

Электронный архив УГЛТА



6 9
6 8

В.А. УСОЛЦЕВ

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И ФИТОМАССЫ
ЛЕСНОГО ПОЛОГА ПУТЕМ ЛАЗЕРНОГО
ЗОНДИРОВАНИЯ

ЕКАТЕРИНБУРГ 1996

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ ПО ВЫСШЕМУ
ОБРАЗОВАНИЮ
УРАЛЬСКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ ЛЕСОТЕХНИЧЕСКАЯ АКАДЕМИЯ
КАФЕДРА ЛЕСНОЙ ТАКСАЦИИ И ЛЕСОУСТРОЙСТВА

В.А. Усольцев

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И ФИТОМАССЫ
ЛЕСНОГО ПОЛОГА ПУТЕМ ЛАЗЕРНОГО
ЗОНДИРОВАНИЯ

Екатеринбург 1996

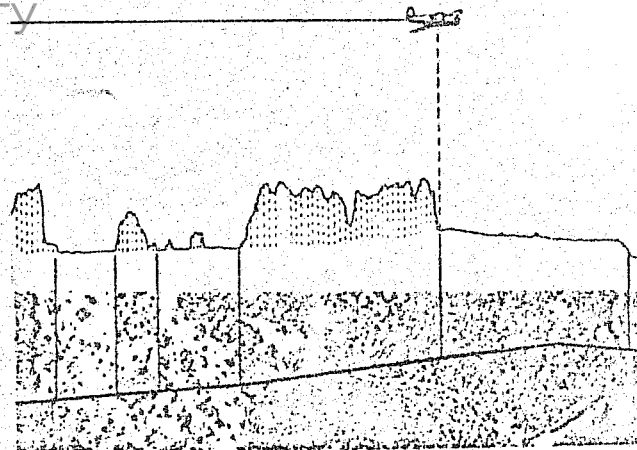
Рассмотрено и рекомендовано методической комиссией лесохозяйственного факультета. Протокол № 4 от 28 февраля 1996 г.

Рецензенты: Ученый секретарь Института леса УрО РАН, кандидат с.-х. наук, доцент Галако В.А. и доцент кафедры физики УГЛТУ, кандидат ф.-м. наук, доцент Летучев В.В.

Редактор: автор В.А.Усольцев

Подписано в печать 13.03. 1996 Формат 50x84 1/16
 Плоская печать Объем 6,51 п.л. Тираж 100
 Заказ № 275 Цена 10900 р.

Редакционно-издательский отдел УГЛТУ.
 Ротапринт УГЛТУ



ВВЕДЕНИЕ

Экологический мониторинг и реализация экологических программ различного уровня сопряжены с изучением биологической продуктивности лесов (Усольцев, 1993, 1994, 1995 а-в). Однако из-за высокой трудоемкости наземных способов оценки фитомассы лесов в настоящее время еще нет достаточного объема экспериментальных данных, которые позволили бы объективно оценить ресурсные и средообразующие возможности лесов в различных регионах страны. Для практической реализации этих задач представляются перспективными дистанционные методы, базирующиеся на интерпретации аэрокосмической информации в различных диапазонах видимого и инфракрасного спектров, а также радиолокационное и лазерное зондирование.

Последний из перечисленных методов особенно перспективен. Национальное управление аэрокосмических исследований США (НАСА) проводит широкие исследования по использованию данных лазерного зондирования для оценки фитомассы растительного покрова земли (Nelson et al., 1988 b). Эти оценки являются частью обширной программы НАСА по глобальному выживанию, посвященной изучению динамики глобальных изменений. Основные аспекты глобального выживания включают измерение количества рас-

тительного материала, а также темпы изменения запасов фитомассы и их географические закономерности.

Открытие лазеров явилось одним из величайших научных событий второй половины XX века и символизировало собой новую революцию в технике и технологии. Используя исторические аналогии, можно сказать, что за эпохой пара, а затем электричества наступает эпоха лазера и лазерной энергии. Сегодня нет области человеческой деятельности, где бы лазеры не могли найти применения, темпы роста лазерной индустрии принимают взрывной характер (20-50% в год), поэтому XXI век можно будет назвать веком лазеров (Басов, Катулин, 1989).

Впервые вопрос о квантовом взаимодействии между светом и средой был рассмотрен в 1917 году А. Эйнштейном, который показал, что между средой (состоящей из молекул, атомов и электронов) и светом постоянно происходит обмен энергией путем порождения одних и уничтожения других квантов света. Среды могут поглощать, рассеивать и излучать, причем излучение может быть как самопроизвольным, так и вынужденным (стимулированным). А. Эйнштейн показал, что для получения стимулированного излучения (лежащего в основе работы лазеров) среду необходимо перевести из равновесного энергетического состояния в неравновесное, т.е. сообщить ей дополнительную энергию. Возможность получения неравновесных состояний была впервые теоретически сформулирована в 1940 году российским физиком В.А. Фабрикантом, которому принадлежит приоритет открытия квантовых генераторов и усилителей света (Федоров, Гордон, 1967).

Во времена А. Эйнштейна его идеи не могли быть реализованы, поскольку общество по своему научно-техническому потенциалу не было готово к этому, и первые лазеры появились примерно через полвека в 1960 году, почти одновременно в СССР и США. В октябре 1964 г. решением Шведской академии наук российским ученым Н.Г. Басову и А.М. Прохорову, а также американскому ученому Ч. Таунсу была присуждена Нобелевская премия по физике за исследования в области квантовой электроники.

Лазер получил название от начальных букв английской фразы Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (т.е. усиление света при помощи вынужденного излучения) и

представляет собой оптический квантовый генератор. За рубежом находят также применение более широкий по смыслу термин - мазер (Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation, т.е. усиление микроволн при помощи вынужденного излучения), под которым понимают квантовые генераторы широкого диапазона электромагнитного излучения, включая радиоволны (Федоров, Гордон, 1967). В лазере использовано свойство резонансного перехода возбужденных частиц с одного энергетического уровня на другой. Лазер - это генератор, в котором роль колебательного контура электронной лампы и цепи обратной связи играют атомы активного вещества (твердого, жидкого или газообразного), возбуждаемые тем или иным способом (накачкой), а также зеркала, выполняющие функции резонатора.

Отличительная особенность лазера состоит в том, что он на основе квантовых законов преобразует любую энергию (соответственно электрическая, тепловая, световая, химическая, ядерная накачка) в более качественную энергию когерентного светового луча видимого и невидимого диапазонов. Лазерный луч близок к параллельному и одночастотному. Это позволяет фокусировать лазерный пучок на площадку размером порядка длины волны излучения (микрон), что дает возможность сосредоточить на этой площадке потоки колоссальной плотности - до $10^{12}-10^{20}$ Вт/см² (Басов, Катулин, 1989), способные мгновенно испарить любые существующие материалы.

Атомы и молекулы, из которых состоит любое вещество, являются источниками электромагнитных волн разной длины - коротких ультрафиолетовых, световых, более длинных инфракрасных и еще более длинных, вплоть до радиоволн. Естественные радиоволны и световые волны, излучаемые нагретыми телами, имеют слабый эффект и хаотический, шумовой характер. Возникновение на выходе неравновесной системы значительного по мощности и узкополосного по спектру излучения стало возможным благодаря тому, что колебания волн с помощью квантовых генераторов становились когерентными, т.е. строго регулярными, постоянными по амплитуде, фазе и поляризации.

Сейчас в лазерной технологии наиболее распространены газовые и твердотельные на стекле и кристаллах лазеры как неп-

рерывного, так и импульсно-периодического действия. Наиболее широкое распространение в промышленности получили две области применения лазеров - технологические процессы (термообработка металлов, сварка, резка и сверление различных материалов) и системы измерения и контроля (оптические дальномеры и дальнометры, анализаторы атмосферного загрязнения, голографическая диагностика качества материалов, контроль размеров и линейных перемещений, основанный на явлениях интерференции и дифракции и эффекта Доплера). Лазеры применяются также в военном деле, медицине, связи, информатике и других многочисленных отраслях.

Применительно к лесоводственным задачам представляется возможным исследовать с помощью лазерных анализаторов (Григорьянц, 1975) качественные характеристики лесного покрова, в частности содержание микроэлементов, хлорофилла, каротиноидов и других пигментов, связанных с физиологической активностью и биопродукционным процессом. Сегодня ведутся исследования текстуры кроны с учетом свойств деполяризации (Kalshoven, Davley, 1988, 1990) и изучения особенностей флуоресценции хлорофилла, характеризующей физиологическое состояние растительности (Noge et al., 1983; Chappelle, Williams, 1987).

Существенно более развито лазерное зондирование лесного полога с целью получения его количественных характеристик. Непосредственное отношение к исследованию таких характеристик имеют лазерные дальнометры. С их помощью можно с борта авианосителя получать наборы профилограмм и определять пространственные параметры лесного полога и связанные с ними показатели биопродуктивности и запасов фитомассы растительного покрова.

При написании работы мы уходим от анализа конструктивных и функциональных особенностей лазерной техники, уступая это поле деятельности физикам. Основное внимание уделено технологии и методическим приемам использования лазеров в лесном хозяйстве с целью получения достоверной информации о структуре и фитомассе лесного полога.

УСТАНОВЛЕНИЕ И СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ЛАЗЕРНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Бортовые радиолокационные и лазерные системы дают возможность оперативной оценки высоты древостоев, запасов стволовой древесины и фитомассы лесов на больших площадях. Интерпретация данных любого дистанционного зондирования земной поверхности связана с проведением большого объема наземных работ. В России эти наземные работы, ориентированные на лазерную таксацию лесов, получили приоритетное развитие еще до появления бортовых лазеров. Это, главным образом, исследования, проведенные в Санкт-Петербургском НИИ лесного хозяйства (Солодухин и др., 1976, 1977а, б, 1978, 1985). Цель этих исследований состояла в имитации (получении аналогов) профилограмм случайных вертикальных сечений древостоев, установлении связи характеристик профилограмм с таксационными показателями и оценке ошибок определения последних по данным профилограмм - без использования самолетного лазерного профилометра.

1.1. НАЧАЛЬНЫЙ ЭТАП РАДИОЛОКАЦИОННОГО И ЛАЗЕРНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ.

Последние 25 лет характеризуются существенными технологическими достижениями в электронном авиаоборудовании и в разработке бортовых приемо-передающих устройств. Из них особый интерес для картографической съемки представляет дистанционные лазерные и радиолокационные системы. Бортовые системы радарного и лазерного картографирования имеют два основных компонента: высотомер, точно измеряющий расстояние от самолета до отражающей поверхности, и позиционную систему, регистрирующую продольные и поперечные наклоны самолета, его вертикальное положение и ориентацию, так чтобы выход высотомера был "привязан" к высотным отметкам земной поверхности. Если отражающая поверхность, встречаемая испускаемым сигналом, имеет дисперсный характер (лесной полог) или относительно прозрачна (водяная поверхность), то может быть получена информация о второй отражающей поверхности (земли под пологом или дна водного бассейна).

Дистанционные бортовые системы (профилометры) выполняют роль двойного рода: 1) использование данных дистанционного зондирования с целью контроля других сенсоров и 2) извлечение полезной информации о ресурсах непосредственно из потока возвращенных сигналов. Примером первого приложения является использование бортового радарного профилометра, обеспечивающего стереофотограмметрические (СФГ) модели либо триангуляционные геодезические сети вспомогательными контрольными данными. Второе приложение широко представлено использованием вертикальных профилей для характеристики морских ледовых полей и рельефа морского дна, земной поверхности и лесного покрова.

Однако при топографическом картировании лесной покров часто представляет серьезную помеху для точного профилирования земной поверхности вследствие большого расхода энергии на прохождение импульсов сквозь древесный полог и ее нехватки для регистрации сигнала, отраженного от поверхности земли. Радарные высотомеры, применяемые в качестве вспомогательного средства посадки самолетов, фактически, по понятным причинам, были специально предназначены для локации вершин деревьев.

Применительно к лесоводственным задачам, когда деревья становятся первичным объектом, важны показания высотных отметок земной поверхности и лесного полога одновременно, что иногда называют "двойным отражением" (double return) или "двойным следом" (double trace) (рис. 1). Запись таких двойных отражений дает ценную информацию непосредственно о высоте древостоя, сомкнутости полога и, возможно, о породном составе, а также косвенно, через корреляцию с массообразующими показателями, о запасе стволовой древесины и фитомассы древостоя. Эта информация является основной при съемке лесного покрова и в



Рис. 1. Запись двойного следа радара профили лесного полога и земной поверхности (Aldred, Bonnor, 1985).

настоящее время ее получают обычно путем очень трудоемкого ручного дешифрирования аэрофотоснимков и полевого обследования. Высоту древостоя, основной показатель лесного полога, в загущенных древостоях умеренной полосы, а также в тропических лесах измерить радаром обычно невозможно, а при дешифрировании среднемасштабных аэрофотоснимков определение высоты в таких случаях сопровождается ошибкой $\pm 5-8$ м (Nielsen, 1971).

В начале 1960-х получили развитие бортовые профилографы на базе радарных высотомеров для получения данных высотного контроля при средне- и мелкомасштабном картографировании. Примерно в это же время для таксации деревьев стали применять фотосъемку крон деревьев с низкой высоты. При этом на момент экспозиции требовалось знать расстояние от самолета до земли. Это расстояние было необходимо для определения масштаба СФГ-модели, используемой для измерения некоторых параметров дерева (например, высоты, объема или фитомассы). В качестве вариантов рассматривалось использование одвоенной камеры с известным базовым расстоянием, радарного высотомера и лазерного дальномера. Принцип одвоенной камеры был реализован в вертолетном варианте в Британской Колумбии (Lusby, 1967) и примерно в это же время Национальным исследовательским советом Канадской лесной службы был разработан и позднее изготовлен низковисотный радарный высотомер с проникающим сквозь полог сигналом (Aldred, Sayn-Wittgenstein, 1968 a; Nielsen, 1970). В то время лазеры были очень громоздкими и энергоемкими, но тем не менее считались перспективными, поскольку технология развивалась и инструментарий становился все компактнее, легче и дешевле.

Производственная модель низковисотного радарного высотомера обычно удовлетворяла требуемой точности ($\pm 2\%$ от высоты полета на 95-процентном уровне) и обеспечивала устойчивое прохождение сигнала сквозь полог лесов северной части умеренной зоны (Nielsen, 1974a). Впервые радарный высотомер был проверен в условиях тропических лесов в Гватемале, где выявились проблемы с прохождением сигнала сквозь лесной полог (Aldred, Sayn-Wittgenstein, 1968b). Были предприняты две попытки преодолеть это затруднение в Суринаме и Коста Рике (Nielsen, 1974b; Nielsen, Aldred, 1978). Проблема заключа-

лась в получении неустойчивых результатов, отчасти вследствие устаревшей, ненадежной технологии радарной съемки. Возможность получения "двойного следа" от полога и земной поверхности была исследована в Коста-Рике, но точность оценки высоты полога была не установлена. Причины неустойчивых результатов были обусловлены техникой выборочного учета и совмещения данных, а также влиянием разреженности крош полога, которая не обеспечивала отражения радарного сигнала достаточной мощности (Nielsen, Aldred, 1978).

В России проведены эксперименты по радиолокационной съемке лесопокрываемых площадей в линейном поляризованном базисе и исследованы вопросы контурного дешифрирования радиолокационных изображений. Установлено, что радиолокационное зондирование дает возможность выделить наиболее информативные массообразующие признаки древостоя и определить его породный состав (Першиков, 1982; Першиков, Анферов, 1968).

1.2. ПРИМЕНЕНИЕ ЛАЗЕРА НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ.

В середине 1960-х были начаты исследования с применением лазерных дальнометрических устройств, адаптированных к борту авианосителя (Rempel, Parker, 1964). Адаптация состояла в применении мощных лазеров, способных реагировать на энергию лазерного сигнала, отраженного от естественных поверхностей, а не от зеркал или ретроотражателей; обычно используемых при наземных измерениях расстояний. Бортовая адаптация включала также вертикальную ориентацию лазера и применение графопостроителей, способных оперировать с большими объемами информации, получаемой в течение полета.

Последовательное измерение высот по курсу полета (профилирование) с помощью лазера предполагает два способа и, соответственно, две различные лазерные технологии, основанные на непрерывном и импульсно-периодическом действии. На рис. 2 дана схема действия лазерного высотомера по принципу измерения фазового сдвига непрерывной волны. Луч непрерывного лазера модулирован по амплитуде на определенной частоте, подбираемой в зависимости от желаемой разрешающей способности. Перед испусканием на объект модулированный луч пропускается через

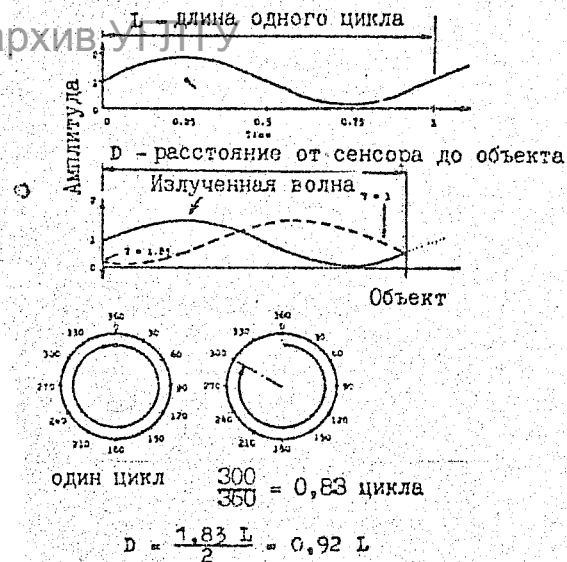


Рис. 2. Схема определения расстояния лазером непрерывного действия по фазовому сдвигу непрерывной волны (Link, Collins, 1981).

систему линз, а по его возвращении принимается телескопом с низкочастотным фильтром и затем с помощью детектора превращается в электрический сигнал. Для определения расстояния до отражающей поверхности фаза возвращенного сигнала сопоставляется с фазой переданного сигнала. По результату сравнения рассчитывается время, прошедшее между испусканием и возвращением сигнала, и соответствующее расстояние (рис. 2).

Детальные исследования свойств гелий-неонового газового лазера, основанного на принципах измерения фазового сдвига волны, проводила армия США (Link, 1973). Целью исследования военных было установить возможности применения лазерного профилометра для быстрой регистрации уклонов и неровностей местности, а также наличия препятствий на предполагаемых неподготовленных местах приземления. Бортовой лазер непрерывного действия применялся также для профилирования морских льдов (Тома, Таскер, 1975; Ниблер, 1975; Кирби, Саттон, 1981).

Другое применение лазерного профилометра непрерывного действия состояло в картографировании различных категорий земной поверхности (открытый грунт, речная сеть, микрорельеф,

травяной покров, зерновые культуры, пашни, древесной и т.д. (Reaper, Parker, 1964; Link, 1969). В Австралии лазер использовали при изготовлении серии топокарт масштаба 1:100000 для контроля вертикальных отметок, полученных ОПГ-способом. Применен непрерывный аргоновый лазер с длиной волны 488 нанометров (нм) ($1 \text{ нм} = 10^9 \text{ м}$). При высоте полета 2000 м размер лазерного пятна был 30 см. Точность определения высотных отметок $\pm 0,5 \text{ м}$ (Link, Collins, 1981). При картографировании земной поверхности важную роль выполняет бортовая позиционная система (баросенсоры, гиросенсоры, трехмерная микроволновая и инерционная навигационная системы, в том числе с использованием навигационных спутников). При картировании земной поверхности используется способность лазера проникать сквозь растительный слой и получать высотные отметки земной поверхности, лежащей под сплошным пологом растительности. В этом контексте растительность находилась на пути лазерного импульса и являлась источником шума при расчете высотных отметок по лазерному профилю.

