время съемки при этом отличалось на 1–1,5 месяца от времени авиационного залета.

Этап 3. Определение породного состава древостоев и типов леса по данным многоспектральной аэро- и космической фотосъемки

Этап 4. Проведение полевых исследований с закладкой выделов – эталонов для калибровки и контроля полученных данных таксации лесов, осуществленной методом дешифрирования данных аэросъемки и лазерной локации.

Этап 5. Разработка технологии автоматизированного дешифрирования, определения величины таксационных показателей лесных участков по данным цифровой аэросъемки и лазерной локации. Данные этапов 3 и 4 использовались при расчетах.

Этап 6. Проверка результатов дешифрирования на тестовых участках, не использованных в расчетах ранее.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Общие положения. В современной практике инвентаризации и мониторинга лесов получение достоверной и оперативной информации о состоянии и динамике лесных ресурсов является актуальной задачей. В решении этой задачи в последние годы во многих странах мира и в России все активнее используются лазерная локация и цифровая аэро- и космическая фотосъемка, которые представляют собой важнейшие источники данных для наполнения геоинформационных систем и пространственного анализа для решения природопользовательских задач [Тикунов и др., 2013]. Эти инновационные и эффективные методы находят сегодня широкое применение во многих отраслях, являясь, в том числе, информационной основой инвентаризации и устройства лесов, лесоэкологического мониторинга, составления кадастров природных ресурсов, систем сбора, обработки, анализа данных и баз знаний [Тикунов и др., 2013].

Таблица 1. Сравнение пригодности оценки характеристик
лесного покрова различными методами

Table 1. Suitability of different methods for estimation of forest characteristics

Методы регистрации и измерений	Размеры отдельных деревьев	Высота деревьев	Площади и границы объектов	Скорость получения данных	Скорость обработки данных	Классификация лесного покрова
Наземные измерения	5	3	2	2	3	2
Обычная аэрофотосъемка (RGB, RGB+NIR)	4	3	4	4	2	5
Спутниковая многозональная съемка	2	2	5	5	5	4
Лазерное сканирование	4	5	4	5	5	3

Примечание. Оценка в баллах: 5 – отлично, 2 – плохо или невозможно

Современные авиационные лазерно-локационные системы стремительно развиваются и на сегодняшний день имеют частоту сканирования 2 000 000 импульсов (измерений) в секунду. Наибольшая плотность точек сканирования при этом составляет от 4 до 50 точек на 1 м² поверхности, а точность измерения геометрических параметров наземных объектов и морфоструктурных элементов растительности в плановой и профильной проекциях составляют порядка $\pm 5-10$ см. Точность спутникового позиционирования контуров линий и границ лесных выделов, пробных площадей, отдельных деревьев и морфоструктурных элементов их стволов и крон, в том числе и в подкрановом пространстве, практически не ограничена и определяется техническими характеристиками приборов геопозиционирования [Медведев и др., 2007].

Средствами пространственного и детального отображения контуров и рельефа земной поверхности с представленной на них растительностью и основой для предварительного трассирования маршрутов авиационной лазерной и цифровой аэрофотосъемки могут также являться спутниковые снимки, дешифрованные по основным параметрам и характеристикам растительного покрова в границах лесотаксационных выделов.

Структура, объемные показатели деревьев и древостоев определяются по лазерно-локационным данным, интегрированным с цифровыми геотрансформированными аэрофотоснимками на основе цифровой модели местности (ЦММ) и поля распределения лесного полога, которые генерируются из исходных данных лазерной локации [Медведев и др., 2007]. При обработке и анализе лазерно-локационных данных и цифровых аэрофотоснимков используются методы математической морфологии, оперирующей понятиями теории множеств и нечетких множеств [Soille, 2003; Данилин, Фаворская, 2011].

Лазерно-локационная модель земной поверхности и лесной растительности позволяет получать детальные координаты и морфоструктурные характеристики рельефа местности и лесных насаждений средствами трехмерной компьютерной графики и визуализации с использованием программных продуктов TerraSolid, ArcGis версии 9.0 и выше и др. (рис. 1).

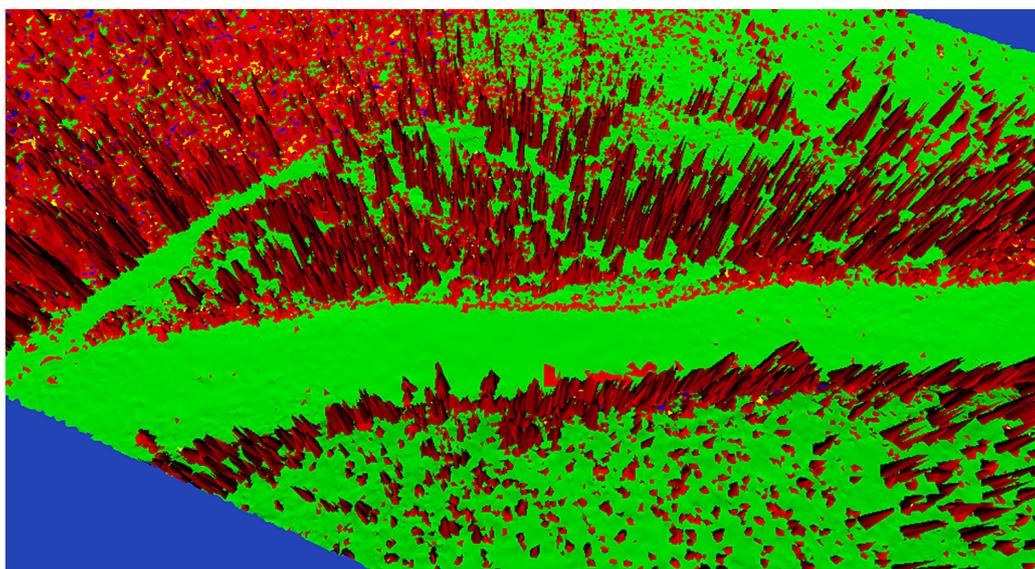


Рис. 1. Цифровая модель леса, построенная по данным лазерной локации
Fig. 1. Digital forest model, built using LIDAR data

В ряде работ, выполненных ранее в России и за рубежом, было показано, что точность оценки древесного запаса и биомассы леса, в том числе методами авиационного зондирования, возможно повысить до 7–10 % с использованием морфологической классификации и аллометрических взаимосвязей между размерами деревьев [Holmgren, Persson, 2004; Chen, 2007].

Выполненные исследования показывают, что структура растительного покрова наиболее эффективно определяется по характеристикам рядов распределения деревьев по диаметру и высоте, вертикальной и горизонтальной протяженности крон, которые, в свою очередь, взаимосвязаны и коррелированы. При этом объемные и весовые показатели деревьев и древостоев с высокой точностью аппроксимируются аллометрическими функциями через их морфоструктурные признаки (рис. 2; табл. 2).

Построение рядов распределения деревьев по морфометрическим показателям традиционно предполагает выполнение трудоемких наземных биометрических процедур, операций и перчетов (сплошных или выборочных), которые требуют значительных финансовых затрат. Вместе с тем, метод лазерной локации, совместно с цифровой аэросъемкой субдециметрового разрешения, позволяет выполнять «попиксельную» инструментально-измерительную таксацию на основе прецизионной спутниковой геодезии и детальной топографической съемки, изучать динамику лесного покрова, горизонтальную и вертикальную структуру насаждений, реконструировать ряды распределений деревьев по любому

морфоструктурному признаку, вычислять искомые таксационные показатели и фитомассу леса в автоматическом режиме с высокой точностью и на достаточно больших площадях (до 300 км² за один рабочий летный день).

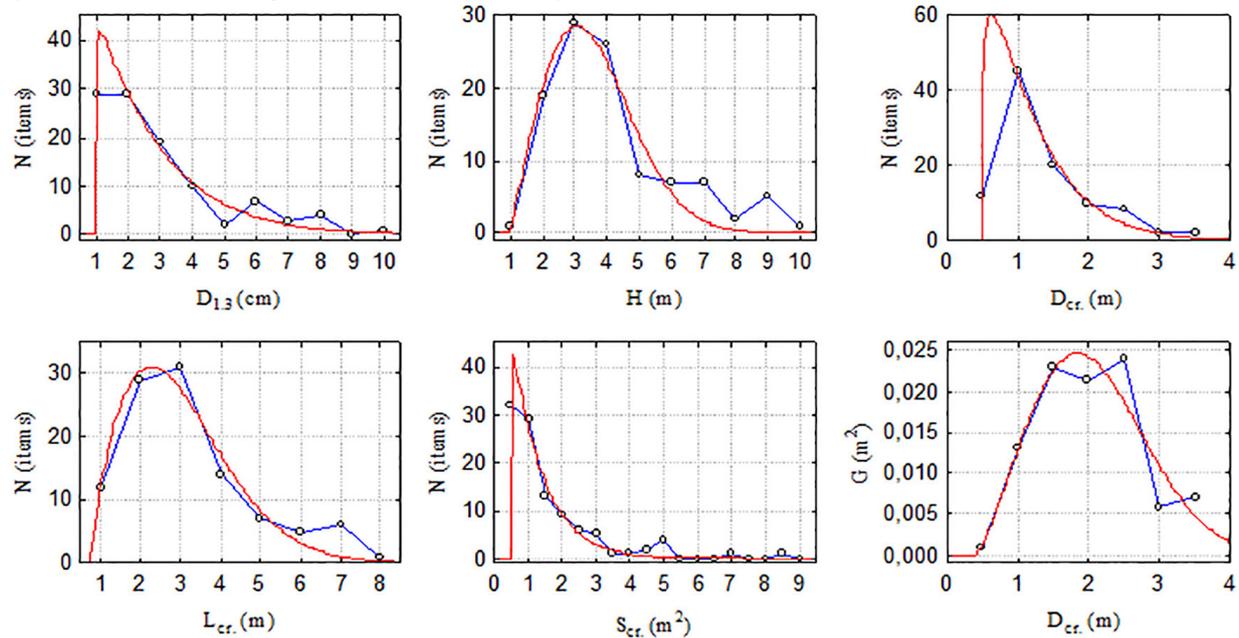


Рис. 2. Распределение деревьев лиственницы (N) по морфометрическим показателям стволов и крон, аппроксимированное функцией Вейбулла:

$D_{1.3}$ – диаметр ствола на высоте 1,3 м от его основания, см; H – высота дерева, м; $D_{кр}$ – диаметр кроны, м; $L_{кр}$ – длина кроны, м; $S_{кр}$ – площадь кроны, м²; G – сумма площадей поперечных сечений стволов на высоте 1,3 м, м²

Fig. 2. Tree distribution (larix) (N) by morphometric parameters of logs and canopies, approximated by Weibull function:

$D_{1.3}$ – log diameter on 1.3 height, cm; H – tree height in meters; $D_{кр}$ – canopy diameter, m; $L_{кр}$ – canopy length, m; $S_{кр}$ – canopy area, m²; G – sum of areas of log cross-sections on 1.3 m height, m²

Таблица 2. Примеры значений коэффициентов регрессии морфометрических и весовых (фитомасса) показателей

Table 2. Some examples of regression coefficients used for estimation of morphometric parameters and biomass

Модель аппроксимации:	$P = aD_{1.3}^2 H$			$P = aD_k^2 H$		
Параметры уравнения:	a	S	R ²	a	S	R ²
Зависимая переменная:						
Надземная часть	0,029	0,505	0,996	0,266	2,122	0,964
Ствол	0,0203	0,055	0,999	0,187	1,750	0,951
Древесина	0,017	0,037	0,999	0,153	1,452	0,950
Кора	0,004	0,008	0,996	0,034	0,307	0,951
Крона	0,008	0,258	0,976	0,079	0,427	0,983
Ветви $\varnothing > 1$ см	0,003	0,068	0,940	0,024	0,217	0,959
Ветви $\varnothing < 1$ см	0,002	0,021	0,969	0,020	0,272	0,892
Побеги текущего года	0,0001	0,000	0,873	0,0001	0,005	0,966
Хвоя	0,003	0,089	0,917	0,024	0,074	0,995
Отмершие ветви	0,001	0,002	0,987	0,009	0,110	0,918

Примечание. P – вес фракции дерева в абсолютно сухом состоянии, кг; $D_{1.3}$ – диаметр ствола на высоте 1,3 м от его основания, см; H – высота дерева, м; D_k – диаметр кроны, м; a – константа уравнения; S – стандартная ошибка уравнения; R^2 – индекс детерминации.

Оценка древесных запасов по данным лазерной локации и цифровой аэросъемки в каждом конкретном случае сводится к установлению базовых закономерностей изучаемого объекта и определению соотношений между объемами стволов, высотой и диаметрами стволов и крон деревьев, которые составляют 87–98 % объясненной изменчивости различных морфоструктурных элементов.

Этапы 1 и 2: выполнение аэросъемочных работ и обработка данных космической многозональной съемки

Выполнение авиационных съемочных работ

Воздушное лазерное сканирование и аэрофотосъемка выполнялись воздушным лазерным сканером RIEGL Q560 совместно с цифровым аэросъемочным комплексом IGI DigiCAM, включающим цифровую камеру Hasselblad H39 (рис. 3). Съемочное оборудование располагалось на борту самолета АН-2. В процессе производства лазерной локации и аэрофотосъемки определялись элементы взаимного ориентирования GPS антенны, лазерного сканера, аэрофотокамеры.



Рис. 3. Лазерный аэросъемочный комплекс Riegl Q560
Fig. 3. Airborne laser scanning system Riegl Q560

В процессе производства летных съемочных работ на борту самолета использовался входящий в комплект аэросъемочной аппаратуры фазовый GPS-приемник Novatel совместно с инерциальной навигационной системой IGI.

Выполнение работ соответствовало требованиям для достижения необходимой точности: работа в благоприятной GPS обстановке ($PDOP < 4$), количество одновременно наблюдаемых спутников GPS не менее 6, соблюдение необходимых угловых параметров (крен, тангаж не более 3°), расстояние от воздушного судна до базовых приемников не более 30 км, высота спутников над горизонтом более 10° , высота воздушного судна во время аэрофотосъемки – 600 м, что обеспечивает точность измерений по высоте лучше 12 см, в плане – лучше 30 см. Минимальная ширина полосы захвата на заданной высоте полета – 600 м. Средняя плотность точек составляет 4–8 т/м². Геометрическое разрешение аэрофотоснимков составило 8 см. Данные базовых приемников и бортового приемника регистрировались с периодичностью 1 Гц (одно измерение в секунду). При этом GPS-приемники регистрировали сигналы двух спутниковых систем: GPS и ГЛОНАСС.

Первичная обработка съемочных данных

Расчет траектории полета осуществлен с использованием программных комплексов GRAFNAV и AeroOffice. Кинематические GPS-измерения взаимно уравнивались с данными наземных базовых станций и инерциальной навигационной системы (ИНС). Каждая

траектория просчитывалась в прямом и обратном направлениях. Сопоставление полученных прямого и обратного решений показывает величину расхождений около 5–7 см. Итоговая точность траекторий находится в пределах 10 см (по данным графика Estimated Position Accuracy в ПО GrafNav).

Поскольку система воздушного лазерного сканирования оснащена ГНСС-ИНС системами, то мы имеем возможность не аналитического, а непосредственно аппаратного изменения элементов внешнего ориентирования каждого фотоснимка – угловые значения дают данные ИНС, координаты центров фиксируются по данным ГНСС и синхронизированного с ними по времени срабатывания затвора камеры. Тем самым достигается возможность работы без наземных опорных точек. Это повышает скорость выполнения работ – все съемки и плано-высотное обоснование на площади в 11 000 га были выполнены за 1 день. Это сильно снижает стоимость итоговых работ.

Близкая по принципу работы схема геопривязки данных лазерного сканирования используется и в мобильных сканирующих системах, предназначенных для оперативного картографирования в движении [Малеванная, Рыльский, 2014]. Однако в этом случае носитель движется по земле, а не по воздуху. Несмотря на более низкие издержки (нет необходимости нанимать самолет, достаточно обычного транспорта) производительность в лесу оставляет желать лучшего. В данной работе мобильные лазерные системы не применялись.

После получения точной траектории и элементов внешнего ориентирования производился вывод точек лазерных отражений (ТЛО) в систему координат проекта.

После вывода точек лазерных отражений была произведена их классификация.

Классификация ТЛО включала в себя два этапа:

- автоматическая классификация;
- проверка полученных результатов и ручная реклассификация (при необходимости).

Для проведения автоматической классификации после получения данных проведен их анализ, на основании которого подобраны параметры для итерационной процедуры классификации «земли»: размер первичной ячейки, углы и пределы включения точек в класс «земли», ограничение длины ребер триангуляции. Классификация ТЛО проведена в программном обеспечении TerraScan по следующей схеме:

- определение ложных отражений;
- разделение ТЛО на первые и последние отражения;
- автоматическое выделение класса «земля» по вышеуказанным параметрам;
- автоматический отбор ошибочных точек из класса «земля»;
- анализ полученных результатов путем просмотра и профилирования классифицированного облака ТЛО, ручная доработка (реклассификация) точек, в местах пропусков автоматической классификации;
- получение класса точек «Растительность»;
- вычленение из класса растительность точек, расположенных менее чем в 1 м над землей.

Создание цифровой модели поверхностей рельефа и растительности

После проведения автоматизированной классификации точек лазерных отражений и интерактивной коррекции результатов классификации, создание цифровой модели поверхностей (рельеф и растительность) велось по следующей схеме:

- массив точек (нерегулярный) из нужного класса точек (допустим, «земля») используется при выполнении триангуляции Делоне; результатом является TIN модель;
- поскольку топология TIN-моделей у разных классов точек будет разной, что неудобно для последующего анализа, то мы преобразуем ее в регулярно-ячеистую форму (GRID) с шагом 0,5 м. Итоговый формат – ArcInfo GRID.

Подобная операция проделывалась по сегментам территории, размер сегмента – 1000×1000 м. На каждый сегмент создавалась цифровая модель рельефа, где каждой ячейке присваивалась высота (абсолютная, над уровнем моря) поверхности земли. Для модели растительности строилась первичная поверхность (верхние точки растительности), из которой (в растровой форме) вычиталась поверхность рельефа. Использовались методы картографической алгебры. Итоговый результат – регулярно-ячеистая модель относительных высот растительности над рельефом.

Подобный подход позволит сразу, без полевых измерений, получить геометрические параметры кроны каждого дерева. Действительно, высота и диаметр кроны напрямую следуют из массива точек – ведь при диаметре кроны в 7–8 м она описывается примерно 160–300 трехмерными точками лазерных отражений, что позволяет исчерпывающе точно описать форму кроны любой породы дерева. Более того, наличие точных данных о форме кроны позволяет применить к этим материалам всю мощь ГИС-анализа поверхностей, что совершенно невозможно сделать, используя ортофотопланы, получаемые классическим способом [Тикунов, Рыльский, 2016].