В 1973 г. Канадская лесная служба опробовала аналогичный гелий-неоновый лазер непрерывного действия для оценки возможностей его применения в лесном хозяйстве. Велось тестирование измеренных высот как с земли, так и с воздуха. Было установлено, что точность измерений ($\pm 30 \text{ см}$) превышала уровень требований лесного хозяйства, однако сигнал достигал земли лишь в некоторых разрезах полога. Поэтому встречались участки протяженностью несколько сот метров без единого сигнала, отраженного от земной поверхности. В холмистой местности было невозможно определить высотные отметки земли и, следовательно, высоту древостоя. Образец профиля смешанного хвойно-лиственного древостоя, полученного лазером непрерывного действия, показан на рис. 3 (Aldred, Wonnor, 1985).

Х.Ари с соавт. (Ari et al., 1982) применили гелий-неоновый лазер непрерывного действия с длиной волны 633 нм при топографическом картировании бассейна р. Каура в условиях недоступных тропических лесов Венесуэлы. Основное внимание было сосредоточено на получении высотных отметок земли и лесной полог рассматривался как помеха этому. Главной проблемой



Рис.3. Образец записи высотных отметок полога смешанного хвойно-лиственного древостоя и поверхности земли, полученной лазерным профилометром непрерывного действия.

было получение достаточного количества проникающих сигналов, отраженных от поверхности земли. В густых многоярусных тропических лесах "окон" в пологе было существенно меньше, чем в лесах умеренной зоны.

1.3. ПРИМЕНЕНИЕ ИМПУЛЬСНО-ПЕРИОДИЧЕСКОГО ЛАЗЕРА.

Более точное определение высотного профиля древостоя обеспечивается импульсно-периодическими лазерами, которые в конце 1960-х начали применяться на авианосителях и в настоящее время преобладают при лазерном зондировании земной поверхности и лесного полога.

1.3.1. Импульсно-периодический лазерный дальномер

Принцип работы импульсно-периодического лазерного дальномера прост. Генерируется кратковременный, от 5 до 10 наносекунд (нсек), лазерный импульс, который в виде относительно узкого луча передается от излучателя к объекту. Импульс отражается от объекта и возвращается к приемнику. Импульс регистрируется приемным устройством. Измеряется временной промежуток между начальным импульсом и его отражением и через скорость света переводится на расстояние. Поскольку скорость света составляет около 300000 км/сек., точность измерения временного интервала должна быть в пределах 1 нсек., эквивалентной расстоянию около 30 см. Принцип работы показан на рис. 4 и 5. Чем точнее распознаются пики передаваемого и воз-

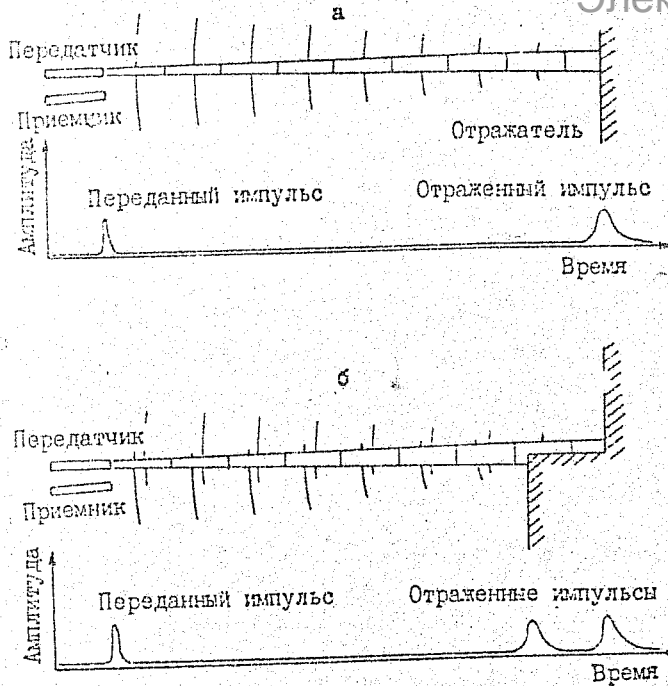


Рис.4. Схема регистрации времени испускания и приема лазерного импульса: отражение энергии а) от отдельной плоской поверхности и б) от двухуровневого объекта (Aldred, Bonnor, 1985).

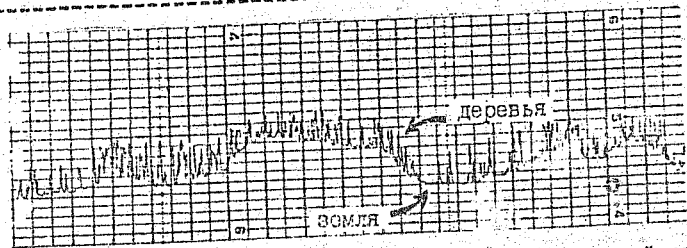


Рис.6. Образец распечатки высотных отметок полога хвойного древостоя и подстилающей земной поверхности, полученной импульсно-периодическим лазерным профилометром (Aldred, Bonnor, 1985).

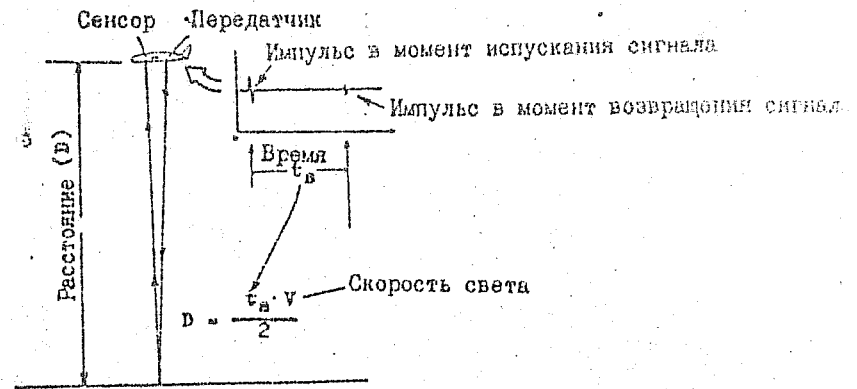


Рис.5. Схема определения расстояния до объекта импульсно-периодическим лазером (Link, Collins, 1981).

вращенного импульсов, тем более точен замер расстояния. Ошибка измерения расстояний до земной поверхности импульсно-периодическим лазером может быть на уровне 12-27 см (Krabill et al., 1984). Применение импульсно-периодического лазера было успешным в различных областях: при разведке ледовых полей (Lowry, Brochu, 1975), при топографическом картировании, съемке микрорельефа и оценке доступности территорий (Collins, 1979; Link, Collins, 1981; Krabill et al., 1984), в гидрографических исследованиях (Ebnadit, 1979) и получении высотного спектра океанских волн, позволяющего определять преобладающую высоту, длину и направление волн (Link, Collins, 1981). Пример использования такой системы в качестве профилометра показан на рис. 6.

1.3.2. Лидар-лазерная система двойного действия.

Процедура профилирования (картографирования) открытой земной поверхности намного проще, чем поверхности, находящейся под пологом леса или под водой. В последних случаях лазер-

	Δt - время прохождения импульса от самолета до цели и обратно (нсек.)	Расстояние от самолета до цели (м)
первичный	I011	152
вторичный	I041	157
вторичный	I103	166
вторичный	I133	171

Рис. 7. Схема множественного отражения отдельного импульса от полога высотой 18 м (Nelson et al., 1983b).

ный импульс отражается от двух и более объектов, и, таким образом, один исходящий импульс имеет несколько отражений (рис. 4, 6 и 7). Количество исходящих импульсов в секунду может значительно варьировать. При низких частотах пульсаций обеспечивается большая мощность излучения, однако в этом случае на единицу длины профильной линии приходится меньшее число измерений. Более высокие частоты дают лучшее пространственное разрешение, но требуются большие затраты энергии и более сложные системы регистрации и обработки сигналов. Обычно принимается частота пульсаций в пределах от 10 до 1000 в секунду.

Важный вопрос в применении импульсно-периодических лазеров - оптимизация длины волны излучения, которая определяется выбором активной среды - того или иного газа в газовом лазере либо кристалла - в твердотельном. Для измерения расстояний в лесном пологе или в воде необходим лазер, работающий в сине-зеленой области видимого спектра с длиной волны от 500 до 550 нм, обеспечивающий прохождение импульса сквозь дисперсные и полупрозрачные среды. В этом диапазоне эффективно работают неоновые лазеры и лазеры на алюмоиттриевом гранате с неодимом. При профилировании земной поверхности лучшие результаты обеспечиваются при большей длине волны, т.е.

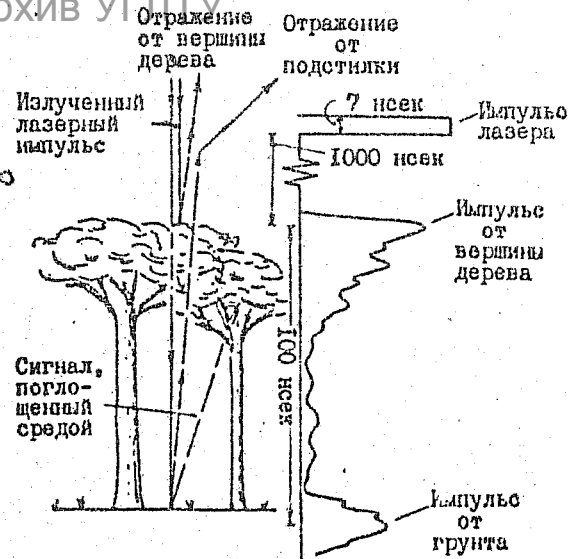


Рис. 8. Схема множественного отражения лазерного импульса от полога леса в зеленом и инфракрасном спектрах (Link, Collins, 1981).

получают тот же эффект при меньшей выходной мощности. При использовании твердотельных лазеров в ближней инфракрасной области спектра (1064 нм) можно получить 16-кратное увеличение энергии отраженного сигнала. Однако выходная мощность при стенке земной поверхности обычно ограничивается из соображений безопасности для зрения.

Наличие упомянутой "ярусности" наземных объектов стимулировало развитие импульсно-периодического лазера двойного действия, позволяющего регистрировать не только расстояние до ближайшего объекта (вершины деревьев, водная поверхность) в инфракрасной области спектра (инфракрасный лазер), но и регистрировать форму волны отраженного импульса (зеленый лазер) с помощью пропускающего дигитайзера (рис. 8), т.е. кодируются моменты пиков передачи и возвращения импульса и изменяющаяся амплитуда отраженного сигнала в целом (рис. 9).

Изложенный принцип впервые был применен в батиметрии (измерении глубины водных бассейнов) в 1968 г. (Nickman, Поде, 1969), для чего была сконструирована система, получившая название лидар (LIDAR - Light Detection and Ranging, т.е. световая локация). Система регистрировала первичное яркое отра-



Рис. 9. Образец записи импульса, отраженного от лесного полога, лидаром-батиметром КЦДЗ. По оси у - энергия отраженного импульса, по оси х - время. Левая часть сигнала получена от ближайшего объекта (лесного полога), правая - от более удаленных объектов (напочвенного покрова или поверхности земли (Alfred, Bonnag, 1985)).

жение отдельного импульса от водной поверхности, после чего идентифицировался вторичный пик яркости, означавший отражение от дна океана. Расстояния от борта до цели рассчитывались путем точных измерений промежутков времени, затраченного на прохождение импульса до цели и обратно. Промежуток времени между первичным и вторичным отражениями отдельного лазерного импульса соответствовал измеряемой глубине воды. Результаты измерения водных глубин в Атлантическом океане (глубина до 10 м) и в загрязненном заливе Чесапик (глубина до 4,6 м) с использованием бортового океанографического лидара НАСА были изложены Хоугом с соавт. (Hoге et al., 1980). Точность лазерных измерений в сравнении с гидрографическими замерами глубин с судна удовлетворяла требованиям.

У.Крейбил с соавт. (Krabill et al., 1984) исследовали возможность использования океанографического лидара НАСА для топографического картирования водораздела близ Мемфиса, штат Теннесси. Отличительной особенностью их исследования было то, что они пытались преодолеть влияние лесного покрова на точность профилирования. Они установили, что в зимних условиях (безлиственное состояние) профилирование земной поверхности было довольно надежным, поскольку около 40% импульсов достигали земли. Однако в летних условиях (облиственное состояние) проникающая способность лазерных импульсов была существенно хуже. Пропускающая способность хвойных лесов была выше, чем лиственных, но поскольку доля хвойных на исследуемой площади была невелика, достоверных результатов не получено. Существенное влияние на проникающую способность лазерных импульсов оказывала также подпологовая растительность. Высотные профили

поверхности земли, полученные лидаром, были близки к высотным профилям, полученным СЭГ-способом, со среднеквадратической ошибкой $\pm 12-27$ см на открытой местности и ± 50 см - под пологом леса. Было высказано мнение, что лучшая проникающая способность импульсов может быть обеспечена повышением частоты пульсаций и снижением высоты полета (Krabill et al., 1984).

Г.Шрайер с соавт. (Schraier et al., 1984) при картографировании земной поверхности в Канаде арсенид-галлиевым импульсно-периодическим лазером установили, что в 95% всех лазерных измерений расхождение высотных отметок со значениями, полученными СЭГ-методом, не превышало 1,8 м, а среднее расхождение показателей по двум методам составило менее 24 см. Лазерный профиль земной поверхности имел больший шумовой эффект в сравнении с профилем наземных измерений, а расхождения в оценках лазерных и наземных высотных отметок обусловлены травяно-парпоротниковым покровом и характеризуют высоту последнего. Г. Шрайер с соавт. (Schraier et al., 1985) сообщили далее, что их лазер в около-инфракрасной области спектра дал профили земной поверхности и лесного полога, позволяющие точно оценить высоту древостоя. Они осуществили измерение высоты и плотности полога в увязке с оценкой отражательной способности в около-инфракрасной области с целью распознавания хвойных и лиственных пород с использованием приемов полуавтоматической идентификации.

Р.Нельсон с соавт. (Nelson et al., 1984) в лесистых лиственных местобитаниях Пенсильвании, используя способность батиметрического лидара определять высоту полога, установили, что расхождения средних лазерных оценок высот деревьев с СЭГ-результатами были в пределах 60 см, и лазерные оценки были более точными. Они пытались установить, какие из лазерных характеристик полога наилучшим образом объясняют изменчивость его плотности вдоль профильной линии, и выяснили, что последняя наиболее тесно связана с проникающей способностью лазерного импульса. В густом пологе сигнал затухает быстрее и его отражения может не быть.

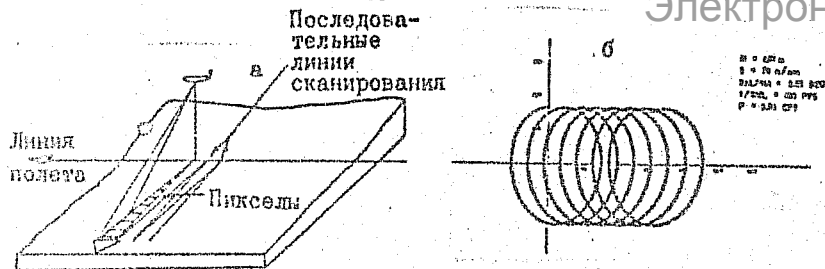


Рис.10. Схема растрового (а) и конического (б) сканирования (Link, Collins, 1981).

1.4. ЛАЗЕРНОЕ СКАНИРОВАНИЕ

Последующие достижения в области импульсно-периодических лазеров связаны с установкой на авиа- и космические носители лазерных сканеров, позволяющих получать не линейную, а площадную информацию вдоль линий сканирования перпендикулярно курсу полета. В настоящее время применяется растровое (линии сканирования перпендикулярны курсу полета) (Korbick, Flacki, 1981; Link, Collins, 1981) и коническое (линии сканирования круговые, симметричные относительно курса полета) (Link, Collins, 1981; Krabill et al., 1984) сканирование (рис. 10). Очевидным преимуществом лазерных сканеров является возможность более оперативного получения информации о больших площадях, а недостатком - повышенная сложность оборудования и методики обработки данных.

1.5. НЕКОТОРЫЕ БОРТОВЫЕ ЛАЗЕРНЫЕ СИСТЕМЫ

Из многих лазерных систем, адаптированных к борту авианосителя, в разделе дается краткое описание лишь некоторых, наиболее употребительных и доступных, причем в части, касающейся только дальномеров. Принципы работы лазерных систем и их разновидности не рассматриваются.

Из лазеров непрерывного действия можно отметить применявшийся в С-Петербургском НИИ лесного хозяйства дальномер фазового типа с частотой модуляции 30 МГц. В качестве источника излучения использовался гелий-неоновый лазер с длиной волны излучения 633 нм и мощностью излучения на выходе передат-

чика 1,5 мвт. Дальность действия - до 100 м, погрешность измерения 5 мм, диаметр светового пятна 25 мм (Солодухин и др., 1977а). Другая разновидность - разработанный Научным сектором Министерства обороны Австралии бортовой профилометр WEMAR II (Weapons Research Establishment for the Mapping) на базе непрерывного аргонового лазера с длиной волны 488 нм. При номинальной высоте полета 2000 м точность дальномера 50 см при диаметре лазерного пятна 30 см (Link, Collins, 1981).

К лазерным системам одинарного действия (т.е. измеряющих расстояние только до одной отражающей поверхности, например, поверхности воды) относится импульсно-периодический лазер Военно-морской исследовательской лаборатории США с длиной волны 904 нм. При высоте полета 60-300 м точность дальномера $\pm 1,5$ м, или 1% от высоты полета при величине последней более 150 м. Разрешающая способность при измерении высоты океанской волны ± 9 см плюс 0,03 % от высоты полета. Частота пульсаций - 1000 гц, продолжительность импульса 20 нсек, угол расхождения луча 1,5 миллирадиан (мрад) (Link, Collins, 1981). Другая разновидность системы такого типа - импульсно-периодический неоновый лазер Исследовательской лаборатории корпорации AVCO в Эверетте, США, с длиной волны 540 нм. Частота пульсаций от 1 до 100 гц, продолжительность импульса 3 нсек, угол расхождения луча 20 мрад (Nickman, Nogg, 1969).

В Канаде при профилировании лесного полога иногда применяется компактный производственный лазерный дальномер, первоначально предназначенный для определения высоты полета над поверхностью земли. Бортовая система обеспечения производственного лазера включает в себя:

- 70-миллиметровую маршрутную камеру
- датчик барометрического давления,
- датчик продольных и поперечных колебаний,
- ленточный самописец,
- цифровое записывающее устройство,
- микропроцессор-контроллер управления.

Дальномер производственного лазера имеет следующие рабочие параметры:

- длина волны лазера - близкая к инфракрасной,
- частота импульсов - 5, 20, 60, 320 гц (выборочно),

- максимальное расстояние зондирования - 500 м,
- угол расхождения луча - 2 мрад.,
- точность ± 40 см.