Примечательно, что без точной модели рельефа под сомкнутыми кронами деревьев определить высоту кроны невозможно. Очевидно, что данные одной аэрофотосъемки в этом случае оказываются совершенно непригодными – они вообще не позволяют определить высоту рельефа под кронами деревьев, и, следовательно, не дают возможности определить высоту крон. Кроме того, оказывается невозможным определить и ширину крон в том месте, где она обычно максимальна – в нижней части полога. А этих участках обычно отсутствует стереоэффект.

Таким образом, применение аэрофотосъемки с одновременным лазерным сканированием позволяет получить принципиально другой набор данных и перейти к решению иных задач.

Создание ортофотопланов местности с использованием ЦМР

После построения ЦМР выполнялось ортотрансформирование фотоснимков с целью устранения искажений съемки, вызванных наличием в поле снимка участков с различной высотой, а также искажений, связанных с отклонением оси съемки от вертикали.

Исправление искажений на снимках, вносимых наличием в полосе съемки участков с различной высотой, производилось в автоматическом режиме посредством попиксельной трансформации изображения с устранением всех видов искажений за дисторсию; смещение главной точки снимка; крен-тангаж-разворот носителя; рельеф.

Как уже было отмечено выше, для выполнения ортофототрансформирования использовались аппаратно измеренные на борту данных об элементах внешнего ориентирования снимков (п.п. 3.2.). Данные о рельефе – в виде ЦМР – были получены в рамках обработки, описанной в п.п. 3.3. Ортотрансформирование изображений производилось в пакетном режиме с использованием программных средств MicroStation Terra Solid. В среде MicroStation Terra Solid осуществлялась ортотрансформация исходных снимков и объединение их в единую геопривязанную мозаику. Построение ортофотопланов производилось по квадратам площадью 1×1 км.

Оценка итоговой точности высотной модели рельефа, произведенная по независимым контрольным точкам (26 штук) позволяет оценить погрешности данных на уровне:

- цифровая модель рельефа – лучше 16 см по высоте (соответствует 1 : 1000);
- точки лазерных отражений – лучше 35 см в плане (соответствует 1 : 1000);
- плановая точность ортофотопланов – лучше 40 см в плане (соответствует 1 : 1000).

Таким образом, можно говорить о возможности получения без использования опорных точек и выезда на местность материалов АФС-ВЛС, обладающих точностью на уровне 1 : 1000, и пригодных для использования в качестве материалов для геопривязки менее детальных данных (например, космических фотоснимков).

Первичная обработка космической съемки сверхвысокого разрешения

Получение и первичная обработка данных космической сканерной съемки (видимый + ближний инфракрасный диапазон) с детальностью 50 см осуществлялось на ту же территорию, что и выполнение аэросъемочных работ. Время съемки при этом отличалось от времени авиационного залета не более чем на несколько недель. Поставлялись данные спутниковых систем WorldView 2 (RGB + NIR каналы), что позволило произвести расчет вегетационных индексов и задействовать весь арсенал возможных инструментов автоматизированного дешифрирования с использованием эталонов и спектральных образов.

При ортотрансформировании снимков использовались RPC-коэффициенты и цифровая модель рельефа, полученная в ходе обработки данных лазерного сканирования [Рыльский, 2016]. Цифровые ортофотопланы, полученные по данным аппаратного измерения элементов внешнего ориентирования в ходе залета АФС-ВЛС, использовались в качестве источника данных для геопривязки с точностью лучше 1 : 2000, что позволило и на этом этапе обойтись без полевых работ.

Подобный подход позволил получить дополнительные материалы (многозональные ортофотопланы космической съемки), практически идентичные по точности привязки данным АФС-ВЛС, что позволило использовать их наравне друг с другом без поправки на пространственные погрешности.

Этап 3. Определение породного состава древостоев и типов леса по данным многоспектральной аэро- и космической фотосъемки

Концептуальные подходы к визуальному определению породного состава и типов леса по данным дистанционного зондирования

При дешифрировании породного состава и типов леса рекомендуется использовать ландшафтный подход к дешифрированию аэроснимков: все объекты, изобразившиеся на аэроснимках, рассматриваются как взаимосвязанные компоненты ландшафта (лесная растительность, рельеф, почва и др.) [Сухих, 2005].

Основными дешифровочными признаками лесной растительности являются тон и рисунок изображения, по ним определяются состав древостоя и типы леса, а также положение растительности в рельефе.

Для лесных сообществ и других объектов, покрытых зеленой растительностью (луг, вырубки), кривая отражения обладает выраженным максимумом в желто-зеленых лучах спектра (0,52–0,58 мкм), минимумом – в красных (0,50–0,08 мкм), резким подъемом и общей высокой отражательной способностью в инфракрасной области спектра. По мере старения яркость молодой листвы и хвои снижается (у лиственных пород быстрее). Разница в спектральной яркости молодой и старой хвои сохраняется до глубокой осени [Сухих, 2005] (рис. 4).

Для изучения лесной растительности, а также оценки степени информативности многозональных аэро- и космических фотоснимков рекомендуются снимки высокого разрешения на уровне 20–50 см на пиксель, позволяющие достоверно дешифрировать насаждения на уровне таксационных выделов и пробных площадей, с учетом структуры древостоев, выполненные в узких диапазонах спектра с эффективными длинами волн: зеленой (0,54 мкм), красной (0,06 мкм) и инфракрасной (0,84 мкм), обладающие наиболее значительными контрастами изображения лесной растительности (рис. 5).

В инфракрасной зоне спектра (0,84 мкм) на аэроснимках летнего залета контрастно дешифрируются лиственные и хвойные породы. В условиях Емельяновского лесничества Красноярского края при относительно однородных почвообразующих породах лиственные породы являются хорошим индикатором степени увлажненности территории (рис. 6).

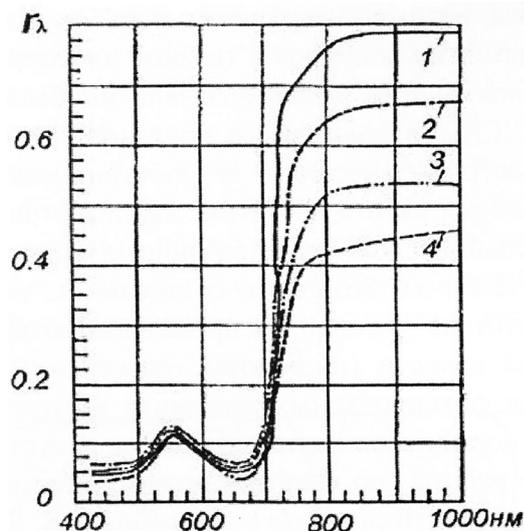


Рис. 4. Кривые коэффициентов спектральной яркости крон деревьев кедра различной степени повреждения:

1 – неповрежденные; 2 – поврежденные на 20–40 %;
3 – поврежденные на 70–80 %; 4 – полностью обесхвоенные

Fig. 4. Spectral intensity coefficients of tree canopies (conifer species) with different level of damages:

1 – non-damaged, 2 – 20–40 % damaged, 3 – 70–80 % damaged, 4 – totally without needles



Рис. 5. Контурное дешифрирование таксационных выделов, выполненное визуальное на космическом снимке WorldView 2 в ближнем ИК диапазоне

Fig. 5. Contour interpretation of taxation areas, made interactively using WorldView2 image (CIR image)

В отличие от изображений в инфракрасном диапазоне качество снимков, выполненных в видимой области спектра, в значительной мере зависит от погодных условий. В первую очередь следует отметить влияние воздушной дымки, создающей дополнительную яркость при съемке и снижающей контраст в изображении природных объектов.

В красной зоне спектра, по данным исследований [Сухих, 2005; Дворяшин и др., 2011], несмотря на то, что изображение достаточно контрастно, отсутствуют тональные различия хвойных и лиственных пород.



Рис. 6. Синтезированный космический снимок WorldView в ближнем инфракрасном (NIR), крайнем красном (RE) и красном (R) диапазонах позволяет достоверно дешифрировать лесные насаждения по породному составу
 Fig. 6. WorldView2 image, synthesized from NIR, RedEdge and Red channels, allows to define forested areas by species

Анализ различных вариантов оптико-электронной обработки показал, что наиболее оптимальным для целей дешифрирования лесной растительности оказалось сочетание каналов с максимумом пропускания 0,54; 0,60; 0,66 и 0,84 мкм. При таком сочетании удалось дифференцировать лесную растительность не только по породному составу, но и выделить границы слабоконтрастных типов лесов (сосняки мшистые и багульниковые). Этому способствует и возможность изменения цветонасыщенности любого из изображений, позволяющая вычленивать интересующие контуры выделов.

Концептуальные подходы к автоматизированному определению породного состава и типов леса по данным дистанционного зондирования

Использование космических снимков сверхвысокого разрешения обеспечивает высокую достоверность аналитического и измерительного дешифрирования лесных насаждений при существенном сокращении наземных обследований.

Чаще всего при дешифрировании ДЗЗ используют классификацию объектов, под которой понимают автоматизированное подразделение всех пикселей снимка на группы, соответствующие разным объектам (классам). Распространенным подходом в классификации является использование спектральных признаков, т. е. разделение объектов на основе различий в значениях спектральной яркости. В качестве основного дешифровочного признака при таксации древесных и кустарниковых пород используется вектор много-спектральных яркостей аэро-космических изображений.

$$\bar{P}_{ij} = (P_{ij}^I, P_{ij}^{II} \dots P_{ij}^k)^T$$

Недостатком данного подхода является зависимость спектральной яркости от условий съемки. Для уменьшения влияния внешних факторов выполняются различные преобразования исходных изображений и изменения яркостной структуры. Методы, основанные на преобразовании изображений: вегетационные индексы, метод главных компонент, метод параллелепипедов, метод минимального расстояния, метод расстояния Махалано-биса, метод максимального правдоподобия, метод двоичного кодирования [Сухих, 2005].