Восстановление линии полета осуществляется через систему записи отраженных сигналов, куда входит и 70-миллиметровая фотокамера. Выравнивание лазерного луча по фотоснимкам проводится обычно во время ночного полета. При работающей фотокамере включается лазер. Окружающий свет настолько слаб, что фотокамера регистрирует положение лазерного светового пятна, как вспышки. Датчики продольных и поперечных колебаний используются для контроля вертикальности лазерного луча и восстановления СЯТ-моделей. Барометрический датчик применяется для профилирования поверхности земли совместно с лазерным дальномером и датчиком продольных и поперечных колебаний. При работе производственной лазерной системы записывается сопровождение камеры (номер кадра), смещение вдоль и поперек полета, атмосферное давление и лазерное показание расстояния от самолета до объекта (лесного полога) (Alfred, Волпог, 1985).

К системам двойного действия можно отнести бортовой океанографический лидар НАСА. При исследовании лесного полога получили распространение две его модификации на базе импульсно-периодических лазеров - неоновом и на алмазотриповом гранате с неодимом. Первый дает частоту пульсаций 400 гц при длине волны 337 нм (Nelson et al., 1984), второй - 400 гц при длине волны 532 нм (Nelson et al., 1988 a, b). Система может работать в режимах сканирования и линейного профилирования и основана на принципе регистрации множественных отражений отдельного лазерного импульса (см. рис. 46 и 7).

Лидар НАСА работает в одном активном диапазоне и имеет некоторые особенности при измерении высоты полога леса. Покажем их на примере неоновом лазера (Nelson et al., 1984). Каждый отраженный импульс регистрируется труба фотоумножителя. При освещении лучом вершины деревьев часть энергии импульса возвращается к сенсору (приемнику), а другая часть проникает в полог, в конце концов достигая поверхности земли. Существует возможность при каждом импульсе сделать 37 измерений, и каждое содержит информацию о вертикальных характеристиках объекта.

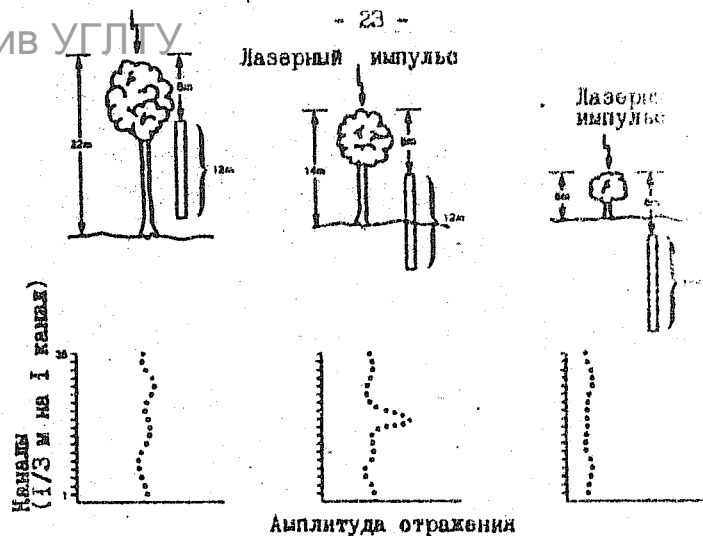


Рис. 11. Влияние различной высоты дерева на возможность регистрации поверхности земли. Принято расстояние задержки 8 м (55 нсек.) (Nelson et al., 1984).

Электроника устроена так, что после регистрации начального отражения отдельного импульса делается задержка (рис. 11), после которой последовательно производится остальные 36 измерений. Задержка вводится заблаговременно и может корректироваться по ходу полета. 36 последовательных измерений вторичных лазерных отражений кодированы по времени таким образом, что энергия отражения регистрируется через каждые 2,5 нсек, или около 1/3 м (вертикальное расстояние). Тогда 36 измерений образуют 12-метровое "окно", в пределах которого измеряется энергия вторичных отражений. При зондировании лесного полога это окно используется для поиска сильного вторичного сигнала из-под полога после регистрации первичного отражения от вершин деревьев. Наличие сильных (двух или более) пиков в форме сигнала могут означать отражение не только от поверхности земли, но и от нижних (одного или более) ярусов растительности. Задержка устанавливается с учетом средней высоты деревьев для данной площади или, более точно, для высот тех деревьев, которые представляют наибольший интерес для более точного измерения. Если задержка слишком коротка (или деревья сли-

ком высоте), то в пределах 12-метрового окна будут регистрироваться только отражения от нижней части крон деревьев. Если же расстояние задержки превышает высоту деревьев (или деревьев слишком низко), то отраженный от земли сигнал не будет получен. В обоих случаях не будет сильного отражения от земли и высота деревьев по лазерным данным не будет рассчитана (рис.11).

Поскольку число вторичных отражений импульса обычно не превышает трех, то в более поздних экспериментах с лидаром НАСА на базе алмаиттриевого граната число каналов для регистрации вторичных отражений было снижено с 36 до 8. Стали применяться и более низкие частоты (100-200 гц) с целью обеспечения адекватной энергии импульса, составляющей примерно 2 миллиджоуля на 1 импульс (что безопасно для зрения на расстоянии 150 м). Угол испускания лазерного луча 5 мрад при высоте полета 150 м дает на поверхности земли световое пятно диаметром 75 см. Оборудование устанавливается на борту четырехмоторного турбореактивного самолета Р-3А.

Лазерный импульс выходит из нижней части самолета через систему зеркал; отраженный свет этого импульса принимается через тот же порт и направляется в 30,5-сантиметровый телескоп Кассегрейна. Электронный сигнал получает от фотоумножителя 100-кратное линейное усиление и направляется в счетчик интервалов времени Хьюлетт Паккард 5360А с разрешающей способностью 100 пикосекунд (1 пикосек. = 10^{-10} сек.), что соответствует расстоянию 1,5 см. От набора труб фотоумножителя через волоконно-оптический кабель стартовый импульс подается к счетчику временных интервалов и к 8-канальному "мультистопу" Лекрой 4208. Счетчик временных интервалов дает величину времени, прошедшего с момента выхода стартового импульса до возвращения отраженного от древесного полога (или грунта), 8-канальный мультистоп (точность 1 нсек.) используется для получения промежутков времени между выходом импульса и последовательными его отражениями от многоуровневых наземных объектов. Представленный обычно многоуровневый пологом посадочная. Хотя разрешающее разрешение одного канала мультистопа составляет лишь 1/10 от разрешающей способности счетчика интервалов, это устройство обеспечивает точность измерения расстояний 15 см. Для установления относительного уровня земли, от которого рассчитывается

ся высота полога, применяется комбинация прямого отражения от полога (записанного счетчиком интервалов) и рассеянного отражения от поверхности земли (записанного 8-канальным мультистопом) (Nelson et al., 1988 а).

Из систем двойного действия можно упомянуть также бортовую лазерную систему Исследовательской лаборатории корпорации АВСО США на базе импульсно-периодического лазера на алмаиттриевом гранате, работающего в двух активных диапазонах - с длиной волны 1064 нм (инфракрасный лазер) и 532 нм (зеленый лазер). Частота пульсаций - 5, 10 и 20 гц. При частоте пульсаций 10 гц, высоте полета 915 м и скорости 215 км/час (самолет Чесна-206) частота измерений - через каждые 6 м по курсу полета при диаметре лазерного пятна 3 м (Link, Collins, 1981).

В Канаде при исследовании структуры лесного полога получили распространение бортовой океанографический лидар, разработанный Канадским Центром Дистанционного Зондирования (КЦДЗ), работающий в двух активных диапазонах и также относится к системам двойного действия. Бортовая система лидара КЦДЗ состоит из следующих компонентов:

- лидар-батиметр МК11,
 - картографическая камера WILD RC-10,
 - видеокамера,
 - инерционная навигационная система,
 - пропускающий дигитайзер Tektronix R7912,
 - система получения данных.
- Лидар имеет следующие основные рабочие характеристики, перспективные с точки зрения лесохозяйственного применения:
- длина волны 1064 нм (инфракрасный),
532 нм (зеленый),
 - частота повторений импульса - 5 нсек. при длине волны 532 нм,
 - максимальное расстояние зондирования - 2000 м,
 - угол расхождения луча - 1, 2, 5, 10 и 25 мрад (выборочно).

Бортовая система лидара КЦДЗ включает в себя систему обработки информации "Лидар-Эхо" на базе компьютера РРР 11/23. Периферия системы - привод магнитной ленты, жесткий диск 60 Мбайт, разделенный на три тома, графический терминал Tektronix 4025 и принтер-плоттер Verbatim. Система Лидар-Эхо пред-

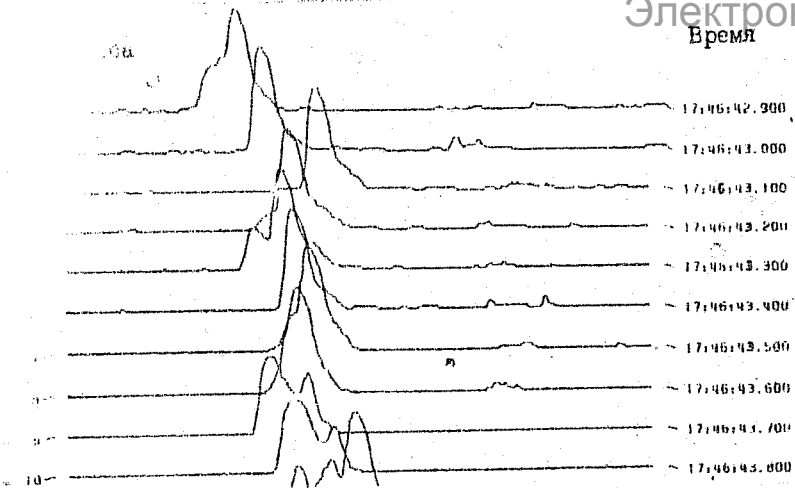


Рис. 12. Распечатка системой Лидар-Эхо серии из 10 лазерных импульсов с интервалом 1/10 сек. (Aldred, Bonnag, 1985).

назначена для чтения и обработки зарегистрированных лидаром отраженных сигналов. Через программу BEST она дает возможность графического представления данных с выводом на терминал или на принтер-плоттер. Рис. 9 представляет распечатку возвращенного импульса, а рис. 12 - последовательность импульсов с интервалом 1/10 сек.

Поскольку использование инерционной навигационной системы довольно дорого, восстановление линии полета иногда осуществляется через систему записи отраженных сигналов, включающую в себя видеокамеру и большеформатную фотокамеру. Восстановление линии полета производится по видеозаписи (по аналогии с использованием 70-миллиметровой фотокамеры производственного авиадальномера), для чего положен на лазерного пятна фиксируется на видеозаписи. Видеозапись сопровождается регистрацией времени в десятых долях секунды, чтобы связать время видеозаписи с лазерными импульсами (Aldred, Bonnag, 1985).

Из лазерных сканеров, кроме упомянутого лидара НАСА, при съемках морского дна и лесного полога используется многоспектральный растровый сканер М-8 Мичиганского института исследо-

ваний окружающей среды, США. Скорость сканирования 60 пикселей/сек., пространственное разрешение 2 мрад. Система имеет два активных канала. Один предназначен для профилирования земной поверхности (в том числе под пологом леса) и дна водоемов глубиной до 9 м с изменяемой длиной волны от 360 до 740 нм. Продолжительность импульса - около 4,5 нсек., вертикальное разрешение - около 67 см. При высоте съемки 305 м система имеет пространственное разрешение 61 см на полосе сканирования 610 м. Второй активный канал обеспечивается непрерывным лазером на алмазтитриевом гранате с неодимом с длиной волны в ближней инфракрасной области спектра 1064 нм, предназначен для зондирования поверхности воды или полога дриовостян. Несмотря на большую сложность, система обеспечивает получение уникальной информации и является мощным инструментом при дистанционном зондировании земной поверхности и при исследовании методологии получения наземных данных (Link, Collins, 1984).

ВЫВОДЫ

1. Лазерные и радарные системы при их ориентации на исследование структуры и фитомассы лесного полога имеют очевидные преимущества перед традиционными методами лесоинвентаризации и обладают рядом специфических черт по сравнению с другими дистанционными методами. Мы не брали на себя задачу сравнительного анализа лазерной и радарной систем на современном этапе; можно лишь предполагать, что в будущем при решении лесохозяйственных задач они, скорее всего, будут дополнять одна другую.
2. Дистанционное зондирование земной поверхности непрерывным лазерным дальномером путем измерения фазового сдвига световой волны не обеспечивает достаточного качества как топографического, так и лесотаксационного картирования, поскольку лесной полог представляет серьезную помеху для непрерывного светового лазерного луча. Хотя точность измерений (1-20 см) превышает уровень трясаваний при лесотаксационных задачах, встречаются участки протяженностью несколько сот метров без единого сигнала, отраженного от земли под пологом леса.

- 3. Импульсно-периодические лазерные дальномеры одинарного действия (т.е. измеряющие расстояние только до одной отражающей поверхности), регистрирующие время испускания и возвращении импульса, обеспечивают измерение расстояния до полога с меньшей ошибкой (+12-27 %). Однако проблема плохой проницаемости полога лазерными импульсами остается.
- 4. При исследовании структуры лесного полога являются перспективными лидары - импульсно-периодические лазерные системы двойного действия, т.е. измеряющие расстояние не до одной, а до двух и более (вершины деревьев, нижние ярусы растительности и земли) отражающих поверхностей, и регистрирующие не только расстояние до объекта, но и форму отраженного сигнала в целом. Система регистрации формы отдельного отраженного импульса обещает быть наиболее перспективной для измерения высоты древостоев вследствие лучшего проникновения ими лесного полога.
- 5. Наибольшее распространение в лесотаксационном картировании получили лидары с одним и двумя активными диапазонами волн видимого спектра.
- 6. Лазерные сканеры являются перспективным средством оперативного зондирования больших территорий, но сегодня пока не получили распространения из-за высокой сложности оборудования и методики обработки данных.

2. МЕТОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ЛАЗЕРНОЙ ОЦЕНКИ МАССООБРАЗУЮЩИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДРЕВОСТОЕВ

2.1. ИМИТАЦИЯ БОРТОВОЙ ЛАЗЕРНОЙ СЪЕМКИ В НАЗЕМНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАХ

Главные задачи наземных имитаций бортовой лазерной съемки:

- выявить основные массообразующие показатели древостоев, которые могут быть идентифицированы и квантифицированы (т.е. определены числом и мерой) посредством лазерных сигналов, и
- исследовать наземную составляющую ошибки измерения, обусловленную структурой древостоев, но не технологией бортовой лазерной съемки. Исследования полной ошибки измерения будут посвящен раздел 2.2.

В.И. Солодухи с соавт. (1976) предваряют изложение результатов наземных имитаций бортовой лазерной съемки глоссарием некоторых специфичных принятых ими терминов:

- профиль - сечение древостоев произвольной вертикальной (профильной) плоскостью;
- профильная линия - проекция последней на горизонтальную плоскость;
- профильные деревья - деревья, кроны которых пересекают профильную плоскость;
- профильная выборка - выборка, состоящая только из профильных деревьев;
- профильная проба - совокупность наземных измерений в профильной плоскости, включая все характеристики профильных деревьев.

2.1.1. Исследование лазерных профилей, снятых на горизонтальной измерительной трассе.

Эксперименты проводились на горизонтальной измерительной трассе (рис. 13) путем измерения расстояний до соответствующих точек кроны при перемещении лазерного дальномера, расположенного на специальной платформе, параллельно оси у с шагом 5-10 см, что обеспечивало получение профиля сечения кроны по 40-50 точкам (рис. 14). Данные сопоставлялись с профилями, полученными путем проектирования точек контура сечения на деревянный помост и последующего измерения координат x и y с помощью измерительной рулетки (погрешность 3 см). Несмотря на то, что профили, полученные двумя способами (рис. 14), имеют некоторые несоответствия, формы отгибающих обладают достаточным подобием в верхней части кроны (рис. 15), что дает возможность распознавать породы на профилограммах по форме сечений.

Для распознавания пород по форме кроны предложен показатель ее выпуклости в верхней (видимой) части:

$$K_b = \frac{1_{bo}}{0,5D_k} \quad (1)$$

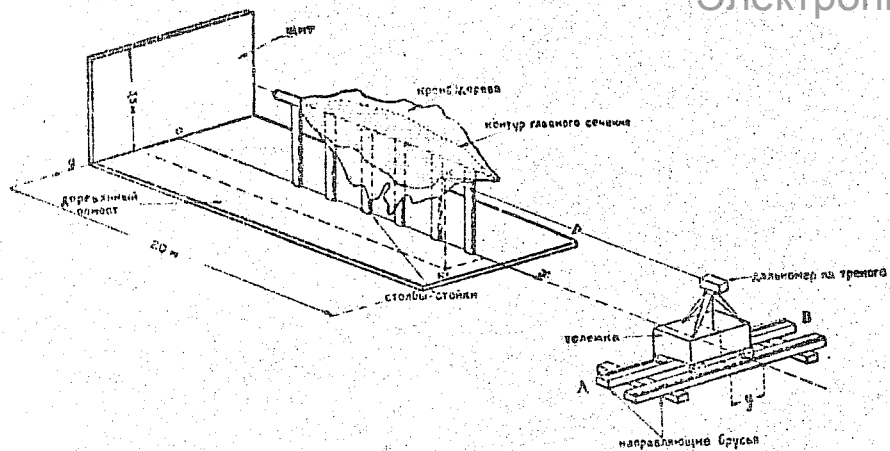


Рис. 13. Общий вид площадки для съемки профилей крон (Солодухин и др., 1976).

где $l_{\text{во}}$ - протяженность верхней части кроны в главном сечении, м; D_k - диаметр кроны, м. Однако возможность автоматизированного распознавания установлена в составе смешанных древостоев только для ели. Сосна, кедр и лиственница по выпуклости крон достоверно не различаются (Солодухин и др., 1976).

2.1.2. Съемка и обработка стереофотограмметрических (СФГ) профилей.

Идентифицировать данные лазерной съемки и проконтролировать точность ее при определении таких показателей, как высота дерева h , высота наибольшего диаметра кроны h_{dk} , протяженность кроны, поперечник кроны на профильной линии a_k и диаметр кроны D_k (рис. 16) можно наземными способами. Получить высоту и форму случайного сечения верхней части кроны профильной плоскостью, а следовательно, и рассчитать по профилограмме действительную среднюю высоту древостоя при использовании только наземного контроля невозможно. Для построения контрольных профилограмм древостоя предлагается использовать СФГ-метод на основе фотопривязки и крупномасштабной

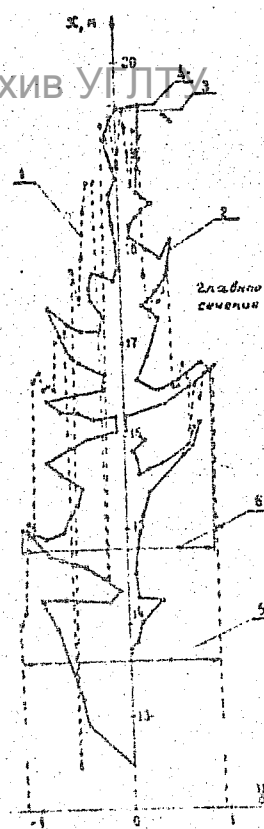


Рис. 14. Лазерная профилограмма и контур главного сечения ели 27 лет. 1 - лазерная профилограмма, 2 - профиль, измеренный рулеткой; 3 и 4 - высота дерева, определенная, соответственно, по лазерной профилограмме и с помощью рулетки; 5 и 6 - наибольшая ширина сечения кроны, полученная, соответственно, по лазерной профилограмме и с помощью рулетки (Солодухин и др., 1976).

аэрофотосъемки (Желудов, 1985) с применением высокоточных универсальных СФГ-приборов. Методика съемки и обработки СФГ-профилей включает наземные, аэрофотосъемочные и камеральные работы.

При наземных работах в древостое проeshивался ряд параллельных визиров, на концах которых выкладывались опознавательные знаки Т-образной формы с перекрестиями, ориентированными на створ профильной линии (рис. 17). Аэрофотосъемка выбранных участков проводилась в масштабе 1:2000 - 1:2500 при фокусном расстоянии 200 мм и высоте полета 400 м, с расчетной ошибкой построения СФГ-профиля $\pm 0,2$ м. Обработка диапозитивов выполнялась на стереомертаграфе "Карл Цейсс" модель Е (Солодухин и др., 1976).

Полученные после дешифрирования СФГ-профили (рис. 18) при полноте выше 0,6 имеют разрывы (например, "П" шириной 5,2 м, рис. 18), в которых высотные отметки получить невозможно из-за затенения разрывов кронами соседних деревьев. По этой же причине занижается на 0,2-0,3 сомкнутость полога (табл. 1) (за счет невысоких деревьев, составляющих до 50% их общего числа), рассчитанная как отношение длины профильной линии, занятой кронами, к общей ее длине. Однако доля крон мелких деревьев, пересекаемых профильной линией, в длине профильной линии, занятой всеми кронами, невелика, и средние арифметиче-

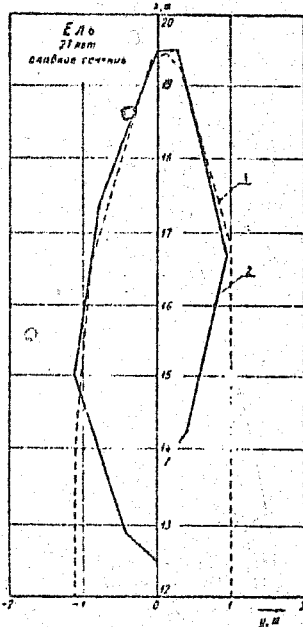


Рис. 15. Огибающие главного сечения ели 27 лет (Солодухин и др., 1976).

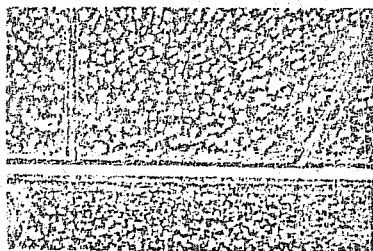
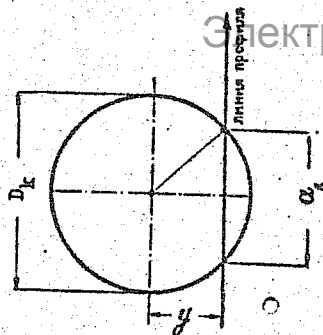


Рис. 17. Опознавательные знаки на концах профиля (Солодухин и др., 1976).

Рис. 16. Пересечение проекции кроны профильной линией; y - расстояние от центра кроны до профильной линии, a_k - поперечник кроны на профильной линии, D_k - диаметр кроны (Солодухин и др., 1976).



ские поперечники крон на профильной линии мало отличаются от измеренных в природе - от +4,5 % до -8,6 % (табл. 1).

При автоматизированной обработке профилограмм количество видимых сверху деревьев определяется по числу пиков верхней огибающей профилограммы,

однако при этом необходимо знать параметры "угнетенных" пиков, по которым их можно идентифицировать как отдельные деревья (рис. 19). Расчет такой прищипки, основанной на длине основания пика, показан на рис. 20 в виде распределения ответов "да" или "нет" путем сопоставления с натурными данными в зависимости от длины основания пика a . Рис. 20 показывает, что

Таблица 1

Сопоставление результатов наземных и СФГ-измерений вдоль профильных линий (Солодухин и др., 1976).

Наименование показателей	Профиль 1		Профиль 2		Профиль 3	
	СФГ	наземные	СФГ	наземные	СФГ	наземные
Длина профиля, м	186,2	186,2	238,5	238,5	130,5	130,5
Сомкнутость полога	0,59	0,78	0,53	0,70	0,36	0,65
Число профильных деревьев	44	75	41	57	15	31
Число участков профильной линии с непрерывным покрытием кронами	32	16	37	33	13	16
Суммарная длина участков с непрерывным покрытием кронами, м	109,1	145,2	127,1	167,2	46,9	64,8
Средний арифметический поперечник кроны, м	2,45	2,55	3,07	3,36	3,02	2,89
Средняя арифметическая высота профильных деревьев, м	18,3	17,4	23,4	21,8	22,9	21,0
Средняя арифметическая высота сечений крон профильной плоскости h_c , м	15,7	-	21,3	-	21,1	-
Средний арифметический диаметр крон профильных деревьев, D_k , м	3,07	2,85	3,8	4,13	4,26	4,29
Отклонение СФГ-высоты деревьев от истинной, %	+5,2	-	+7,3	-	+9,0	-
Отклонение СФГ-высоты сечений крон h_c от истинной, %	-9,8	-	-2,3	-	+0,5	-
Отклонение СФГ-диаметра кроны от истинного, %	-7,2	-	-8,0	-	-0,7	-

пик является вершиной дерева, если длина его основания более 1,2 м. По числу профильных деревьев, определенному по критерию отбора пиков, устанавливается среднеарифметический поперечник кроны a_k (рис. 16, табл. 2)

$$a_k = D_k^2 - 4y^2 \quad (2)$$

который можно рассматривать как функцию двух случайных величин - D_k и y . С учетом соотношения плотностей вероятности распределения D_k и y , В.И. Солодухин с соавт. (1976), исходя из зависимости (2), предложили теоретическое соотношение

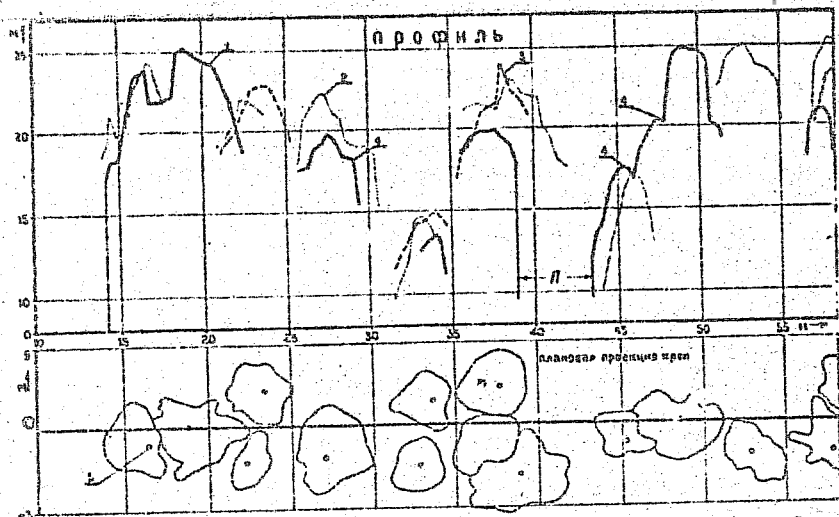


Рис. 18. Выпиорвана из СДГ-профиля № 3. 1 - СДГ-профиль; 2 и 3 - профили гравных сечений деревьев, расположенных соответственно справа и слева от профильной плоскости; 4 - примеры "угнетенных" пиков профилограммы, соприкасающихся с соседними пиками и имеющими в сравнении с ними значительно меньшую высоту; 5 - вершины деревьев на плане насаждения (Солодухин и др., 1976).

Таблица 2

Данные, получаемые в результате автоматизированной обработки профилограммы (Солодухин и др., 1976).

Измеряемые величины	Профили		
	1	2	3
Число профильных деревьев (n пик), определенное по критерию отбора пиков	45	39	15
Суммарная длина участков ($\sum l_k$), занятых кронами на профилограмме, м	109,1	127,1	46,9
Средний арифметический поперечник кроны, м, определенный по формуле: $a_k = (\sum l_k) / n$ пик	2,42	3,26	3,13
Отклонение a_k от измеренного в натуре, %	-5,1	-3,0	+8,3
Средний арифметический диаметр кроны, м, рассчитанный по формуле: $D_k = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{\sum l_k}{n}$ пик	3,08	4,15	4,0
Отклонение D_k от измеренного в натуре, %	+0,23	+0,48	-6,8

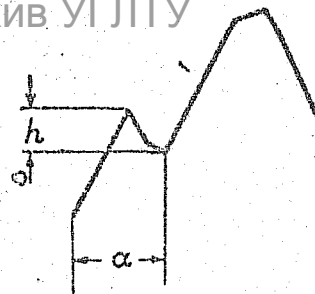


Рис. 19. Размеры "угнетенного" пика: h - высота, alpha - длина основания (Солодухин и др., 1976).

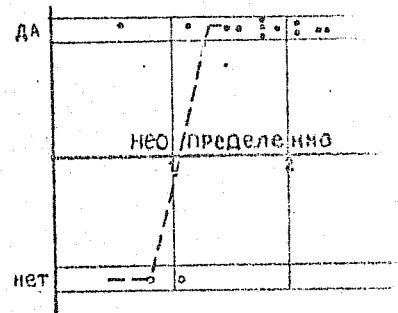


Рис. 20. Диаграмма распределения ответов "да" и "нет" в зависимости от длины основания пика (x) при оценке, является ли пик вершиной дерева (Солодухин и др., 1976).

$$D_k = (4/\pi) \cdot a_k \quad \text{или} \quad D_k = 1,274 \cdot a_k \quad (3)$$

Расчет среднего диаметра кроны с учетом соотношения (3) показывает (табл.2), что расхождение расчетных показателей фактически невелико и не имеет систематического характера, что позволяет определять средний диаметр кроны только по профилограмме, обходясь без картирования деревьев.

Отклонения среднеарифметической СДГ-высоты деревьев от фактической (табл.1) на трех профилях колебались от +5,2 % до +9,0 %.

2.1.3. Определение высоты дерева по высоте случайного сечения кроны и ее форме.

С целью формализовать получение значений высот деревьев по профилограмме В.И.Солодухин с соавт. (1977б) ввели характерные сечения верхней части кроны деревьев (рис.21), согласно которым высота дерева h равна сумме высот двух случайных величин - h_c и delta h. Исходя из этого соотношения и математического ожидания величин h_c и delta h, выведены формулы, связывающие высоту дерева с высотой h_c и длиной верхней части кроны в ее главном сечении l_bo (рис.21), которые приведены

табл. 3.

Формулы идеальных форм кроны (Солодухин и др., 1977б)

Тип формы	Формула	Формула средней арифметической высоты
Конусная	$\Delta h = \frac{2l_{bo}/y/}{D_k}$	$h = h_c + 0,5 \cdot l_{bo}$
Параболоидная	$\Delta h = \frac{4 \cdot l_{bo}^2 y^2}{D_k^2}$	$h = h_c + \frac{1}{3} \cdot l_{bo}$
Эллипсоидная и сферическая	$\Delta h = l_{bo} \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{2y}{D_k} \right)^2} \right]$	$h = h_c + \left(1 - \frac{y}{D_k} \right) \cdot l_{bo}$
Цилиндрическая	$\Delta h = 0$	$h = h_c$

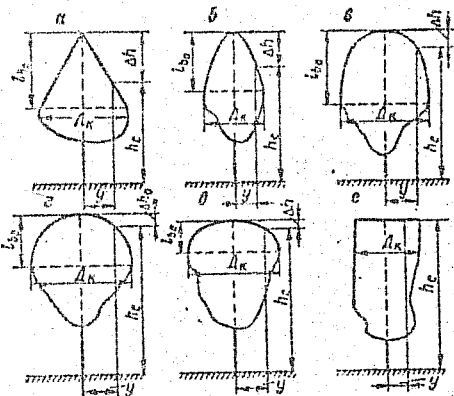


Рис. 21. Идеальные формы верхней части кроны: а - конусная, б - парабоидная, в - эллипсоидная, вертикальная, г - сферическая, д - эллипсоидная горизонтальная, е - цилиндрическая (Солодухин и др., 1977б).

С учетом вышесказанного измерения средних арифметических значений h_c и h_{dk} , рассчитаны систематические ошибки (смещения) при определении истинной высоты древостоя h по профилограмме, т.е. только по величине h_c : для ельников - 37,1 %, для сосняков - 10,7 %, для кедровников - 10,0 % и для лиственничников - 9,0 % (Солодухин и др., 1977б).

2.1.4. Наземные измерения, связанные с оценкой высоты СФГ-профиля.

Высота древостоя и диаметр кроны являются основными взаимосвязанными показателями и для их расчета по профилограм-

ме необходимы дополнительные наземные измерения.

Для расчета средней высоты древостоя необходимо на профилограмме отобрать три дерева с наибольшей высотой сечения кроны, определить их среднюю высоту и разделить ее на среднее редуцированное число последней естественной ступени высоты (Монев, 1958)

$$\bar{h} = \frac{1}{3Rh} \sum_{i=1}^3 h_i, \quad (4)$$

где \bar{h} - средняя высота древостоя, м; $\sum_{i=1}^3 h_i$ - сумма трех самых высоких сечений кроны на профилограмме, м; Rh - среднее редуцированное число последней (самой высокой) естественной ступени высоты. Но поскольку количество пересечений кроны самых высоких деревьев - величина случайная, необходимо показать, что отобранные сечения действительно принадлежат кронам самых высоких деревьев и проходят через их вершину. Вероятность того, что профиль пройдет по вершинным областям этих кроны, возрастает с увеличением объема профильной выборки, и необходимо выявить минимальную протяженность профиля.

Исследования были проведены (Солодухин и др., 1985) на пробной площадке размером 600 x 44 м, заложенной в Вытегорском лесхозе Вологодской обл. Состав ИОС, возраст 64 года, густота 750 стволов/га. Профили заложены методом параллельных ходов, отстоящих один от другого на 2 м. По данным натурных измерений вычерчен план кроны в масштабе 1:100; на нем были выделены все кроны, относящиеся к самой высокой 10-процентной высотной группе (рис. 22). Вероятность пересечения профильной линией не менее трех кроны деревьев, принадлежащих к этой высотной группе, определяется из соотношения

$$P_{x \geq 3} = \frac{n_{x \geq 3}}{22}, \quad (5)$$

где $n_{x \geq 3}$ - число профилей, на которых профильная линия пересекает в вершинной области не менее трех кроны из последней высотной группы; 22 - общее число профилей.

Зависимости экспериментальной вероятности $P_{x \geq 3}$ и теоретической по закону Пуассона от длины профиля (рис. 23) оказались очень близкими. Они показывают, что вероятность $P_{x \geq 3} = 0,9$ обеспечивается в древостое с густотой 750 деревьев/га при длине профиля 300 м.

Отклонение среднего значения диаметра кроны, определен-

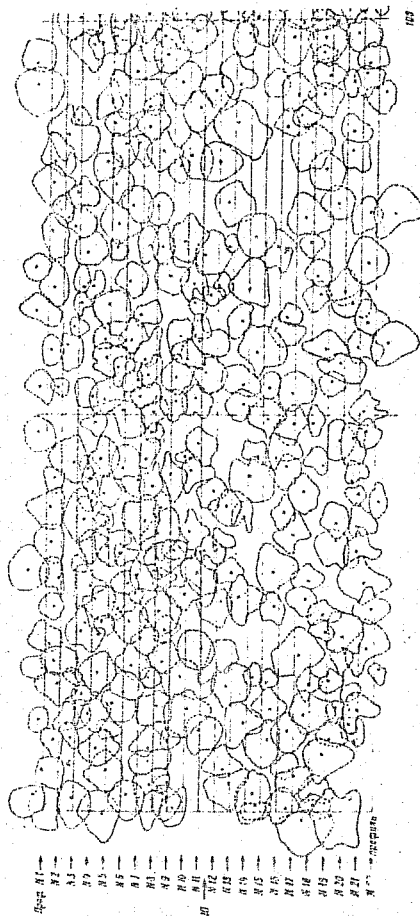


Рис. 22. Фрагмент плана крон пробной площади (Солодухин и др., 1986).

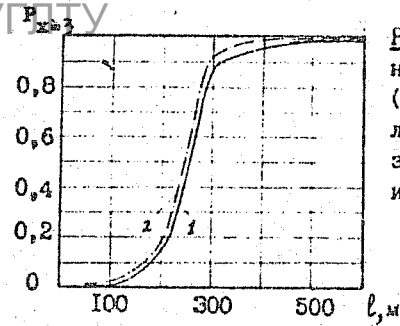


Рис. 23. Зависимость вероятности $P_{хвз}$ от длины профиля ($l, м$); 1 - экспериментальная вероятность; 2 - закону Пуассона (Солодухин и др., 1985).

ного по С&Г-профилю с применением соотношения (3), от фактического варьировало по материалам трех профилей (табл.2) от 0,3 до -6,8 %. По материалам II профильных проб В.И.Солодухиным с соавт. (1976) выявлено систематическое занижение среднего диаметра крон, рассчитанного по (3), по отношению к фактическому в среднем на 4-6 %.

Определение среднего диаметра крон с использованием соотношения (3) по лазерному профилю возможно только при отсутствии перекрытия крон, которое имеет место лишь при сомкнутости полога менее 0,3, т.е. в редниках. Благодаря групповому размещению деревьев профильная линия перекрывается кронами лишь на отдельных участках $l_1 \dots l_5$ (рис.24), при этом количество крон n , образующих один такой участок, колеблется от 1 до 15.

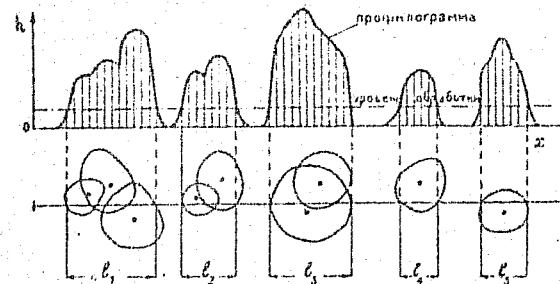


Рис. 24. Профильная линия, перекрытые кронами (Солодухин и др., 1976).

Оно прямо пропорционально длине перекрытого кронами участка ($l, м$) (рис. 25а) и определяется соотношением

$$n = \alpha \cdot l \quad (5)$$

где α -угловой коэффициент прямой. Последний тесно связан

2.2. БОРТОВАЯ ЛАЗЕРНАЯ ОЦЕНКА МАССООБРАЗУЮЩИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДРЕВОСТОЕВ.

Развитие национальных средств дистанционного зондирования в приложении к лесохозяйственным проблемам предполагает наличие развитого научно-технического потенциала страны и больших лесных площадей. Неслучайно поэтому бортовые лазерные системы впервые начали применяться и продолжают активно развиваться в странах, имеющих названные предпосылки.