Например, нормализованный вегетационный индекс вычисляется как:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED},$$

где NIR – яркость элемента изображения в инфракрасном канале; RED – яркость соответствующего элемента в красной зоне спектра.

На изображениях, полученных в соответствии с вегетационными индексами, хорошо видна растительность и в ряде случаев даже возможно разделить деревья по породам (рис. 7).

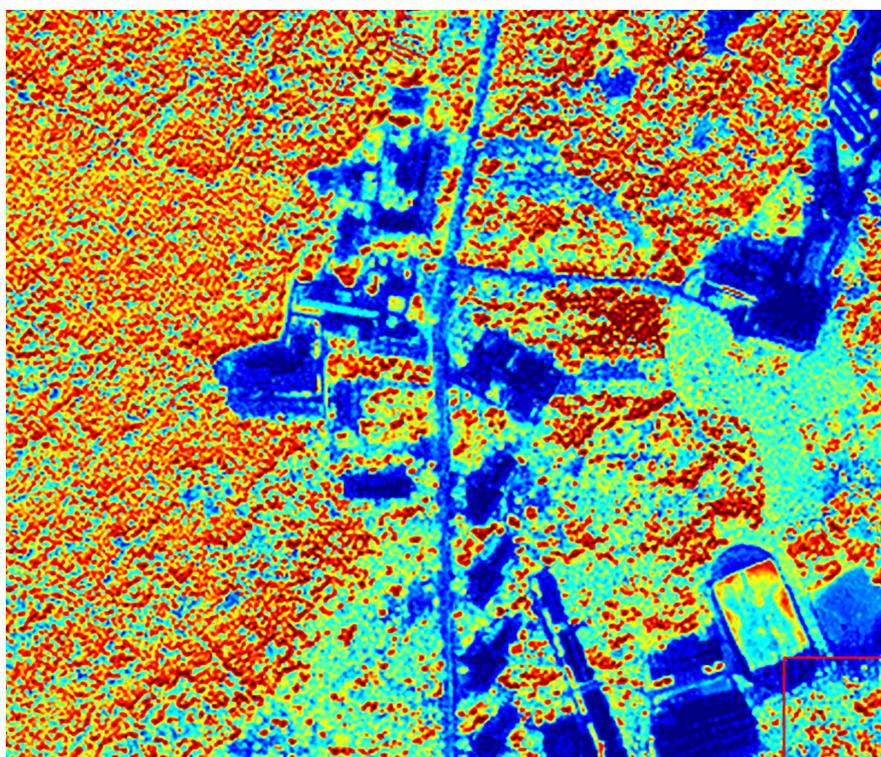


Рис. 7. Космические снимки: индекс NDVI

Fig. 7. Space image: NDVI indice

Преобразование по методу главных компонент улучшает процесс визуального дешифрирования растительности и позволяет разделять лесные массивы на классы по типу растительности (рис. 8).

Основываясь на известных спектральных свойствах различных типов ландшафтов путем визуального (человеко-машинного) дешифрирования, отбираются эталоны, которые являются основой для построения «Дерева решений». Выделяются классы открытой воды, открытого грунта, травяная и кустарниковая растительность, леса с преобладанием хвойных и лиственных пород и другие классы. Затем классы лиственных и хвойных лесов разделяются каждый еще на два класса по яркостям в зеленом спектральном канале, т. е. $Class\ 1 > (b3_{max} - b3_{min})/2$ $Class\ 2 < (b3_{max} - b3_{min})/2$, где $b3_{max}$ – максимальное значение яркости

в 3 (зеленом) канале, $b3_{\min}$ – минимальное значение яркости в 3 канале. Таким образом, данную классификацию нельзя назвать контролируемой. В общей сложности выделяется 11 спектральных классов.

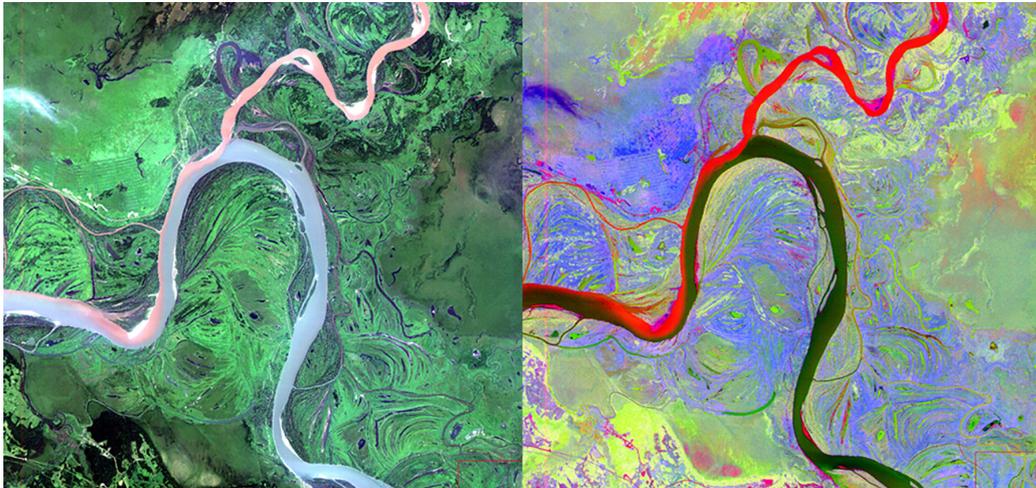


Рис. 8. Преобразование изображений на космических снимках по методу главных компонент

Fig. 8. Recalculation of satellite image using principal component method

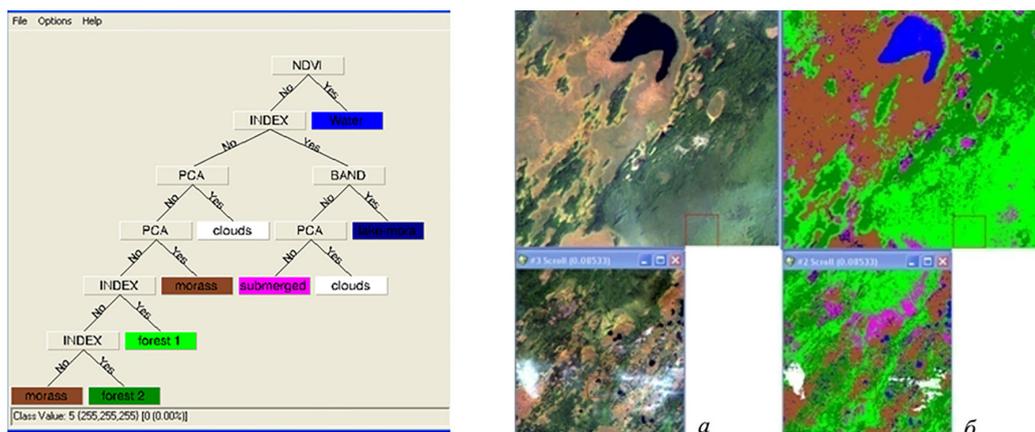


Рис. 9. Структура дерева решений и результат спектральной классификации по алгоритму «дерево решений»

Fig. 9. Structure of decision tree and results of spectral classification using this tree

Как уже было сказано, недостатком использования традиционных методов классификации космических снимков является зависимость спектральной яркости от различных факторов, связанных с условиями съемки, такими как: сезонность, состояние атмосферы, положение носителя, ориентация съемочной камеры, а также ее тип и технические характеристики. Это снижает достоверность дешифрирования и вызывает необходимость выявления и исследования других признаков характеризующих свойства лесной растительности.

Влиянию этих недостатков менее подвержены методы, основанные на использовании структурных признаков. К этим методам относится Фурье и вейвлет-анализ, которые являются мощными средствами обработки данных. Они находят широкое применение в различных сферах, таких как сжатие данных, обработка и синтез различных сигналов, распознавание образов в физике, медицине, стенографии, авиации и других областях.

На рис. 10 представлены изображения фрагментов лесной территории и их Фурье-образы. Видно, что Фурье-образы существенно изменяются в зависимости от типа лесного покрова и соответственно могут служить дешифровочным признаком типовых участков.

На рис. 11 показан пример выделения изменений с помощью вейвлет-анализа.

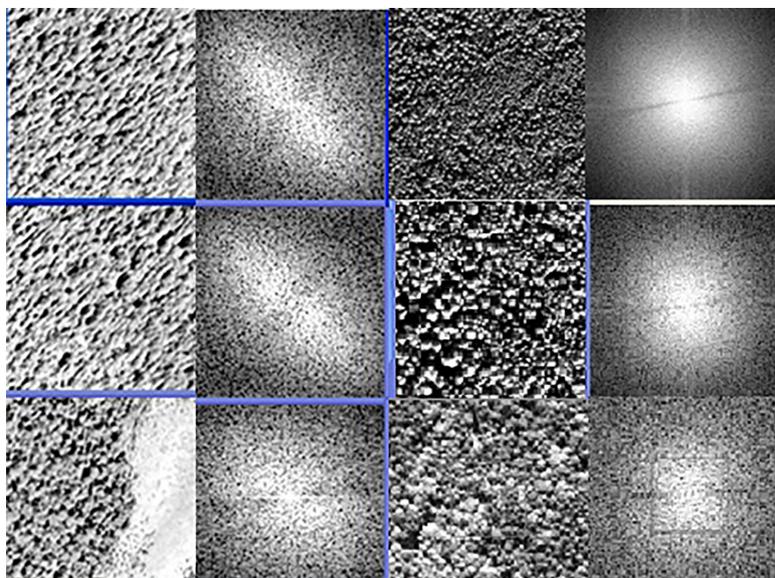


Рис. 10. Изображения фрагментов лесной территории и их Фурье-образы
 Fig. 10. Different forest textures and their Furie-diagrams

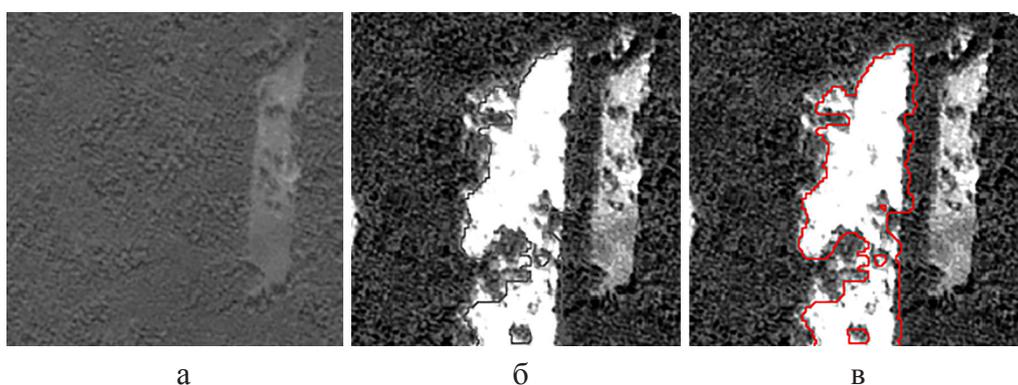


Рис. 11. Автоматизированное выделение изменений методом вейвлет-анализа:
 слева направо – начальное состояние, конечное состояние, оконтуривание изменений
 Fig. 11. Automated change detection using wavelet analysis:
 from left to right – initial condition of territory, final condition of territory, contour of detected changes

Одним из подходов в решении задач автоматизации дешифрования аэрокосмических изображений лесов также является автоматическая объектно-ориентированная сегментация изображений. Для подразделения территории на однородные участки используются алгоритмы объектно-ориентированной сегментации, реализованные в ПК ENVI. Полученные сегменты используются в дальнейшем для интерпретации результатов классификации и размещения пробных площадей.

В данной работе текстурная классификация выполнялась в полуавтоматическом (человеко-машинном) режиме. Вся территория подразделяется визуально на 5 текстурных классов по четвертому (желтому) каналу снимков WorldView-2. Текстурные классы абстрактные, подразделены по степени зернистости изображения (рис. 12, 13).

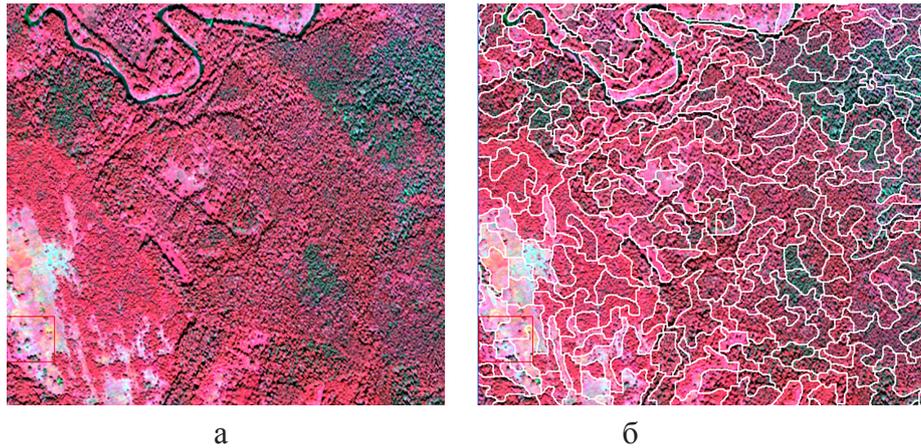


Рис. 12. Автоматизированное разделение лесной территории на сегменты, реализованные в ENVI:

а – исходное изображение; б – сегментированное изображение

Fig. 12. Automated image depiction (similar area detection) using ENVI:
from left to right – source image, detected similar areas

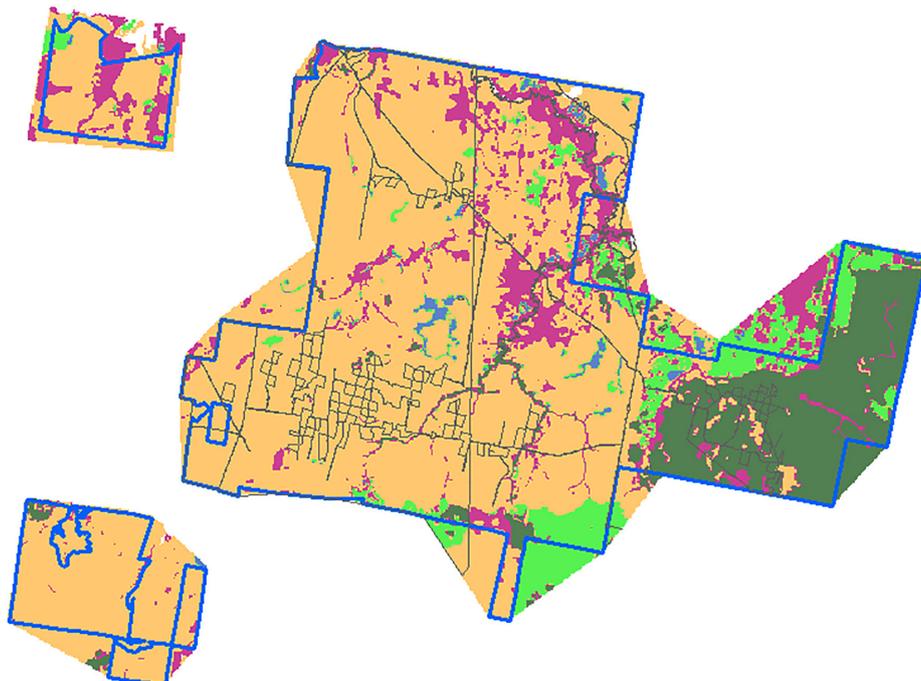


Рис. 13. Результаты полуавтоматической текстурной классификации лесной территории по космическим снимкам WorldView-2

Fig. 13. Results of semi-automatic texture classification of forested land using WorldView2 image

Таким образом, комплексный подход при дешифрировании космических снимков, основанный на совместном использовании методов, базирующихся на анализе спектральных яркостей и методах структурного анализа, можно признать наиболее эффективным при дешифрировании лесных массивов. В настоящее время существует принципиальная возможность определения большинства таксационных показателей земель лесного фонда по космическим снимкам, что позволяет создать автоматизированную систему определения таксационных показателей всех категорий земель лесного фонда по многозональным космическим снимкам высокого и сверхвысокого разрешения.

Этап 4: проведение наземных измерений проведение полевых исследований с закладкой выделов – эталонов для калибровки и контроля полученных данных таксации, осуществленной методом дешифрирования аэросъемки и лазерной локации

Общая вычисленная площадь опытного полигона составила 10 200 га.

Тестовые участки представляют собой ряд пробных площадей, заложенных в натуре с учетом разнообразия насаждений опытного полигона. Таксационно-дешифровочные пробные площади (далее – ТДПП), размером 50 × 50 м, в количестве 8 штук, отграниченные и обозначенные столбами в натуре, опознанные на АФС, заложены по всем преобладающим древесным породам, присутствующим на территории опытного полигона (Кедр, Сосна – 2 штуки, Лиственница, Ель, Пихта, Береза, Осина).

Сопоставление результатов лазерных аэросъемочных измерений проводилось с данными наземных инструментальных измерений на 30 контрольных площадках (КП) – концентрических инвентаризационных кругах пробных площадей постоянного радиуса (12,62 м) и 8 таксационно-дешифровочных пробных площадей, заложенных в Мостовском и Устюгском участковых лесничествах Емельяновского лесничества Красноярского края. Измерения, выполненные на пробных площадях, принимались за истинные.

При дешифрировании снимков специалистами-таксаторами в человеко-машинном режиме были определены контуры лесотаксационных выделов, породный состав лесных насаждений, класс возраста, средняя высота и диаметр древостоя, группа типов леса, класс бонитета, полнота и запас древесины лесных насаждений, категории и состояние не покрытых лесом, лесных и нелесных площадей. В автоматическом режиме актуализировались средние высоты, средние диаметры ствола деревьев и средние возрасты составляющих древесных пород.

На основании полученных данных также в автоматическом режиме актуализировались: средняя высота яруса древостоя, класс возраста и группа возраста преобладающей древесной породы, средний запас древесины лесного насаждения на 1 га, общий запас древесины лесного насаждения и запасы древесины составляющих древесных пород на лесотаксационном выделе. Не актуализировался: состав лесного насаждения, класс бонитета, полнота, тип леса, тип лесорастительных условий, характеристика подроста и подлеска.

Проверка актуализированных показателей производилась путем осуществления логического и натурального контроля. Логический контроль производится путем анализа актуализированных таксационных описаний, при котором проверялась полнота и правильность описания таксационных характеристик лесотаксационных выделов, соответствие значений актуализированных таксационных показателей лесных насаждений друг другу. Натурный контроль производился путем глазомерно-измерительной таксации 30 лесотаксационных выделов каждой из основных лесообразующих древесных пород, отбираемых из актуализированных таксационных описаний методами случайной или систематической выборки, и сравнения полученных результатов с данными актуализации.