Раздел 2.2 посвящен анализу канадских исследований структуры лесного полога на базе бортового лидара КЦДЗ (Aldred, Bonnor, 1985), а также работ исследователей США, выполненных на базе бортового лидара НАСА (Nelson et al., 1984, 1983 a, b). Принципы работы названных лидаров были изложены в разделе I.5.

Использование бортового лидара для получения информации о структуре лесного покрова связано с двумя фундаментальными вопросами:

- насколько точно можно измерить расстояние до вершин деревьев с летящего самолета и
 - какова возможная точность определения расстояния до земли при идеальной проницаемости полога? (рис.26).
- Эти две проблемы решались одновременно по трем последовательным этапам лазерной оценки:
- высоты древостоя в произвольной точке профиля полога,
 - средней высоты древостоя на отрезке профиля таксационного выдела,
 - плотности лесного полога,
 - породного состава.

2.2.1. Объекты и методы.

2.2.1.1. Система лидара КЦДЗ.

Система лидара КЦДЗ проверялась на трех маршрутах в окрестностях Оттавы, подобранных с таким расчетом, чтобы были представлены четыре типа лесной растительности с плоским и переосеченным рельефом и с возможностью проверки влияния на точность съемки доли лиственных при летней и зимней съемке. При полетах с системой КЦДЗ записывались данные навигационных сенсоров на бортовую систему получения данных, а лазерные дан-

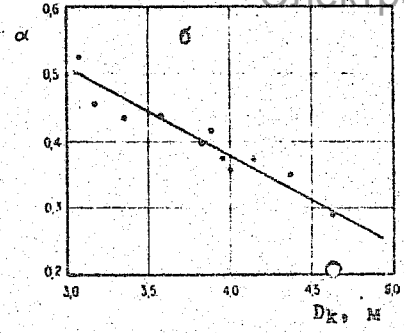
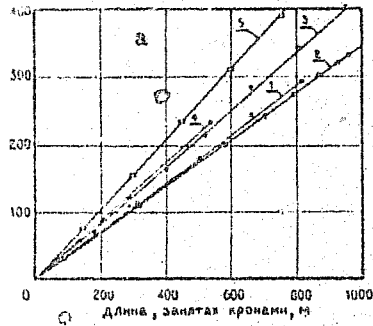


Рис.25. Зависимость: а) числа крон (n), пересекающих профиль, от длины профиля, занятой кронами в разных профильных пробах, обозначенных цифрами (Солодухин и др., 1976); б) углового коэффициента в (6) от среднего диаметра кроны на профильной линии.

со средним диаметром крон (рис. 25б) и определяется соотношением

$$\alpha = -0,13 D_k + 0,9. \quad (7)$$

Среднее квадратическое отклонение уравнения (6) составляет 1,3 - 3,5, а уравнения (7) - 0,009. Путем подстановки (7) в соотношение (6) получаем двухфакторную зависимость для определения числа крон, пересекающих профиль, на непрерывном его участке:

$$n = 0,9 \cdot l - 0,13 \cdot l \cdot D_k. \quad (8)$$

Суммируя результаты аэрофото- и наземных измерений, представляющих лазерной съемке древостоев с борта авианосителя, можно заключить, что наиболее достоверно с лазерной профилограммы можно снять показатели высоты, среднего диаметра крон и сомкнутости (плотности) полога, имеющие наиболее высокую информативность при оценке надземной фитомассы древостоев (Коквин, Нагимов, 1990). Существенный вклад в повышение точности оценки фитомассы может внести также густота древостоя, но поскольку она существенно занижается при снятии с профилограммы, необходима соответствующая коррекция.

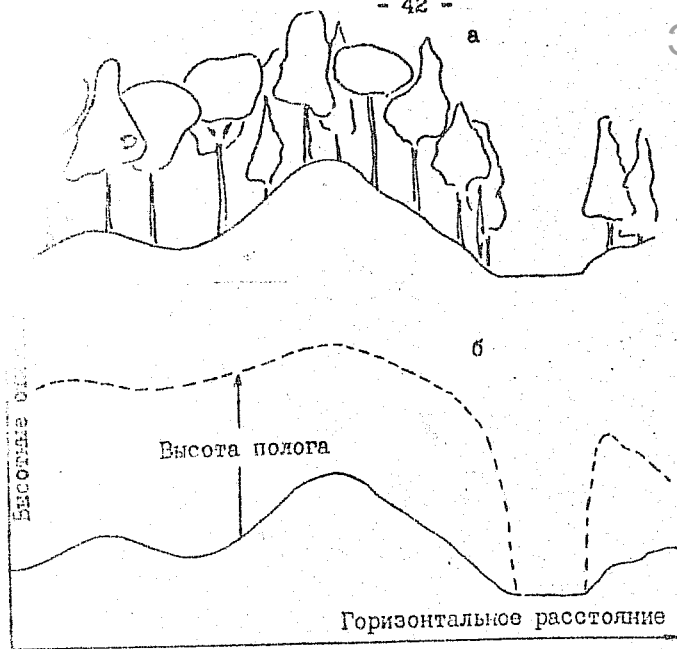


Рис. 26. Вертикальное сечение древостоя (а) и идеальный двойной профиль лесного полога и земной поверхности, иллюстрирующий точное определение высот древостоя (б).

ные и данные кодировки времени - на систему получения батиметрических данных. С использованием имеющегося программного обеспечения извлекались данные измерения расстояний до полога и данные множественных отражений отдельных импульсов. Большую часть данных просматривали на видеомониторе и наиболее типичные примеры распечатывали для последующего анализа. Для тестирования отдельных древостоев распечатывали серии отраженных импульсов (рис. 12).

Для анализа информации лазерные данные совмещали с изображениями объектов на аэрофотоснимках и "привязывали" к характерным деталям земной поверхности, используя видео- и фотокамеры. Лазерное пятно отслеживалось на мониторе и отмечалось стрелкой, прикрепленной к монитору, так как иначе оно было не видимо при дневном полете. Видеозапись тестовых полетов прокручивалась в обратном направлении и совмещалась с соот-

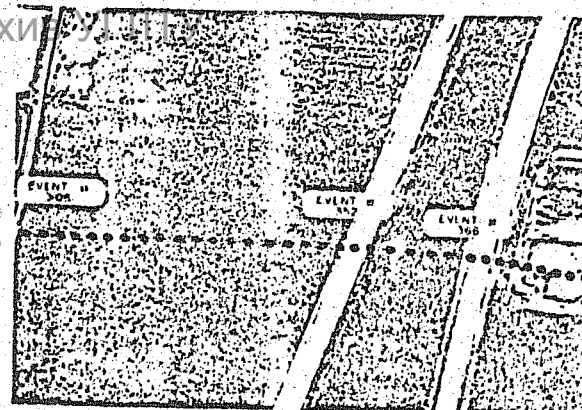


Рис. 27. Лазерный след на фотоснимке вдоль линии полета. Площадь лазерного пятна соответствует углу расхождения луча 10 мрад. Показан каждый второй сигнал (Aldred, Волнов, 1985).

ветствующими фотоснимками с использованием видимых деталей местности. Поскольку лазерные импульсы кодированы во времени и время записано и выдано на телемониторе, последовательность лазерных пятен и соответствующих импульсов фиксировалась на фотоснимке. Таким образом, линия полета и нумерованные импульсы на фотоснимках завершали восстановление маршрута, необходимое для "привязки" лазерных импульсов к особенностям и ориентирам на местности. На рис. 27 показан типичный лазерный след вдоль линии полета.

Пригодность системы лидара КЦДЗ для измерения высоты древостоя в произвольной точке профиля проверена на пробной площади с ровным рельефом. Изображение полученного профиля перевернуто (рис. 28), поскольку расстояние до ближних объектов, т.е. до лесного полога, меньше, чем до земли, и поэтому значения высот по оси ординат ниже. Значения высоты древостоя снимались непосредственно с профиля после приблизительного определения уровня земли. Это нетрудно сделать при наличии частых просветов в пологе, позволяющих получить отраженные от земли импульсы, а также при равнинном рельефе. Для проверки выборочных значений высоты полога измерены в полевых условиях высоты в специфичных точках профиля. В случаях, если трудности идентификации точек в полевых условиях делали полевые измерения невозможными, получали СГ-профиль (рис. 29) с помощью компьютерной системы графопостроения Стереокорд Канадской лесной службы. Путем использования СГ-профиля заполня-

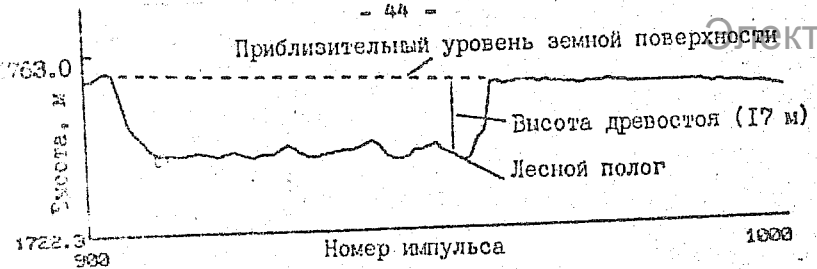


Рис. 28. Перевернутое изображение высотного профиля, полученное системой лидара-батиметра КЦДЗ (Aldred, Bonnор, 1985).

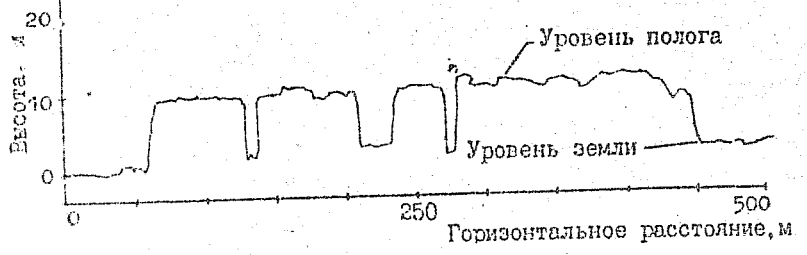


Рис. 29. Вертикальный СДГ-профиль отрезка маршрута, показанного на рис. 28 (Aldred, Bonnор, 1985).

лись имевшиеся пробелы и обеспечивались дополнительные данные для тестирования.

Система лидара КЦДЗ дает возможность измерить высоту древостоя с помощью отдельного лазерного импульса и проверить точность измерения. Процедура предусматривает распечатку импульсов, отраженных от различных объектов. На рис. 30 показано типичное отражение от открытого грунта. По оси x откладывается продолжительность возвращенного импульса. Естественно, форма волны в этом случае простая, а импульс - короткий, поскольку он отражается целиком (см. рис. 4а). На рис. 31 показан импульс, отраженный от здания. Он имеет два пика: первый означает отражение от крыши здания, а второй - от поверхности земли рядом со зданием.

Аналогичное двойное отражение импульса было показано на рис. 4б. Посредством измерения интервала времени между двумя пиками или равнозначными точками фронта либо спада отраженного импуль-

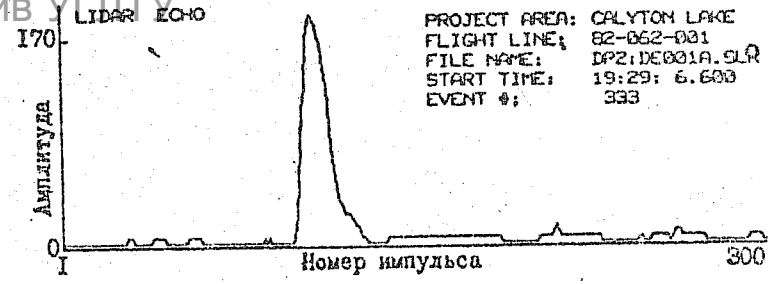


Рис. 30. Типичный лазерный импульс, отраженный от открытого грунта (Aldred, Bonnор, 1985).

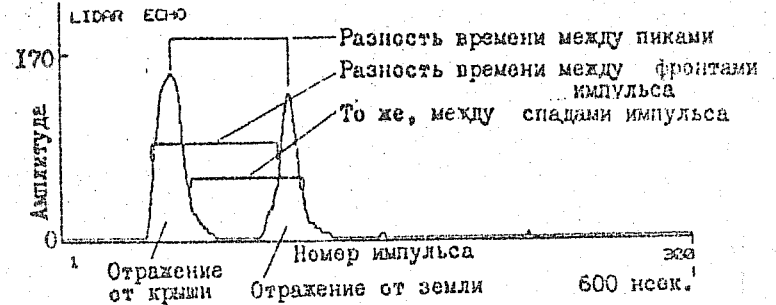


Рис. 31. Отражение лазерного сигнала от крыши здания и от грунта рядом с ним. Показано определение разности времени и разности высот по двойному отраженному сигналу. Разница во времени отражения соответствует высоте здания около 16 м (Aldred, Bonnор, 1985).

са, получено значение высоты по разности двух уровней. Фактически значение высоты здания расходится с измеренным на земле или СДГ-способом в пределах 50 см. На типичных отражениях от полога лиственного древостоя в безлиственном состоянии (рис. 32) и от полога хвойного древостоя (рис. 33) отчетливо виден двойной отраженный сигнал с различной энергией первого и второго импульсов. Проверяется расхождение при оценке времени по разным определителям, т.е. по расстоянию между фронтами (на уровнях амплитуды 20 % от максимальной и 50 % от максимальной) в сравнении с расстояниями между пиками и между спадами импульса. Лучший результат дало измерение расстоя-

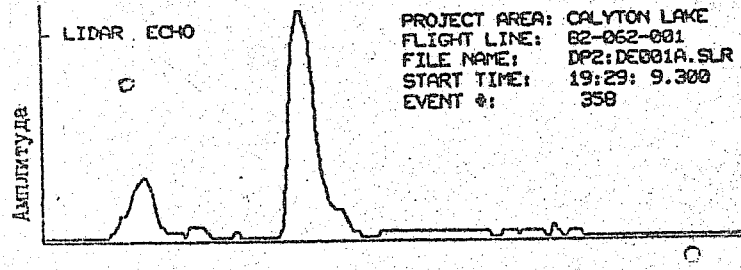


Рис. 32. Типичный импульс, отраженный от лиственного древостоя в безлиственном состоянии. Видно слабое отражение от полога и довольно сильное - от земли. Разница времени между пиками соответствует высоте полога около 20 м (Aldred, Bonnор, 1985).

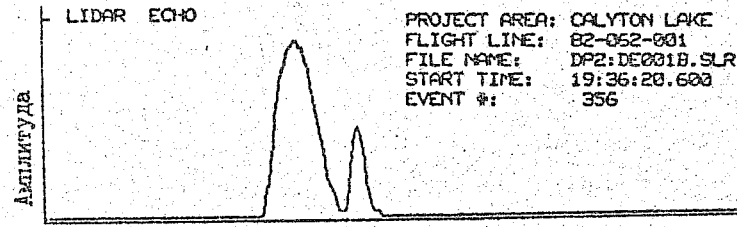


Рис. 33. Типичный импульс, отраженный от хвойного древостоя. Видно сильное отражение от полога и более слабое - от поверхности земли (Aldred, Bonnор, 1985).

ний между фронтами импульса, хотя в сравнении с расстоянием между пиками результат лишь незначительно лучше.

2.2.1.2. Система лидара НАСА.

Данные дистанционного зондирования лесного полога, а также материалы наземной таксации были получены на Годубой горе в Аппалачах, шт. Пенсильвания (Nelson et al., 1984) и на юго-западе шт. Джорджия в опытном лесном массиве Международной бумагопроизводящей компании близ Бейнбріджа (Nelson et al., 1988 а, б). Основные типы лесов на объектах в Пенсильвании представлены насаждениями дуба и карины, а в шт. Джорджии - насаждениями сосны ладанной, ежовой, Эллингста и болотной. Большая часть площади покрыта сосновыми культурами различного возраста

и разной плотности полога. Одновозрастность, однородность, наличие лесных карт, доступность и обилие локальных наземных ориентиров делали этот экспериментальный лесной массив идеальным для лазерного зондирования. Наземные ориентиры (дороги, вырубки, лесные опушки, озера и реки) способствовали точной привязке лазерного профиля.

Сбор данных бортового лазерного зондирования в шт. Джорджия был проведен 11 июня 1985 г. между 18.15 и 20.15 восточного поясного времени; небо было очень пасмурным и временами самолет оказывался под дождем. Три полетных маршрута (рис. 34) были отмечены рядом привязанных белых метеочаров и лентами флуоресцирующего оранжевого брезента, проложенного вдоль дорог и на открытых участках. Лазерные измерения проведены с высоты 150 м при скорости полета 100 м/сек. Частота пульсаций лазера на 1 и 3 маршрутах была 200 гц, на маршруте 2 - 100 гц (Nelson et al., 1988 а).

С помощью 35-миллиметровой маршрутной фотокамеры получено полное фотозображение всех маршрутов. Для совмещения СФГ-данных с лазерными получены цветные фотоснимки. Номинальный масштаб составлял 1:1200, однако он существенно изменился в связи с отклонением самолета от заданной высоты полета. 12 июня 1985 г. около 9 часов с высоты 1830 м проведена среднemaшштабная фотосъемка (1:12000) всей исследуемой площади при ее полной синоптической видимости. С помощью камеры Т-11 получены цветные инфракрасные стереоскопические снимки.

Для определения расстояний от самолета до лесного полога и от самолета до поверхности земли лазерные данные по каждому импульсу обработаны на бортовом оборудовании Уэллос. На графическое табло с высокой разрешающей способностью выводились данные счетчика интервалов (расстояние до точки отражения начального импульса) и данные мультистопа (расстояние до точек существенных вторичных отражений). Если существенное вторичное отражение получали от поверхности земли, оно регистрировалось в последнем некулеровом канале 8-канального мультистопа. Линия земной поверхности оцифровывалась вручную на основе прямых импульсов от земли и совокупности конечных отражений мультистопа, которые оператор посчитал отраженными от земли. Оцифровка линии земной поверхности была более или менее непосред-

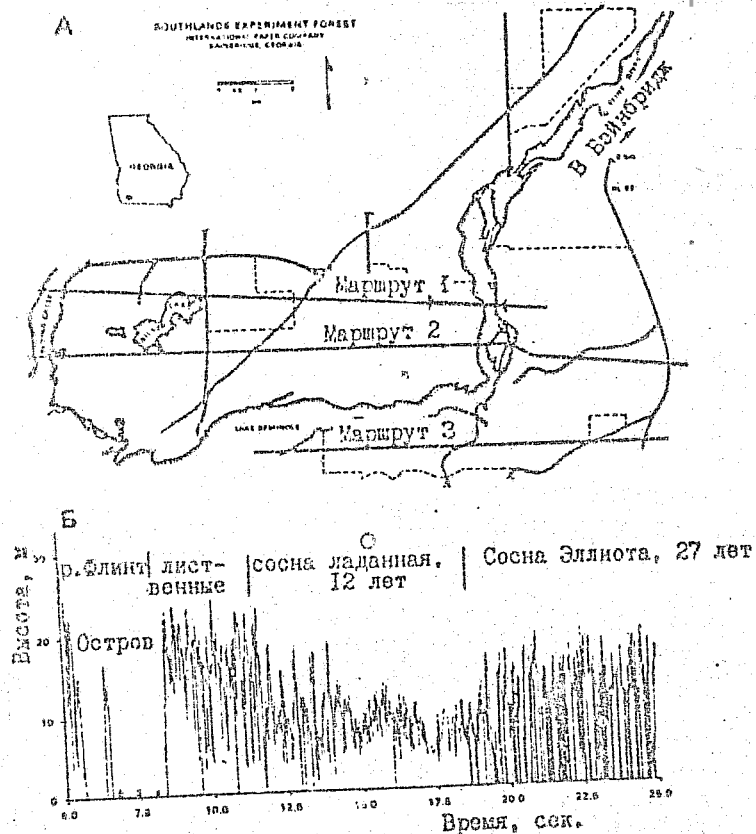


Рис. 34. А - схема лесного массива Международной бумажной компании. Б - данные лазерного профиля, полученные вдоль маршрута 1 над р. Флинт (выделенный на схеме участок). Непосредственно от земли было получено 0,5 % импульсов в лиственных древостоях, 1 % - в древостоях сосны ладанной и 27 % - в древостоях сосны ежовой. Значимые наземные отражения импульсов, предварительно пережатых пологом леса, получены в 17, 25 и 62 % случаев соответственно в лиственных, древостоях сосны ладанной и сосны ежовой. Все маршруты пройдены с востока на запад при скорости полета 100 м/сек. (Nelson et al., 1988a).