Таким образом, контрольные площадки (КП) использовались в качестве итогового эталона проверки качества автоматизированной и интерактивной обработки данных дистанционного зондирования. Наибольшая случайная ошибка определения верхней высоты древостоя по данным лазерной аэросъемки не превысила – 7,8 %. Случайная ошибка для всех случаев находится в пределах – 59,4 см или – 2,1 %.

При сопоставлении повыдельных значений высот, установленных по лазерным данным, с высотами, определенными в процессе таксации на всю территорию экспериментального полигона, были получены следующие результаты (рис. 14).

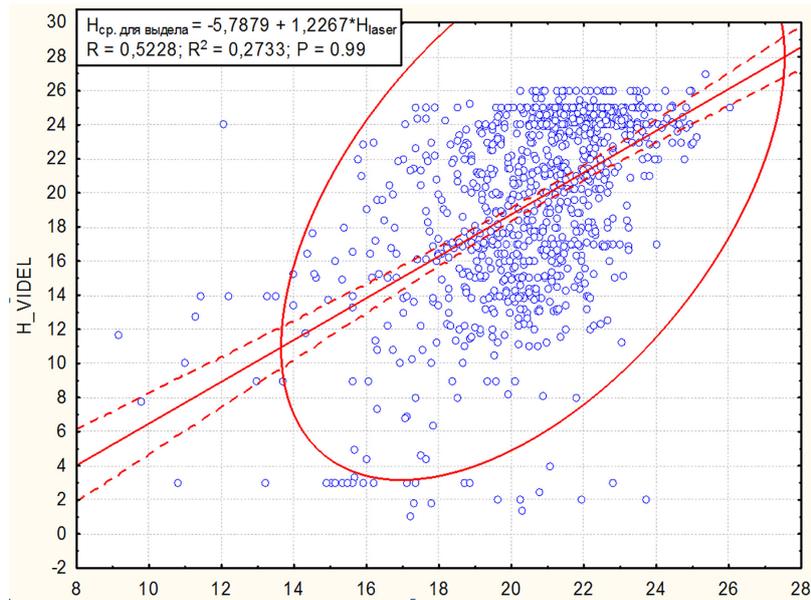


Рис. 14. Зависимость между значениями повыделных высот древостоев, определенных при таксации (978 таксационных выделов) и по лазерным аэроосъемочным данным
 Fig. 14. Correlation between average tree heights in taxation areas (978 areas) measured manually and using LIDAR data

Таким образом, на основании сравнения с наземными измерениями на контрольных площадях можно говорить о высокой степени достоверности измерений параметров древостоя, получаемых по данным лазерного сканирования и автоматизированного дешифрирования породного состава по данным космических многозональных съемок.

Этап 5. Разработка технологии автоматизированного дешифрирования, определения величины таксационных показателей лесных участков по данным цифровой аэроосъемки и лазерной локации. Данные этапов 3 и 4 использовались при расчетах

Автоматизированное определение средней высоты древостоев и площади покрытия древесного полога в ArcGIS по данным лазерной съемки

Исходными данными для автоматизированного определения средней высоты древостоев по данным лазерной съемки в компьютерной программе ArcGIS служат:

1. Растровый слой высот полога, рассчитанный по данным лазерной съемки;
2. Полигональный слой выделов или пробных площадей.

Для поиска локальных максимумов высот в пологе, соответствующих выступающим из полога вершинам деревьев, использовалась функции пространственного анализа «Spatial Analyst» из набора инструментов гидрологического анализа (ESRI ArcGIS, Spatial Analyst tools, Гидрология) (рис. 15).

Методика определения высот древостоев

- Использовалось последовательное применение функций пространственного анализа поверхности, начиная с растрового слоя высот полога [высота полога] в следующем порядке: «Калькулятор растра» – вычисление обращенной высоты полога ([высота полога * (-1)]);
- «Направление стока» (Flow Direction) и «Локальное понижение» (Sink) позволяет получить на входе растровое покрытие размещения локальных максимумов высот полога.
- Затем рассчитываются значения высот локальных максимумов в «Калькуляторе растра»: [Sink] > 0 * [высота полога].

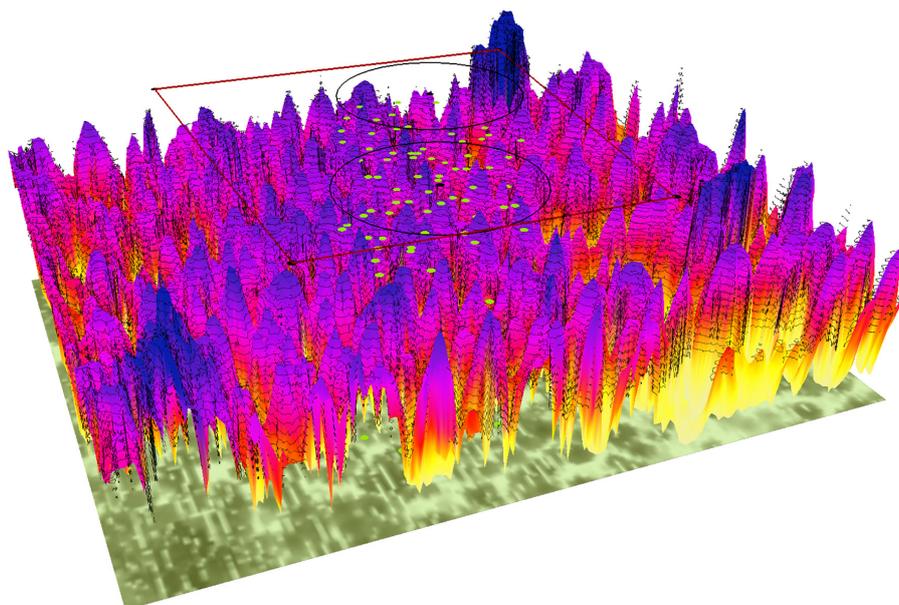


Рис. 15. Трехмерное лазерно-локационное изображение древостоя с наложением границ пробной площади, с маркированными деревьями по материалам наземной инвентаризации

Fig. 15. 3D image of forest made from LIDAR data with overlaid borders of terrestrial test area, points are positions of trees located by terrestrial GPS measurements

– Для слоя выделов или пробных площадей рассчитываются зональные статистики Spatial Analyst «Зональная статистика»: минимальное, максимальное, среднее значения; диапазон и среднеквадратичное отклонение.

– Атрибутивные таблицы полигонов выделов или пробных площадей связываются с таблицей статистик.

– Для каждого выдела или пробной площади вычисляется поле 1/3 высоты от максимальной, вычисленной по статистике выдела.

– Выполняется формирование растрового слоя в "Spatial Analyst": 1/3 высоты от максимальной, вычисленной по статистике выдела.

– Выполняется пересчет статистики для растрового слоя высот в "Spatial Analyst": [высота полога] > [max_h_vydel] / 3

– Расчет растрового слоя высот выполняется в «Калькуляторе раstra»: [Sink] > 1/3 * [максимумы высот].

Исходными данными для автоматизированного определения площади покрытия [Варыгин и др., 2012] древесного полога по данным лазерной съемки в компьютерной программе ArcGIS служат:

1. Растровый слой высот полога, рассчитанный по данным лазерной съемки.
2. Полигональный слой выделов или пробных площадей.

Для поиска локальных максимумов высот в пологе, соответствующих выступающим из полога вершинам деревьев, использовалась функции пространственного анализа "Spatial Analyst" из набора инструментов гидрологического анализа (ESRI ArcGIS, Spatial analyst tools) (рис. 16).

Для слоя выделов или пробных площадей рассчитываются зональные статистики в Spatial Analyst «Зональная статистика» (таблица *.dbf) – общая площадь покрытия для каждого полигона.

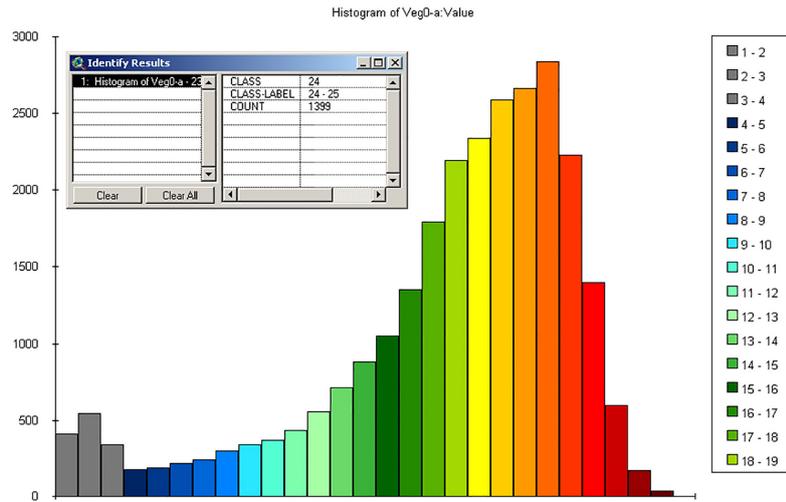


Рис. 16. Гистограмма распределения деревьев по высотам в пределах таксационного выдела

Fig. 16. Histogram of tree height distribution in one of the taxation areas

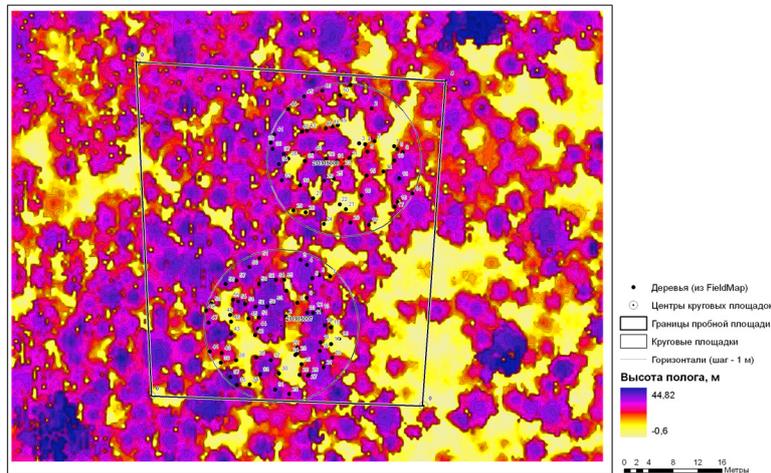


Рис. 17. Автоматически созданное плановое отображение площади проекции древесного полога по лазерно-локационным данным

Fig. 17. 2D image of canopy projections formed automatically using LIDAR data

Взаимосвязи таксационно-дешифровочных показателей древостоев

Определенный интерес представляет изучение закономерных взаимосвязей между таксационными признаками древостоев на опытном полигоне съемки. Данное направление исследований не утратило своей актуальности и по сегодняшний день, в связи с развитием новых методов дистанционного зондирования и моделирования структуры и динамики древесных запасов и фитомассы лесов [Korpela, 2008].