ственной, поскольку 31 % импульсов от их общего числа 57000 получены непосредственно от земли и 30 % - от земли поверхности, находящейся под лесным пологом. После оцифровки лидара земли для каждого импульса рассчитывали высоту полога.

Зондирование лесного полога лидаром НАСА было выполнено на более низких высотах и при меньшем размере светового пятна по сравнению с лидаром KILL3, что давало предпосылки для более точной оценки массообразующих показателей лесного полога. Для реализации этих предпосылок была организована тщательная привязка лазерных профилей на местности с помощью навигационных ориентиров (шары и брезентовые полосы), тем не менее, фактический маршрут имел некоторые отклонения. Положение профилей трех маршрутов на фотоснимках и на поверхности Земли определялось с использованием контрольных ориентиров, легко идентифицируемых на лазерном профиле. Вдоль маршрута 1 (11,5 км) было 7 контрольных точек, вдоль маршрута 2 (16,7 км) - десять и вдоль маршрута 3 (7,5 км) - семь.

Линии лазерных профилей разделены между контрольными точками на сегменты по 25 (маршрут 2) и 50 (маршруты 1 и 3) импульсов. На поверхности земли эти сегменты соответствовали номинальной длине 25 м, однако фактическая длина варьировала в зависимости от фактической скорости самолета относительно земли. Положение относительно земли рассчитывалось для каждого сегмента на основе информации, получаемой от инерционной навигационной системы самолета (скорость относительно земли, курс, уклон и угол сноса). Сегменты нанесены на план насаждений и стратифицированы по породам и возрасту. Взята случайная выборка из 125 сегментов с адекватным представителем основных пород и высот древостоев в пределах породы.

Точность наземных и лазерных измерений оценена путем сравнения времени прохождения лазером контрольных точек, определяемого независимо двумя разными исполнителями. Положение лазерных пятен вдоль по маршруту в местах пересечения профилем видимых ориентиров определяется сравнительно точно. Сравнены моменты пересечения 14 надземных контрольных точек; средняя ошибка положения вдоль маршрута составила примерно 4 м (10 микросек.). Предполагалось, что ошибки наблюдений отсутствовали.

Труднее было определить ошибку положения лазерного пятна поперек маршрута, равную суммарной ошибке положения контрольных точек плюс какая-то ошибка наблюдения. Использование фотоснимков и данных положения самолетов позволяло оценить положение контрольных точек на земле поперек маршрута с точностью 1-2 м. Чем дальше от контрольной точки расположена проба, тем более вероятна ошибка ее расположения по траверсу курса. От контрольных точек делали промерочные ходы на расстояние до 850 м (25-34 сегмента). Если ошибка буссоли (1 градус) приходится на 850 м, то смещение пробы относительно фактической трассы полета может составить 17 м (15 м - ошибка наблюдения плюс 2 м - ошибка положения контрольной точки). Однако вследствие случайного характера отклонений, фактическая ошибка положения должна быть меньше.

На каждом из 125 пробных сегментов проведена таксация методом линейной выборки при отборе модельных деревьев с вероятностью, пропорциональной диаметру дерева (деревья с крупными кронами имеют более высокую вероятность попасть в лазерный профиль). Первые 20 м каждого из 125 сегментов служили в качестве базовой линии пробы. Это расстояние устанавливалось с целью обеспечить постоянство длины пробной площади, поскольку длина сегмента (номинально 25 м) изменялась в связи с непостоянством скорости полета относительно земли. У каждого отобранного дерева измеряли диаметр на высоте груди с точностью 0,25 см и общую высоту с точностью 1,5 м. Данные таксации использованы для расчета общего объема деревьев и общей массы в свежем состоянии на 1 га (листва не включалась). Уравнения для оценки объема и фитомассы деревьев взяты из литературных источников для пород: сосна болотная (Baldwin, Saucier, 1983), сосна ладанная (Taras, Clark, 1975; Saucier, Clark, 1985), сосна еловая (Clark, Taras, 1976), сосна Эллиота (Saucier, Clark, 1985) и лиственные (Clark et al., 1985).

Из 125 заложенных пробных площадей 13 были выбракованы из-за проблем с наземным контролем. Данные наземных измерений на каждой из оставшихся 113 проб, включающие оценки запасов и фитомассы древостоев, были скоррелированы с соответствующими лазерными данными. В табл. 4 дан неполный перечень наземных и лазерных показателей, определенных для каждой пробной площади.

Неполный перечень лазерных и наземных измерений, выполненных на каждой 20-метровой пробной площади.

Лазерные измерения	Наземные измерения (га ⁻¹)
Высота 10-наибольших деревьев (м)	Число деревьев, хвойных и лиственных, высота наибольшего дерева (м).
Средняя высота полога, включая импульсы, отраженные от земли	Средняя высота деревьев (м).
Стандартное отклонение высоты полога (м).	Стандартное отклонение высоты дерева (м).
Средняя высота полога, исключая импульсы, отраженные от земли	Средний диаметр дерева на высоте груди ($D_{1,3}$, см)
Процент отражений от земли: импульсы от земли, полученные прямо и из-под полога.	Стандартное отклонение диаметра (см).
Площадь профиля полога: высота полога, проинтегрированная по длине пробы (м ²).	Общий объем дерева (ООД, м ³), общая свежая масса дерева (ОСМД, кг), объем ствола (м ³), свежая масса ствола (кг) для сосен ладанной, еловой, болотной, Эллиота, лиственных, всех хвойных, всех деревьев.
Модифицированная площадь полога: высота полога за вычетом заданного предела исключения, проинтегрированная по длине пробы (м ²). Приняты пределы исключения 2, 5 и 10 м.	Фотодетекторская оценка плотности полога.

2.2.2. Измерение высоты древостоя.

2.2.2.1. Лазерная оценка высоты древостоя в произвольной точке профиля (система лидара КИДЗ).

В имитационных экспериментах В.И. Солодухина с соавт. (1977а) ошибка определения расстояния 10-15 м до кроны дерева при диаметре светового пятна 2,5 см составляла ±10 см. Система лидара НАСА при высоте полета 150 м и диаметре светового пятна 0,75 м обеспечивает точность измерения расстояния до идеальной отражающей поверхности ±15 см.

При тестовых полетах с лидаром КИДЗ высота полета была в пределах 400-850 м при угле расхождения луча 5-20 мрад; диаметр светового пятна составлял в среднем около 6 м, изменялся

в пределах от 2 (400 м; 5 мрад.) до 17 м (850 м; 20 мрад.). Высота адания 16 м измерялась лидаром КЦЛЗ с ошибкой в пределах ± 50 см. Если принять во внимание, что крыша здания представляет идеальную отражающую поверхность, а ее площадь соизмерима с размером лазерного пятна, то при измерении высот деревьев ситуация принципиально иная, и ожидать такой же точности (± 50 см) в этом случае нельзя. Во-первых, отражательная способность кроны вблизи верхушечного побега значительно ниже, чем на периферии кроны; во-вторых, лазерный импульс с большой долей вероятности отражается от боковой поверхности кроны, а не от вершины (рис. 35), и в-третьих, лазерное пятно покрывает кроны не одного, а нескольких деревьев, и поскольку выполнить в натуре привязку отдельного дерева пока невозможно, речь может идти об измерении лишь высоты древостоя в данной точке (соответствующей размеру лазерного пятна) профиля, а не высоты дерева. Чем меньше лазерное пятно, тем труднее его привязать в натуре к конкретному дереву.

Изложенные особенности являются источником ошибки, имеющей систематическую и случайную составляющие. В табл. 5 приведены систематические ошибки определения высоты древостоя в точке профиля, выраженные средней разностью между лазерным и полевыми замерами. Систематическая ошибка для хвойных была на уровне $-1,5$ м, что соответствует тенденции отражения импульсов не от вершины дерева, а от ветвей внутри кроны. Этот феномен был предсказуем также в связи с пониженной отражательной способностью кроны вблизи ее верхушечного побега. Подобное явление было выявлено и в эксперименте с лиственными древостоями, однако величина ошибки в этом случае была тесно связана с диаметром лазерного пятна: чем шире луч, тем меньше ошибка. Эта тенденция слабее выражена у хвойных. При угле расхождения луча 10 мрад. систематическая ошибка у лиственных пород в облиственном состоянии ниже (в среднем на 2,4 м), чем в безлиственном. В целом же тенденции снижения систематической ошибки по мере увеличения угла расхождения луча была примерно одинаковой как в облиственном, так и в безлиственном состоянии лиственных пород.

Случайная составляющая ошибки, выраженная как стандартное отклонение разности между лазерным и натурным замерами, была незначительной у хвойных, но существенно большей - у лиственных (табл. 5). Это различие, вероятно, связано с более одно-

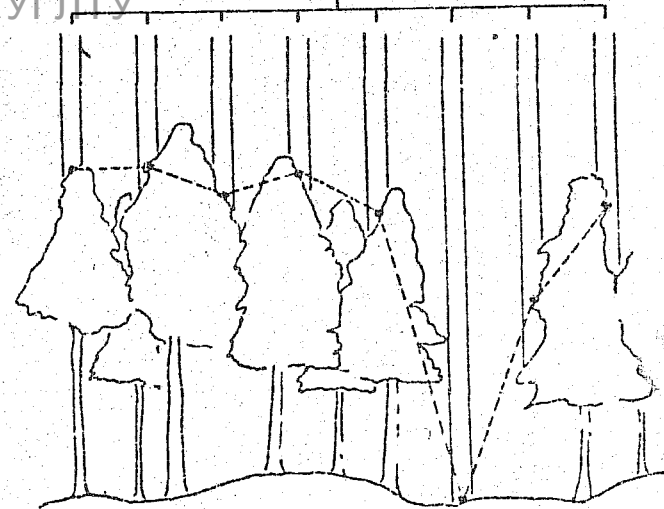


Рис. 35. Схема отражения лазерных импульсов от крон деревьев, показывающая занижение общей высоты профиля (пунктирная линия) (Aldred, Bonner, 1985).

Таблица 5
Систематическая и случайная ошибки (м) при измерении высоты древостоя в точке профиля по отдельным импульсам лазера КЦЛЗ

Угол расхождения луча, мрад.	Лиственные						Хвойные		
	с лиственной			без листвы			5	10	20
	15	10	20	5	10	20	5	10	20
Способ распознавания импульсов	Систематическая ошибка								
на пороге 20 %	-6,0	-2,4	-1,4	-6,6	-5,9	-1,9	-1,5	-1,6	-1,3
на пороге 50 %	-6,8	-3,5	-1,7	-5,8	-5,2	-0,5	-1,9	-2,0	-1,7
между пиками импульсов	-7,2	-4,2	-2,9	-9,1	-7,7	-2,7	-2,8	-3,2	-3,2
	Случайная ошибка								
на пороге 20 %	6,5	5,5	5,1	4,8	3,1	2,8	1,9	1,8	0,7
на пороге 50 %	6,3	5,7	4,6	4,9	2,9	2,6	1,8	1,6	0,9
между пиками импульсов	6,2	5,5	4,5	7,0	4,4	4,0	1,5	1,4	0,9

родным строением полога исследуемых хвойных древостоев (культуры) по высоте и плотности, а также с возможностью более простого и точного замера высот в натуре. Явно большая случайная ошибка у лиственных может также быть связана с трудностью идентификации точек отражения лазерного сигнала в пологе и невозможностью получения их репрезентативной выборки.

Стандартное отклонение разности замеров несколько снижается по мере увеличения диаметра светового пятна как у хвойных, так и у лиственных. Этот феномен, видимо, связан с эффектом "усреднения" отражений от объектов большей площади. Случайная ошибка у лиственных пород в облистненном состоянии оказалась несколько большей, чем в безлиственном (табл. 5). Тенденция снижения случайной ошибки с увеличением угла расхождения луча сохранилась.

В ходе предварительного анализа отдельных лазерных импульсов было проверено несколько определителей высоты древостоев по форме волны импульса. Было установлено, что определители "между пиками" и "между фронтами импульса" были лучшими в сравнении с определителем "между спадами импульса".

В ходе последующей серии экспериментов был исследован более широкий диапазон порогов определителя (от 1 до 100 % максимальной высоты первого пика) с целью выбрать из них оптимальный. Вся совокупность порогов была проанализирована по данным множественных отражений импульса от 17 древостоев известной высоты как хвойных, так и лиственных. Рассчитано линейное регрессионное уравнение:

$$H_K = a_0 + a_1 \cdot H_L \quad (9)$$

где H_K и H_L - соответственно контрольный и лазерный замеры высоты полога, м. Регрессионный анализ позволил выявить случайный и систематический эффекты и дать характеристику связи в виде остаточного стандартного отклонения и коэффициента детерминации. По минимальной величине первого и максимальной - второго из них установлено оптимальное значение порога определителя (рис. 36), которое оказалось равным 85 %, а порог 100 % (т.е. определитель "между пиками") дал результат, близкий к оптимальному. Регрессионное уравнение, соответствующее порогу 85 % (рис. 37) показывает, что измеренная лазером высота древостоя в точке устойчиво (на 2 м) меньше контрольной.

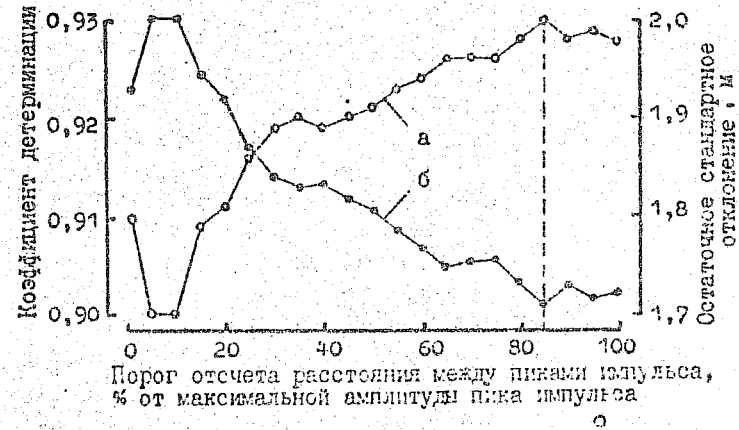


Рис. 36. Зависимость коэффициента детерминации (а) и остаточного стандартного отклонения (б) уравнения (9) от величины порога определителя для 17 древостоев различной высоты, по данным А.Олдрида и Дж.Боннора (Aldred, Bonnor, 1985).
Оптимальное значение порога определителя (85 %) соответствует минимальному значению остаточного стандартного отклонения (1,712 м) и максимальному значению коэффициента детерминации (0,930).

Для улучшения репрезентативности лазерных пятен на полог были взяты кластеры выборочных значений измеренных лазером высот и среднее из них сравнивалось с контролем. В результате систематическая ошибка несколько снизилась по сравнению с единичным лазерным определением, а случайная составляющая ошибки иногда была выше; в целом же кластерный метод, в отношении улучшения результата мало что дает.

Для повышения точности определителей было использовано несколько критериев отбраковки тех лазерных показаний высоты, которые не имеют множественных отражений либо выходят за пределы ожидаемого диапазона высот древостоя. Например, если некоторые предыдущие лазерные замеры или иные априорные данные позволяют предполагать, что высота древостоя равна, скажем, 20 м, то все показания, отклоняющиеся от этого значения более, чем на ±10 м должны быть отбракованы, а все оставшиеся в "окне" используются для уточнения предполагаемой средней

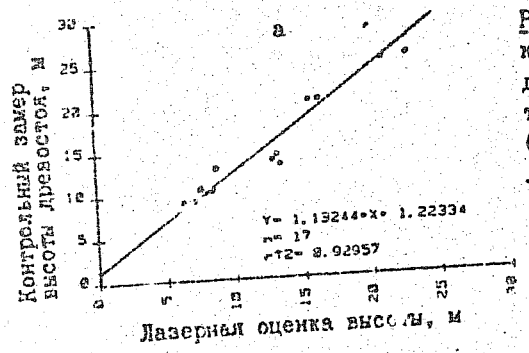
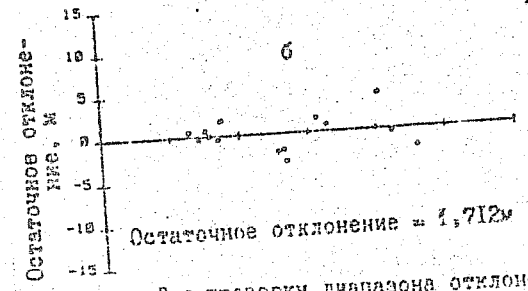


Рис. 37. Зависимость контрольной высоты древостоя (а) и остаточного отклонения (б) от измеренной лазером высоты, по замерам множественных отражений импульса на пороге 85 %, выполненным в 17 древостоях различной высоты (Aldred, Воллог, 1985).



величины. Для проверки диапазона отклонений может применяться некоторая функция стандартного отклонения или иная характеристика изменчивости. Введение понятия "окно" повлекло за собой существенное снижение как случайной, так и систематической составляющих ошибки. Однако выбор подходящего "окна" был произвольным, и его нужно было изменять в зависимости от характеристик древостоя. Использование тщательно подобранного "окна" может существенно улучшить результаты. По-видимому, необходима также отбраковка отраженных импульсов с одним единственным пиком, которые не дают информации о высоте древостоя. В любом случае такие отраженные импульсы необходимо учитывать для последующего анализа плотности полога.

2.2.2.2. Лазерная оценка средней высоты древостоя на профиле таксационного выдела (система лидара ИЦДЗ).

Когда методы идентификации импульсов разработаны, можно от анализа содержания информации отдельных импульсов перейти к анализу последовательности множественных импульсов на лес-

ных площадях с относительно однородным пологом (таксационных выделах). Методика основана на анализе серии импульсов, отраженных от древостоя, выделенного на аэрофотоснимке. Отраженные импульсы пропускались через определитель измерения высоты и делились на две категории: имеющие множественные отражения и имеющие только одно отражение. В последнем случае импульс не нес информации о высоте древостоя. Далее множественные отражения классифицировались по количеству пиков: два, три, четыре и более четырех. Первый и последний пики импульса использовались для измерения высоты древостоя с помощью определителя на пороге 85 %. Высоты, измеренные по всем импульсам, усредняли и получали среднюю высоту древостоя выдела.