Поиск унифицированных регрессионных зависимостей таксационных показателей древостоев и обобщающих математических моделей для крупных лесных территорий, как показывают предыдущие исследования, является возможным и представляет интерес в связи с интенсивным развитием методов дистанционного зондирования леса и, прежде всего, лазерной локации и цифровой аэро- и космической фотосъемки.

В целях повышения точности определения таксационных признаков древостоев данные взаимосвязи требуют дальнейшего уточнения и конкретизации имеющихся данных в связи с особенностями таксационной и морфологической структуры насаждений и сопоставления

таксационных показателей, дешифрируемых по данным дистанционного зондирования с фактическими данными, полученными путем наземных измерений на пробных площадях.

Ниже приведены некоторые результаты исследований по определению таксационно-дешифровочных показателей древостоев, выполненных на экспериментальном аэросъемочном полигоне в Емельяновском лесничестве Красноярского края.

Исходными данными для расчета обобщенных уравнений (математических моделей) взаимосвязей послужили материалы массовой выборочной глазомерно-измерительной таксации насаждений опытного полигона (около 1,3 тыс. таксационных выделов), местные таблицы хода роста модальных и нормальных древостоев, материалы 8 таксационно-дешифровочных пробных площадей и 30 концентрических инвентаризационных кругов пробных площадей постоянного радиуса (12,62 м), заложенных в границах опытного полигона в период выполнения данной работы.

Предварительно были определены средние диаметры и основные статистики в насаждениях с одинаковой высотой, полнотой и производительностью. Установлено, что изменчивость средних диаметров в однородных по основным таксационным показателям выделах находится в пределах 6–14 %, а с увеличением среднего возраста древостоя варьирование средних диаметров уменьшается. В учет принимались выделы с участием главной породы не менее 3-х единиц в составе. На каждое значение средней высоты и полноты была произведена выборка в количестве не менее 30 вариант средних диаметров древостоев

С использованием пакета программ статистического анализа и обработки экспериментальных данных Statistica 8.0 был выполнен парный корреляционный и многофакторный дисперсионный анализ, который позволил установить следующее:

1. Совместное влияние организованных факторов – средней высоты, полноты и бонитета на средний диаметр древостоев достаточно высоко и составляет 97 % ($R = 0,9847 \pm 0,017$).
2. Влияние средней высоты древостоя на диаметр составило 84 %. Парная связь между признаками прямая, тесная ($R = 0,916 \pm 0,025$).
3. Влияние полноты составило 7,2 %. Парная корреляция обратная, слабая ($R = -0,269 \pm 0,068$). При одинаковых значениях высоты и производительности средний диаметр больше в древостоях с меньшей полнотой. Это явление можно объяснить повышенной энергией прироста по диаметру в разреженных насаждениях, по сравнению с высокополнотными.
4. Влияние производительности (класса бонитета) на средний диаметр древостоя составило 6,4 %. Парная связь между признаками обратная, слабая ($R = -0,2529 \pm 0,066$). При увеличении производительности насаждения и стабилизированных значениях высоты и полноты наблюдается некоторое уменьшение среднего диаметра древостоя.
5. Влияние неучтенных факторов несущественно и составило 3 %. Достоверность влияния организованных признаков установлена на третьем пороге доверительной вероятности ($P = 0,999$).

Апробация полученных уравнений проводилась по материалам 13 пробных площадей, заложенных в Емельяновском лесничестве Институтом леса СО РАН.

При сопоставлении фактических значений средних диаметров и найденных по уравнению систематическая ошибка составила $\pm 0,02$ %, случайная $\pm 5,02$ %, ошибка для всех случаев $\pm 1,3$ % (табл. 3).

При использовании полученных уравнений точность определения средних диаметров древостоев не выходит за допустимые пределы при наземной таксации глазомерным путем и отвечает требованиям Методических указаний по проведению государственной инвентаризации лесов.

Полноту насаждения (P) рекомендуется определять через сомкнутость крон (C), так как эти показатели находятся в тесной корреляционной связи. Так, для чистых по составу,

спелых сосняков III–IV классов бонитета района исследований эта зависимость выражается уравнением:

$$P = 1,75C - 0,07$$

$$R = 0,895; \sigma = 0,050.$$

Таблица 3. Средние диаметры древостоев, фактические и вычисленные
Table 3. Average log diameters: actual and calculated using equations

№ п/п	Состав древостоя	Бонитет	Н, м	Полнота	D _{1,3} , см		Отклонение	
					фактический	вычислен	см	%
1	10С ед., Б, Ос	III	23,6	0,63	31,6	33,0	-1,4	-4,4
2	10С	IV	18,8	0,42	23,9	24,2	-0,3	-1,3
3	10С ед. Е, К	III	24,4	0,73	33,7	34,5	-0,8	-2,4
4	8С2Л ед. К, Е	III	23,1	0,40	33,0	33,7	-0,7	-2,1
5	9С1Л	IV	18,6	0,69	21,7	21,0	0,7	3,2
6	9С1Л ед. Е, Б,	III	23,6	0,79	32,4	31,2	1,2	3,7
7	10С	IV	14,2	0,75	14,8	13,6	1,2	8,1
8	10С + Л	IV	22,6	0,70	29,8	29,6	0,2	0,7
9	9С1Б + К	IV	20,2	0,74	23,2	23,7	-0,5	-2,2
10	10С ед. Б	IV	22,0	0,81	28,3	27,4	0,9	3,2
11	7С3Л ед. К, Е	III	26,2	0,89	34,9	36,8	-1,9	-5,4
12	10С + К, Б	III	14,6	0,80	14,5	13,1	1,4	9,7
13	10С + Л	III	21,5	0,69	28,0	27,3	0,7	2,5

Расчитаны уравнения связи полноты и сомкнутости полога и их табулированные значения для кедровых, сосновых и березовых древостоев района исследований (табл. 4, 5).

Таблица 4. Аналитическое выражение зависимости между полнотой и сомкнутостью крон древостоев
Table 4. Equations between forest density and canopy density

Древесная порода	Уравнение связи	η	F	σ	$C_i \leq C \leq C_1$
Сосна	$P = -0,0043 + 2,0028C - 0,7439C^2$	0,838	4,27	0,077	$0,15 \leq C \leq 0,70$
Кедр	$P = 0,1094 + 1,2684C + 0,1218C^2$	0,686	3,47	0,089	$0,15 \leq C \leq 0,70$
Береза	$P = 0,2548 + 0,8554C + 0,1140C^2$	0,892	5,26	0,052	$0,15 \leq C \leq 0,80$

Примечание. P – относительная полнота; C – сомкнутость крон; η – множественное корреляционное отношение; F – критерий Фишера; σ – среднеквадратическая ошибка уравнения; $C_i \leq C \leq C_1$ – пределы действия уравнения по сомкнутости.

Таблица 5. Полнота насаждений при различных значениях сомкнутости крон
Table 5. Crop density and canopy density comparison

Древесная порода	Сомкнутость крон													
	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80
Сосна	0,28	0,37	0,45	0,53	0,61	0,68	0,75	0,81	0,87	0,93	0,98	1,03	–	–
Кедр	0,30	0,37	0,43	0,50	0,57	0,64	0,70	0,77	0,84	0,91	0,98	1,06	–	–
Береза	0,33	0,43	0,47	0,52	0,57	0,62	0,66	0,71	0,76	0,81	0,86	0,91	0,96	1,01

Сомкнутость крон верхней части полога древостоя рекомендуется определять по данным лазерного сканирования или по цифровым аэро- и космическим снимкам высокого и сверхвысокого разрешения [Суших, 2005; Дворяшин и др., 2011].

Проверка рассчитанного уравнения на тестовых участках, не вошедших в основной материал, показала приемлемую для целей практики точность. Во всех случаях ошибка не превысила 0,1 единицы полноты, что также согласуется с требованиями действующих Методических указаний по инвентаризации лесов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Результаты практической апробации метода авиационной лазерной локации в сочетании с цифровой аэро- и космической фотографической съемкой и спутниковым геопозиционированием, говорят о перспективности использования указанных методов для целей анализа и моделирования структуры и нарушенности лесного покрова, инвентаризации, оперативного экологического мониторинга, информационного обеспечения кадастра лесных земель и контроля лесопользования. Метод обеспечивает дистанционную оценку состояния и динамики лесных ресурсов с высокой эффективностью, при минимуме наземных работ и значительной экономии времени и финансовых средств.