Профиль лесного полога и земной поверхности строили по значениям высот, измеренных инфракрасным и зеленым лучами лазера. Инфракрасный луч связан со стоп-определителем, который, как только инфракрасный импульс возвращается, переводит прошедшее время в расстояние и делает соответствующую запись. Поскольку в данном случае не было информации о продольных и поперечных смещениях, изменение положения самолета не учитывалось и вертикальность лазера не корректировалась. Для получения расстояния от самолета до наземного объекта, т.е. до вершин крон, замеренное по импульсу расстояние делилось на два и наносилось на диаграмму (рис. 38, 39, 40).

Значения высот древостоя, полученные после обработки информации зеленого луча, наносились на диаграмму в виде вертикальных точечных линий, вниз от вершин крон. Линия, соединяющая точки оснований вертикальных отрезков, представляет профиль земной поверхности под пологом (рис. 38, 39, 40). Однако, если очередная точка резко уходила вверх или вниз относительно соседних точек, то она в построении профиля земной поверхности не участвовала. Тем самым исключались внезапные скачки или искажения профиля земли, вызванные импульсами, которые не смогли полностью проникнуть полог.

Известно, что высоту отдельных деревьев в древостое можно измерить наземным или СВЧ-способом с отклонением ± 2 м на доверительном уровне 95 % (Aldred, Lowe, 1978). Средняя высота древостоя по измерениям отдельных деревьев обычно определяется с точностью $\pm 3-4$ м. Высоту древостоя на аэрофотоснимках масштаба 1:15000 или 1:20000 можно измерить с точнос-

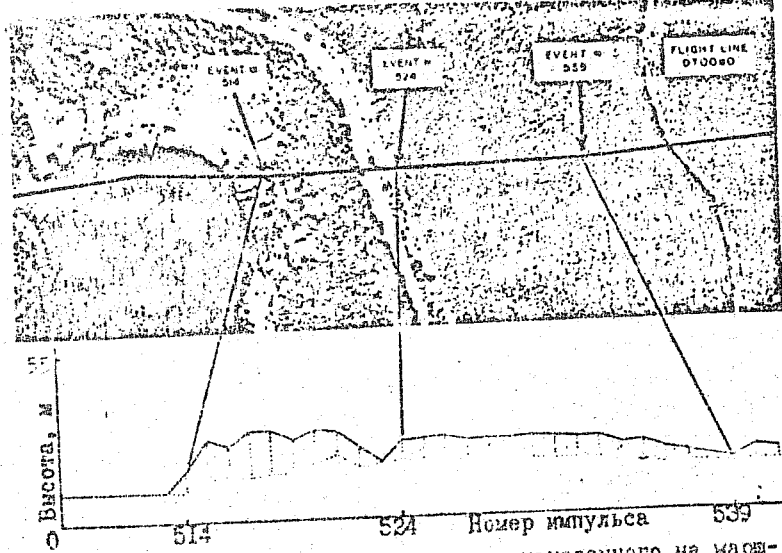


Рис. 38. Иллюстрация лазерного следа, нанесенного на маршрутный фотоснимок (вверху). Профиль лесного полога и поверхности земли вдоль луча полета, построенный по измерениям лазером расстояния от самолета до полога и по значениям высот деревьев, полученным после обработки множественных отраженных импульсов (внизу) (Aldred, Bonner, 1985).

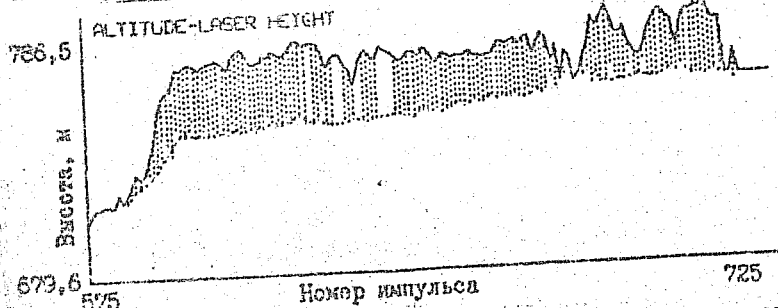


Рис. 39. Двойной профиль лиственного полога и земли, полученный по разности первого и последнего пиков отраженного импульса и по расстоянию от самолета до полога. Около 15 % импульсов не смогли пронизать полог (Aldred, Bonner, 1985).

сты 45 м, при условии, что в окнах полога просматривается земля. Наименьшая градация высоты при классификации древостоев в лесохозяйственном менеджменте и производстве Канады обычно составляет 5 м. А.Олдрид и Дж.Боннер (Aldred, Bonner, 1985) использовали эти придержки в качестве окончательного критерия точности 45 м.

Данные, полученные в ходе двух тестовых залетов на порых двух этапах исследований, были разделены на две части: одна из них используется для методических разработок и предварительной проверки лазерных данных, а вторая зарезервирована для проверки окончательных результатов. С использованием резервных наборов данных были восстановлены лазерные траектории, и серии лазерных импульсов наложена вдоль маршрутных трансект. На трансектах были определены участки, соответствующие выделам, причем границы должны выбираться так, чтобы участки отчетливо различались по средней высоте, плотности и составу древостоев или имелись опознаваемые детали земной поверхности, позволяющие легко связать ее характеристики с лазерными данными. Принцип выделения участков трансекты показан на рис.38.

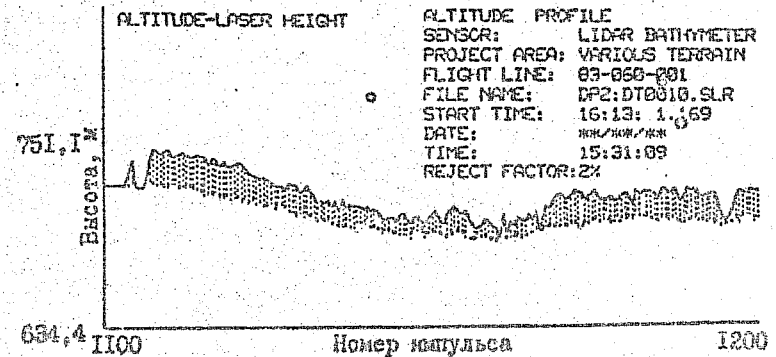


Рис. 40. Двойной профиль хвойного полога и земли, полученный по разности первого и последнего пиков импульса и по расстоянию от самолета до полога. Около 5 % импульсов не смогли пронизать полог (Aldred, Bonner, 1985).

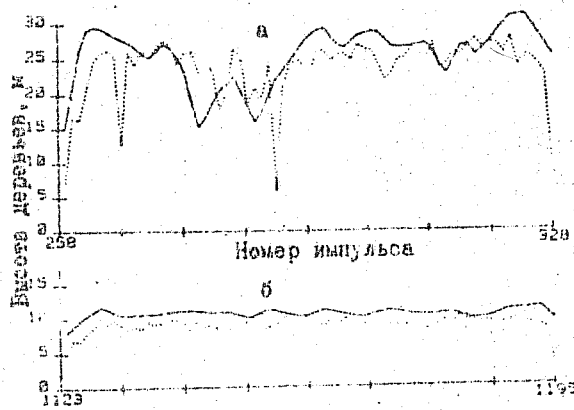


Рис. 4I. Профили лиственного (а) и хвойного (б) древостоев, построенные по данным лазерных и полевых замеров. — полевые данные, лазерные данные (Aldred, Bonnot, 1985).

Вдоль участков трансекты через определенные интервалы проводили натурные замеры высоты древостоев. Для привязки участков в полевых условиях использовались аэрофотоснимки с нанесенными на них трансектами. По отдельным измерениям определяли высоту древостоев с точностью до десятых долей метра. Высота древостоя была принята в качестве непрерывной переменной; лазерные оценки, их контрольные полевые и СВГ-оценки принимались как парные наблюдения и обрабатывались регрессионным методом. Регрессионный анализ дает возможность идентифицировать и количественно выразить систематические смещения, устранить скалярные эффекты и оценить точность уравнения путем анализа остатков. В принципе регрессионная модель позволяет устранить систематические и скалярные эффекты (при условии, что они постоянны) и дать скорректированную оценку высоты древостоя, сопоставив ее с контролем. На рис. 4I показано соотношение высот, измеренных лазером и в поле. После корректировки на величину средней систематической ошибки были определены для пяти значений угла расхождения луча остаточные систематические ошибки (как средние величины смещений) и варьирование (как случайное отклонение), показанные в табл. 6.

Была рассчитана также среднеквадратическая ошибка, отражающая совмещенный эффект остаточной систематической и случайной ошибок измерения. Несколько более точные результаты получены при широком угле расхождения луча: при 20 мрад. среднеквадратическая ошибка снизилась до 2,1 м (табл. 6). Это

Статистики точности оценки высоты древостоев по данным импульсно-периодического лазера ИЦЛЗ, м

Угол расхождения луча, мрад:	1	2	5	10	20
Среднее смещение	-2,1	-1,8	-1,6	-0,1	1,1
Случайная ошибка	2,3	3,2	2,6	2,4	1,8
Среднеквадратическая ошибка	3,1	3,7	3,1	2,4	2,1
Число наблюдений	24	25	24	24	23

эквивалентно точности $\pm 4,1$ м на доверительном уровне 95 %, что превышает уровень требуемой точности.

2.2.2.3. Прогнозирование наземной оценки высоты деревьев с использованием лидара НАСА.

Система лидара НАСА при низкой высоте полета и диаметре светового пятна 75 см, а также при обеспечении тщательного наземного контроля позволяет прогнозировать наземные оценки высоты отдельных деревьев, а не высоты полога в определенной точке профиля. Было взято несколько различных лазерных показателей, отражающих разные характеристики высоты лесного полога, с целью установить, какой из них является лучшей для точного прогноза наземных оценок высот деревьев (Nelson et al., 1988 а). Эти лазерные показатели включали в себя:

- 1) различные комбинации наибольших лазерных оценок высоты деревьев на пробе,
- 2) среднюю высоту пробы (все импульсы, полученные на пробе, включая непосредственно отраженные от земли),
- 3) среднюю высоту полога (за исключением импульсов, прямо отраженных от земли) и
- 4) среднее значение наибольших лазерных оценок и среднюю высоту пробы (табл. 7).

Оказалось, что переменные по первой позиции, включающие первую наибольшую, вторую наибольшую, ... десятую наибольшую высоты, средние значения двух наибольших, трех наибольших и т.д. высот, дают по существу одинаковые результаты. Для первой позиции было принято среднее значение трех наибольших определенных лазером высот. Эти лазерные показатели высот были рассчитаны в зависимости от средних и наибольших высот

Таблица 7.

Лазерные характеристики высоты полога, рассчитанные для 20-метровых маршрутных сегментов (пробных площадей).

Обозначение	Лазерные характеристики высоты полога
СРЗМ	- среднее значение трех наибольших лазерных высот.
СРН	- средняя высота пробы; учитываются все импульсы, в том числе отраженные прямо от земли. Эта переменная прямо пропорциональна площади профиля полога, т.е. площади, заключенной между верхней границей полога и поверхностью земли.
СРНБЗ	- средняя высота полога; учитываются только импульсы, прошедшие сквозь полог (прямо отраженные от земли исключаются).
МППЗ	- модифицированный профиль полога с 2-метровым порогом исключения. Это площадь между верхней границей полога и линией, проведенной на расстоянии 2 м от поверхности земли.
МПП5	- то же, с 5-метровым порогом.
МПП10	- то же, с 10-метровым порогом.

деревьев, оцененных наземным способом с использованием простой линейной модели. Результаты показали, что 1) среднее значение трех наибольших определенных лазером высот (СРЗМ) и 2) средняя высота полога, не учитывая импульсы, прямо отраженные от земли (СРНБЗ), объясняют большую часть изменчивости средней высоты деревьев, определенной наземным способом. Первый из названных показателей в общем завышает наземную оценку высоты деревьев, поскольку он характеризует только крупнейшие деревья пробы, игнорируя любые мелкие деревья, протаксированные на пробе. Второй из них несколько занижает среднюю высоту, полученную при наземной таксации, поскольку лазерный профиль наиболее часто пересекается с боковыми ветвями дерева, но не с верхушечными его побегами (рис. 42). Среднее значение трех наибольших определенных лазером высот лучше всего подходит для оценки наибольшей высоты деревьев на пробе, определенной наземной таксацией. Результаты расчета уравнений вида $Y = a_0 + a_1 \cdot X$ для этих переменных приведены в табл. 8 и показаны на рис. 43.

Таблица 8.

Линейные зависимости $Y = a_1 \cdot X + a_0$ между показателями высоты деревьев, полученными лазером и наземными измерениями

Зависимая переменная:	Наземная оценка средней высоты деревьев			Наземная оценка наибольшей высоты			
	СРЗМ ^{к)}			СРНБЗ ^{к)}			
Независимая переменная:	СРЗМ ^{к)}			СРНБЗ ^{к)}			
Массив данных	n	a ₁	a ₀	R ²	a ₁	a ₀	R ²
Все пробы	113	0,639	5,308	0,64	0,720	6,809	0,63
Хвойные	85	0,689	4,496	0,65	0,771	6,106	0,65
С.ладанная	11	0,518	6,318	0,83	0,596	7,300	0,78
С.ежовая	11	0,366	11,64	0,74	0,476	11,34	0,83
С.Эллиота	36	0,951	-0,697	0,62	0,676	4,664	0,49
С.болотная	17	0,759	3,094	0,78	0,895	3,965	0,87
Лиственные и смешанные	28	0,505	7,231	0,62	0,570	8,596	0,57

к) Обозначения см. в табл. 7.

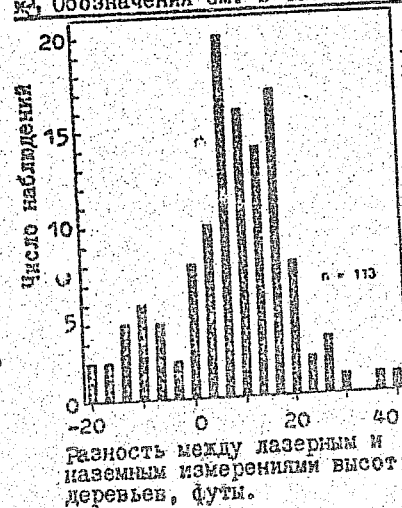


Рис. 42. Распределение разностей между лазерными (СРНБЗ) и наземными замерами высот деревьев (Nelson et al., 1988b).

Даже если данные лидара обеспечивают очень точные оценки расстояний до верхней границы лесного полога и до поверхности земли (Krabill et al., 1984), все же имеется значительное варьирование между значениями высот деревьев, измеренных лазером и наземным способом. Это варьирование обусловлено, в частности, тем фактом, что лазер регистрирует высоты не столько верхушечного побега, сколько боковых ветвей дерева. Тогда это варьирование должно снижаться в густых одновозрастных древостоях, где количество импульсов, отраженных от боковых нижележащих ветвей полога, снижается. Эта закономерность была замечена после стратификации

деревьев, футов.

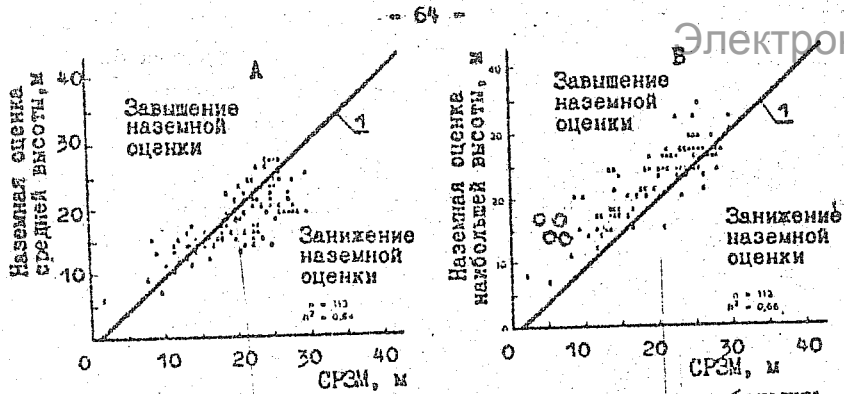


Рис. 43. Соотношение между средним значением трех наибольших определенных лазером высот (SRSM) и А) средней высотой деревьев по наземной таксации и Б) наибольшей высотой деревьев по наземной таксации. 113 наблюдений стратифицированы по плотности полога: (А) 0-20 % импульсов отражено прямо от земли, (Б) 20-40 %, (С) 40-60 %, (D) 60-80 %, (Е) 80-100 % (открытый полог или редколесье); (х) множественные наблюдения. 1 - линия равных наземных и лазерных оценок высот.

данных 113 пробных площадей по проценту импульсов, отраженных прямо от земли (критерий плотности полога). Высоты, измеренные лазером и на земле, более тесно коррелируют на пробных площадях с низким процентом отраженных от земли импульсов (т.е. с высокой плотностью полога). Вторая установленная закономерность - расхождение между высотами, измеренными лазером и на земле, увеличивается по мере снижения доли лиственных в составе. Отобранные для исследования 113 пробных площадей были представлены главным образом хвойными (более 80 % проб имели в составе хвойных более 70 %) и имели совершенно открытый полог (средняя дешифровочная плотность полога 57 %). Поэтому варьирование между высотами, измеренными лазером и на земле, было высоким.

Проверка регрессионных моделей определения фактической высоты древостоя по лазерным оценкам, выполненная в ходе дополнительных замеров (см. табл. 14 б в разделе 3.2.3), показала наличие существенных систематических занижений - на 27-29 %. Случайные отклонения составили 4-5 %.

2.2.3. Измерение плотности полога

Данные бортового лазера-лидара содержат информацию не только о высоте, но и о плотности полога древостоя, которая тесно связана с полнотой (степенью занятости пространства роста при одной и той же высоте древостоя).

2.2.3.1. Оценка плотности полога лидаром КИДЗ.

При оценке плотности полога древостоев системой лидара КИДЗ были применены тот же подход и те же переменные, что и при измерении высоты древостоев. Анализировались следующие переменные (рис. 44):

- 1 - импульсы, миновавшие полог (процент отраженных импульсов, имевших только один пик);
- 2 - пик 1 (средняя максимальная амплитуда импульсов, отраженных от вершин деревьев, или первый пик);
- 3 - пик 2 (то же, от земной поверхности, или последний пик);
- 4 - отношение амплитуд (среднее отношение амплитуд импульсов, отраженных от земли и от полога);
- 5 - число пиков (среднее число пиков, множественного отраженного импульса);
- 6 - общая площадь (средняя общая площадь множественного отраженного импульса);
- 7 - площадь наземного отражения (часть общей площади множественного отраженного импульса, соответствующая импульсу, отраженному от земли);
- 8 - площадь пологового отражения (то же, от растительных ярусов);
- 9 - высота (средняя высота древостоев).

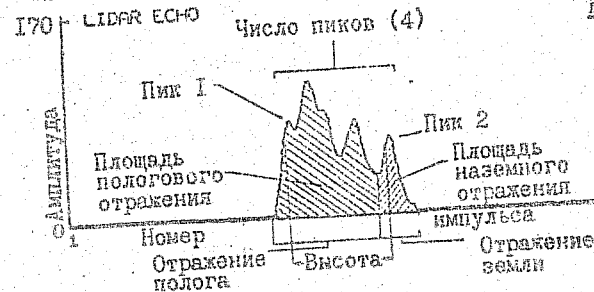


Рис. 44. Множественное отражение импульса с некоторыми характеристиками, используемыми при оценке плотности полога (Ala-geef, Vallon, 1955).