Структура, объемные показатели стволов, запас и фитомасса деревьев и древостоев по лазерно-локационным данным («лазерным портретам» деревьев и древостоев) и цифровым аэрофотоснимкам определяются с достаточной степенью достоверности и точности средствами визуализации и трехмерной компьютерной графики в программной среде ArcGis и моделированием аллометрическими функциями на основе регрессионных связей с морфометрическими показателями деревьев – высотой и диаметром стволов, диаметром и вертикальной протяженностью крон.

При лазерном сканировании лесного покрова оценка запасов древостоев в каждом конкретном случае сводится к определению соотношений между объемами стволов по породам и их высотой и диаметрами крон, которые, в свою очередь, составляют 87–99 % объясненной изменчивости древесного запаса.

При включении в регрессионные модели высот и диаметров крон деревьев остается некоторая доля неучтенного варьирования, что характерно для высоко сомкнутых насаждений, где диаметры крон на «лазерных портретах» древостоев читаются не четко или не полностью. В данных случаях характеристику запаса древостоев – распределение стволов по толщине рекомендуется аппроксимировать через распределение по диаметрам крон [Каплунов, 2001], которым характерна автокорреляция и высокая степень регрессионной сопряженности.

При сравнении расчетных (лазерных) значений запасов древостоев с соответствующими фактическими, определенными по данным измерений на пробных площадях, варьирование оказалось в пределах допусков Методических рекомендаций. Отклонения не превышают 7–10 % от наземных определений. Разброс объясняется варьированием диаметров стволов в сомкнутых насаждениях, где происходит частичная «потеря» отраженных импульсов от крон деревьев низких рангов и подчиненной части полога древостоев. Решение данной проблемы требует проведения научно-исследовательских работ на предмет изучения оптимальности режимов съемки в насаждениях со сложной вертикальной и горизонтальной структурой древесного полога.

ВЫВОДЫ

Применение описанной методики и технологии воздушной лазерной и цифровой аэрофотосъемки, совмещенной со спутниковой навигацией и геопозиционированием, а также с информацией, получаемой со спутниковых цифровых снимков и интегрированных в геоинформационных системах для целей инвентаризации и мониторинга лесов, позволяет с достаточной степенью точности проводить дистанционную таксацию лесов при минимуме наземных работ и значительной экономии времени и материальных средств.

Экономическая эффективность предлагаемого метода обеспечивается достаточной точностью измерений и возможностью их повторимости (проверки), а также значительным снижением трудоемкости и сложности выполнения работ (как полевых, так и камеральных дешифровочных) за счет высокого уровня автоматизации обработки данных, получаемых в процессе лазерной и цифровой аэрофотосъемки. Объем полевых работ при этом значительно сокращается и необходим лишь для калибровки результатов лазерного сканирования, поддержки интерактивного дешифрирования и установления базовых закономерностей изучаемого объекта.

Рекомендуется для более точного и уверенного разделения древостоев на цифровых аэрофотоснимках по породному составу и производительности использовать синтезированные цветные изображения в комбинации – ближний инфракрасный (NIR), крайний красный (RE) и красный (R) каналы аэрофотокамеры. Вместе с тем, определение конкретных параметров диапазонов (длины волны) требует проведения дополнительных исследований и уточнений для различных типов и условий местопроизрастаний и сочетания древесных пород.

Рекомендуется лазерную и цифровую аэрофотосъемку проводить в период активной вегетации и максимального облиствления крон деревьев (полный лист), в конце июня – начале июля и в период максимального солнцестояния по зениту, для того, чтобы избежать существенного затенения снимаемых насаждений и потери информации.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при содействии Института Леса им. М.В. Сукачева.

ACKNOWLEDGEMENTS

The study was performed in a collaboration with Forest Institute, Krasnoyarsk.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Варыгин К.А., Данилин И.М., Рьльский И.А.* Инвентаризация и мониторинг лесов на основе лазерной локации, цифровой аэро- и космической фотосъемки и спутникового геопозиционирования // Материалы третьей Междунар. практ. конф. по лесоустройству. Новосибирск, 2012. С. 56.
2. *Данилин И.М., Фаворская М.Н.* Моделирование структуры лесного покрова и рельефа местности по данным лазерной локации // Лесная таксация и лесоустройство. Междунар. науч.-практ. журнал. 2011. № 1–2. С. 40–47.
3. *Дворяшин М.В., Скудин В.М., Корец М.А.* Аэрокосмические методы мониторинга лесных территорий. Опыт применения в Восточной Сибири. Красноярск.: Литера-Принт, 2011. 152 с.
4. *Каплунов В.Я.* Сопряженность распределений деревьев по поперечнику крон и диаметру стволов // Лесоведение. 2001. № 3. С. 63–69.
5. *Малеванная М.С., Рьльский И.А.* Наземные лазерные методы – новые подходы к информационному обеспечению географических исследований // Геодезия и картография. М., 2014. Т. 5, № 4. С. 23–34.
6. *Медведев Е.М., Данилин И.М., Мельников С.Р.* Лазерная локация земли и леса: Учебное пособие. 2-е изд. М.: Геокосмос, 2007. 229 с.
7. *Капралов Е.Г., Кошкарев А.В., Тикунов В.С.* / Под ред. В.С. Тикунова. Основы геоинформатики. Учебное пособие для студентов вузов в 2-х книгах. М.: Академия, 2004. 480 с.
8. *Рьльский И.А.* Лазерное сканирование и космическая съемка – соревнование или партнерство // Геоматика. М., 2016. № 1. С. 15–18.
9. *Сухих В.И.* Аэрокосмические методы в лесном хозяйстве и ландшафтном строительстве // Учебник для вузов. Йошкар-Ола: Изд-во МарГТУ, 2005. 392 с.

10. *Тикуннов В.С., Рылский И.А.* Перспективы использования комплексов воздушного лазерного сканирования для картографирования лесов // Известия Иркутского государственного университета. Сер. Науки о земле. 2016. Т. 15, № 2073–3402. С. 104–113.
11. *Тикуннов В.С., Капралов Е.Г., Кравцова В.И., Лурье И.К., Ильясов А.К., Рылский И.А.* Информатика в географии, экологии и природопользовании. М.: Академия, 2013. 572 с.
12. *Chen Q.* Airborne lidar data processing and information extraction // Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. 2007. V. 73, No 2. P. 109–112.
13. *Holmgren A., Persson J.* Identifying species of individual trees using airborne laser scanner // Remote Sensing of Environment. 2004. V. 90, No 4. P. 415–423.
14. *Korpela I.* Mapping of understory lichens with airborne discrete-return LiDAR data // Remote Sensing of Environment. 2008. V. 112, No 10. P. 3891–3897.
15. *Soille P.* Morphological Image Analysis: Principles and Applications. 2nd edition. Springer-Verlag, Berlin, Germany, 2003.

REFERENCES

1. *Chen Q.* Airborne lidar data processing and information extraction. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. 2007. V. 73, No 2. P. 109–112.
2. *Danilin I.M., Favorskaya M.N.* Using LIDAR for modelling forest structure and DEM. Lesnaya taksacia I lesoustroystvo. 2011. No 1–2. P. 40–47 (in Russian).
3. *Dvoriashin M.V., Skudin V.M., Korez M.A.* Aerospace methods of monitoring for forested areas. Krasnoyarsk: Litera-Print, 2011. 152 p. (in Russian).
4. *Holmgren A., Persson J.* Identifying species of individual trees using airborne laser scanner. Remote Sensing of Environment. 2004. V. 90, No 4. P. 415–423.
5. *Kaplunov V.Y.* Contingency of tree distribution by log and canopy diameters. Lesovedenie. 2001. No 3. P. 63–69 (in Russian).
6. *Kapralov E.G., Koshkarev A.V., Tikunov V.S.* Osnovy geoinformatiki. M.: Akademia, 2004. 480 p. (in Russian).
7. *Korpela I.* Mapping of understory lichens with airborne discrete-return LiDAR data. Remote Sensing of Environment. 2008. V. 112, No 10. P. 3891–3897.
8. *Malevannaya M.S., Rylskiy I.A.* Terrestrial laser scanning methods – new approaches to information provision of geographic researches. Geodezia I cartographia. M., 2014. V. 5, No 4. P. 23–34 (in Russian).
9. *Medvedev E.M., Danilin I.M., Melnikov S.R.* Laser scanning of land and forests. M.: Geokosmos, 2007. 229 p. (in Russian).
10. *Rylskiy I.A.* Laser scanning and satellite imagery – competition or partnership. Geomatika. M., 2016. No 1. P. 15–18 (in Russian).
11. *Soille P.* Morphological Image Analysis: Principles and Applications. 2nd edition, Springer-Verlag, Berlin, Germany, 2003.
12. *Sukhih V.I.* Aerospace methods in forest industry and landscape installation. Yoshkar-Ola: Izdatelstvo MarGTU, 2005. 392 p. (in Russian).
13. *Tikunov V.S., Kapralov E.G., Kravtsova V.I., Lurie I.K., Iliasov A.K., Rylskiy I.A.* Informatics in geography, ecology and environmental management. M.: Akademia, 2013. 572 p. (in Russian).
14. *Tikunov V.S., Rylskiy I.A.* Perspectives of using airborne laser scanning systems for forest mapping. Izvestia Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Seria Nauki o zemle. 2016. V. 15, No 2073–3402. P. 104–113 (in Russian).
15. *Varygin K.A., Danilin I.M., Rylskiy I.A.* Inventarization and forest monitoring using LIDAR, aerospace imagery and global navigation systems. Materialy 3 Mejdunarodnoy prakticheskoy konferencii po lesoustroystvu. Novosibirsk, 2012. P. 56 (in Russian).