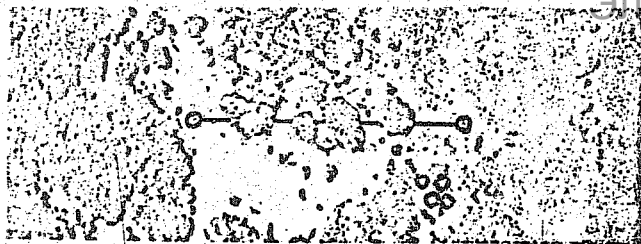


Рис. 45. Иллюстрация определения плотности полога на фотоснимке вдоль сегмента профиля. Около 50 % длины сегмента приходится на кроны деревьев (Aldred, Bonner, 1985).

Контрольные данные плотности полога определяли СФГ-способом (рис. 45) путем кумулятивного измерения перекрытых кронами длин участков профильной линии (трансекты) и деления ее на общую длину трансекты, т.е. по аналогии с наземной имитацией лазерной съемки (Солодухин и др., 1976). Это критерий плотности, физически наилучшим образом совместимый с лазерными данными.

С использованием корреляционного и регрессионного анализа исследовались взаимосвязи между плотностью полога и лазерными переменными. Уравнения связи оценивали по "наилучшей подгонке", характеризуемой стандартной ошибкой регрессии и коэффициентом детерминации. Наилучшие модели всегда включали в качестве переменных процент одиноковых импульсов и среднюю амплитуду отраженного от земли импульса. Установлено, что чем выше процент одиноковых импульсов, тем ниже плотность полога; чем слабее отражение от земли, тем плотнее полог.

Характеристики полученных регрессионных моделей связаны с углом расхождения луча. В табл. 9 для пяти различных углов расхождения приведены характеристики моделей и включенные в них переменные. Лучшей оказалась модель для угла расхождения 5 мрад., в которой переменные 1, 2, 3, 4 и 9 статистически

Таблица 9.

Характеристики моделей плотности полога, использующих данные лидара КЦДЗ.

Угол расхождения луча, мрад.	Номера переменных, вошедших в модель	R ²	Стандартная ошибка регрессии, %
1	1, 3, 6, 8, 9	0,80	14,9
2	1, 2, 3, 5, 6	0,66	18,1
5	1, 2, 3, 4, 9	0,90	7,5
10	1, 2, 3, 4, 9	0,89	9,5
20	1, 2, 3, 4, 8	0,84	13,9

значимы на доверительном уровне 95 %. Модель проверена по лазерным данным, полученным при пяти разных углах расхождения луча в 24 древостоях. Результаты проверки показали, что оценка плотности полога по лазерным данным не выходит за пределы ± 15 % от фактической в течение 95 % времени полета (95-процентный доверительный интервал).

Была выполнена также более обстоятельная проверка этой модели на тестовых данных, полученных в 61 древостое с плотностью полога, изменяющейся в диапазоне от 10 до 100 %. Значения плотности полога распределяли по следующим классам:

Класс	Пределы (%)	Среднее (%)
А	0-20	10
Б	21-40	30
В	41-60	50
Г	61-80	70
Д	81-100	90

Результаты лазерных оценок плотности полога сравнивали с СФГ-значениями, результаты представлены в виде корреляционной матрицы с 20-процентными классами плотности полога (табл. 10).

Таблица 10.

Матрица парного сопоставления оценок плотности (по 5 классам) полога, полученных лазерным (КЦДЗ) и СФГ-способом.

Класс	Лазерные оценки плотности					Итого
	10	30	50	70	90	
10	-	-	1	2	-	3
30	2	2	2	2	1	9
50	-	-	4	1	-	5
70	-	-	1	6	2	9
90	-	-	1	8	25	35
Всего	2	2	9	19	29	61

Из общего количества древостоев (61) в 38 случаях лазерные измерения плотности полога совпали с контролем (т.е. находились на диагонали, обведенной линией), что составляет вероятность 62 %. Этот результат не совсем удовлетворяет требуемой точности, тем не менее идентификацию плотности полога с помощью лидара ИЦДЗ можно считать удовлетворительной. В пределах одного класса плотности (90) из 29 древостоев 26 были правильно идентифицированы по плотности полога, что составило вероятность 89 %. Поскольку древостои отбирались по методу случайной выборки, пять классов плотности представлены не одинаково, и более всего - класс плотности 90.

2.2.3.2. Оценка плотности полога лидаром НАСА.

Плотность полога определялась на аэрофотоснимках, где по привязочным маркерам обозначалась линия полета. На нее накладывали 25-точечную палетку, считали количество точек, совпадающих с кронами деревьев, и делили это число на 25 (Nelson et al., 1984). Анализировали связь плотности полога со следующими лазерными переменными:

- 1 - количество пар последовательных импульсов, в которых расстояние от самолета до крои различалось более, чем на 5 мсек.;
- 2 - отношение количества импульсов, достигших земли, к общему числу импульсов, отраженных от крои;
- 3 - отношение количества импульсов, где высота дерева не зарегистрирована по форме волны, к общему количеству импульсов, отраженных от крои;
- 4 - отношение количества импульсов, где высота дерева зарегистрирована по форме волны, к общему количеству импульсов, отраженных от крои;
- 5 - отношение количества импульсов, где высота деревьев слишком мала, чтобы зарегистрировать отражение от земли (выбрано слишком большое расстояние задержки), к общему количеству импульсов, отраженных от крои;
- 6 - площадь профиля полога - площадь профиля между линией верхней границы полога и линией рельефа;
- 7 - отношение количества импульсов, отраженных прямо от земли плюс отраженных от земли под пологом, к общему числу импульсов;

8 - разность между максимальной и средней (с учетом импульсов, отраженных прямо от земли) лазерными оценками высоты деревьев, деленная на максимальную оценку;

9 - 7 x 8.

Результаты регрессионного анализа приведены в табл. II отдельно для двух полетных маршрутов на горе Голубая в Пенсильвании (Nelson et al., 1984). В регрессионном анализе бы-

Таблица II.

Результаты регрессионного анализа по отбору значимых лазерных переменных лидара НАСА для оценки плотности полога.

И переменная	Две переменных!	Три переменных!	4 переменных
Маршрут 1			
№ переменных	+3	-4 +6	-4 +6 -1
R ²	0,53	0,60	0,62
Маршрут 2			
№ переменных	+3	-4 +6	-4 +6 +2
R ²	0,45	0,62	0,65

и) символы + или - перед номерами переменных означают соответствующие знаки регрессионных коэффициентов.

ло задействовано 9 переменных, но поскольку 91 % изменчивости, объясняемой этими девятью переменными, приходится лишь на четыре переменные, то общее число включенных переменных (табл. II) не превышало четырех. Наиболее информативной для определения плотности полога оказалась лазерная переменная 3 - отношение количества импульсов, где высота дерева не зарегистрирована по форме волны, к общему числу импульсов, отраженных от крои. Наряду с 3, наиболее информативна также переменная 4, однако вследствие их взаимной корреляции применение одной из них в наборе переменных исключает возможность использования другой. Плотность полога прямо пропорциональна площади профиля полога, поскольку более плотные древостои перекрывают лазерные импульсы в более высоких точках полога.

2.2.4. Оценка породного состава.

Для определения породного состава по лазерным данным (лидар ИЦДЗ) используются те же древостои и те же переменные, что и для расчета регрессионных моделей плотности полога. В

каждом древостое по аэрофотоснимкам дешифрируется породный состав (соотношение лиственных и хвойных) на полосе маршрутной трансекты, оставленной лазерными следами. Выделены следующие градации и критерии:

Градация	Критерий
X	Преимущественно хвойные (35 % и более).
C	Смесь хвойных и лиственных (доля хвойных 25-75%)
Л	Преимущественно лиственные (75 % и более).

Для проверки эффективности алгоритма идентификации пиков лазерные данные распределили согласно трем градациям состава и сравнивали с распределением древостоев по количеству пиков отраженных импульсов, используя корреляционные матрицы. Оказалось, что трехпиковые импульсы не связаны с породным составом, а коррелируют с ним только импульсы с двумя, четырьмя и большим числом пиков. Установлено также, что вклад переменных 3, 4 и 6, включенных в модель, статистически не значим. Лучший результат был получен от пятой переменной (число пиков импульса) при угле расхождения луча 10 мрад. Эта наиболее эффективная модель использована для идентификации по ней 120 участков трансект, подобранных с таким расчетом, чтобы они представляли максимально широкий диапазон высот, плотности и соотношения пород, а также их сочетаний с различными углам расхождения луча. В качестве контроля эти участки идентифицировались по породному составу СИГ-способом с проверкой в натуре. Результаты лазерной идентификации древостоев по породному составу представлены в табл. 12. Только в 46 древостоях

Таблица 12

Матрица парного сопоставления оценок породного состава (три градации), полученных лазерным (КЦДЗ) и наземным (СИГ) способом.

Градация	Лазерные оценки породного состава			Итого
	Лиственные	Смешанные	Хвойные	
Лиственные	8	35	12	55
Смешанные	5	32	8	45
Хвойные	3	11	5	20
Всего	16	78	26	120

(обведенная диагональ в табл. 12) из 120 имеют место совпадения оценок, что составило 38 %, чуть выше вероятности случай-

ного совпадения (33 %), т.е. генератор случайных чисел мог дать почти такие же результаты. Это недостаточно для удовлетворения даже минимальных требований точности и свидетельствует о неудовлетворительной оценке породного состава посредством лидара КЦДЗ. Однако проверка выполнялась при облиственном состоянии древостоев. При безлистном состоянии оценки будут лучше, однако получение такой информации по аэрофотоснимкам потребует существенно меньших усилий.

Большие возможности для распознавания пород имеет лазерные системы при исследовании эффекта деполаризации отраженного сигнала в ИК-зоне спектра (Kalshoven, Dabney, 1988, 1990) и в исследовании явления вынужденной флуоресценции (Hoge et al., 1983; Sharpelle, Williams, 1987), краткая информация о которых будет дана в разд. 4.

ВЫВОДЫ.

1. Имитация бортовой лазерной съемки в наземных экспериментах показала возможность надежного определения основных массообразующих показателей - высоты дерева и древостоя, среднего диаметра кроны и сомкнутости полога, а также определения наземной составляющей ошибки измерения, обусловленной структурой древостоя, но не технологией бортовой лазерной съемки.
2. Система лидара КЦДЗ обеспечивает возможность измерения не высоты конкретного дерева, а высоты древостоя в данной точке профиля: при диаметре светового пятна около 6 м регистрируется высота группы деревьев, точная идентификация которой на местности невозможна из-за проблем с наземной привязкой.
3. Система лидара НАСА при диаметре светового пятна 0,75 м дает принципиальную возможность измерения высоты отдельного дерева, однако эта возможность трудно реализуема в связи с имеющимися пока проблемами точной идентификации лазерного следа на местности.
4. Лазерная оценка высоты древостоя всегда дает систематическое занижение вследствие плохой отражательной способности верхней части кроны, а также вследствие того, что лазерный импульс обычно отражается от боковой поверхности кроны, а не от вершины дерева.

- 5. При увеличении размера светового пятна с 2-5 до 10-15 м систематическое занижение высоты древостоя в точке системой КЦДЗ у лиственных сокращается с 6,0 до 1,5 м, а у хвойных находится на постоянном уровне - около 2 м. Случайная составляющая ошибки при определении высоты древостоя в точке профиля системой КЦДЗ при увеличении светового пятна снижается у лиственных с 5,0 до 1,5 м, а у хвойных - с 1,0 до 0,8 м вследствие эффекта усреднения отражений от объектов большей площади.
- 6. После корректировки на величину систематической ошибки оценки высоты древостоя в точке профиля системой КЦДЗ рассчитаны ошибки определения высоты древостоя на выделе без разделения по породам. При увеличении диаметра светового пятна в вышеуказанном диапазоне остаточная систематическая ошибка изменялась в пределах от -2,1 до +1,1 м, случайная снижалась с 2,3 до 1,8 м, а среднеквадратическая - с 3,1 до 2,1 м.
- 7. Точность оценок высоты деревьев системой лидара НАСА оценивалась по тесноте связи между лазерными и наземными данными, которая по материалам ПЗ пробных площадей составила в среднем 0,64-0,66 (R^2) и колебалась по породам в диапазоне 0,62-0,87. Остаточное варьирование между значениями высот, полученными лазером и на земле, возрастает по мере снижения плотности полога и доли лиственных в составе.
- 8. Данные дополнительных залетов с бортовым лидаром НАСА по 6 маршрутам общей протяженностью 70 км показали систематическое занижение высоты полога в среднем на 4 м (27-29%).
- 9. Оценка плотности полога системой КЦДЗ не выходит за пределы $\pm 15\%$. Однако при идентификации плотности полога по 5 градациям в пределах от 10 до 90 % по данным 61 выдела совпадение оценок получено в 38 случаях, что обеспечивает уровень вероятности 62 %. Уровень вероятности правильной идентификации древостоев высшей градации плотности составил 89 %. Наиболее информативна совокупность пяти лазерных переменных, в числе которых - процент отраженных импульсов, миновавших полог, а также амплитуды импульсов, отраженных от полога и от земли. Уровень объясненной ими

изменчивости плотности полога колеблется от 0,66 до 0,90 и связан с диаметром светового пятна. Наилучший результат ($R^2 = 0,90$) дает регрессионная модель при угле расхождения луча 5 мрэд.

- 9. При определении плотности полога системой лидара НАСА наиболее информативной оказалась лазерная переменная, характеризуемая отношением количества импульсов, где высота дерева не зарегистрирована по форме волны (т.е. не достигших земли), к общему количеству импульсов, отраженных от кроны. Коэффициент детерминации связи между лазерными и наземными оценками составляет 0,60.
- 10. Оценка породного состава системой лидара КЦДЗ по трем градациям (хвойные, лиственные и смешанные) дала совпадение в 46 выделах из 120, т.е. уровень вероятности правильного определения составил 38 %. Генератор случайных чисел мог дать почти такие же результаты (33 %).

3. МЕТОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ЛАЗЕРНОЙ ОЦЕНКИ ФИТОМАССЫ ДРЕВОСТОЕВ.

3.1. ВЫВОД ОЦЕНОЧНЫХ РЕГРЕССИОННЫХ МОДЕЛЕЙ.

С помощью регрессионного анализа можно определить связь с наиболее информативными лазерными переменными не только массообразующих показателей (высота, плотность полога, диаметр кроны и др.), но и самих показателей массы и объема на единице площади древостоя. В 1982 г. Г.Мак-Лин (Maclean, 1982) показал, что площадь профиля лесного полога, дешифрованная на фотоснимке, прямо связана с логарифмом ликвидного запаса стволовой древесины. Полученные регрессионные уравнения для лиственных были существенно улучшены после их разделения по породам (R^2 увеличился на 40-50 %). Для некоторых северных лиственных пород значения R^2 составляли от 0,76 до 0,87. Этого повышения точности следовало ожидать, поскольку при данной высоте древостоя запас ликвидной древесины у различных пород разный. Дальнейшее повышение точности уравнений было продолжено Г.Мак-Лином и У.Крейбилем (Maclean, Krabill, 1986). Были рассчитаны уравнения зависимости ликвидного запаса стволовой древесины, измеренного наземным способом, от пло-

щадя профиля древесного полога, рассчитанной по данным лазерного профиля. Уравнение имело вид

$$\ln M = a_0 + a_1 F, \quad (10)$$

где M - древесный запас, м³/га; F - площадь профиля древесного полога, м². И опять было показано, что при учете видового разнообразия, т.е. при разделении древостоев сосны ладанной и лиственных пород R² повысились на 15-20% (R² были около 0,90). Было показано также, что модифицированный профиль полого дает прогноз ликвидного запаса древесины более точный, чем полный профиль.

Модифицированный профиль полога включает в себя лишь ту часть полога, которая расположена выше некоторого "диапазона исключения" (установленного оператором сечения, например, 5 или 10 м над уровнем земли). Использование модифицированного профиля оправдано, когда в процессе наземной таксации введены ограничения экономической доступности, минимальной высоты или минимального диаметра дерева. Теоретически применение модифицированного профиля неприемлемо, когда рассматривается общий наземный (а не ликвидный) запас или общая надземная фитомасса. Практически, однако, небольшой диапазон исключения может служить в качестве маскировки шума, наведенного кустарниками или подростом, которые не учитывались при полевых работах.

Р.Нельсоном с соавт. (Nelson et al., 1988a) было проведено несколько уравнений (связывающих наземные показатели с лазерными переменными), а также несколько лазерных переменных высоты деревьев и лазерных переменных сомкнутости полога с целью выявить, какие из них являются лучшими для оценки фитомассы и запаса древостоя. На основе этой предварительной работы для дальнейшего исследования были отобраны шесть лазерных переменных высоты деревьев (табл. 7) и один показатель сомкнутости полога - переменная 9 в разд. 2.2.3.2.

Лазерные характеристики полога, однако, не дают информации о распределении стволов по диаметру на высоте груди D_{1,3} - наиболее важной составляющей при любом расчете запаса или фитомассы на единице площади. Этот недостаток в какой-то степени можно восполнить путем регрессионной оценки среднего диаметра D_{1,3} как функции лазерной оценки средней высоты древо-

стоя H. Из 13 различных моделей, которые отражают связь D_{1,3} и H, проверенных Р.Куртисом (Curtis, 1967), наиболее простой и эффективной оказалась логарифмическая кривая

$$H = a_0 + a_1 \ln D_{1,3}, \quad (11)$$

которая находит применение и при таксации лесов России (Анучин, 1971).

При условии постоянства полноты древостоев (видового числа) стволов запас M на гектаре определяется так называемым видовым цилиндром (Кофман, 1986), т.е. величиной D_{1,3}² H:

$$M = a(D_{1,3}^2 H), \quad (12)$$

Уравнение (12) после логарифмирования приобретает вид

$$\ln M = a_0 + a_1 \ln D_{1,3} + a_2 \ln H \quad (13)$$

и после подстановки в (13) вместо ln D_{1,3} переменной H из выражения (11) Р.Нельсон с соавт. (Nelson et al., 1988a,b) предложили уравнение

$$\ln M = a_0 + a_1 H + a_2 \ln H, \quad (14)$$

где M - запас стволовой древесины в коре плюс скелет кроны (без листвы), м³/га; H - высота полога древостоя, м.

В 1902 г. при составлении таблиц хода роста сомкнутых иноксовых древостоев немецким лесоводом Эйхгорном было установлено, что общий запас есть функция только высоты древостоя, без учета его возраста и класса бонитета, т.е. одной определенной высоте для всех классов бонитета и возраста соответствует один и тот же общий запас древостоя. Позднее, в 1904 г. Эйхгорн показал наличие этой же закономерности в древостоях бука обыкновенного, а в 1909 г. Е.Перхардт подтвердил ее для ели и сосны. С тех пор эта зависимость известна как "расширенный закон Эйхгорна" (Thoenesius, 1963). Последний закон Эйхгорна был интерпретирован как проявление закона аллометрии (Waine, 1961; Thoenesius, 1963; Кофман, 1986)

$$M = a \cdot H^b, \quad (15)$$

где a - константа начального роста, b - аллометрическая константа, и получил многократное эмпирическое подтверждение.

Уравнение (14), по существу, представляет модифицированную аллометрическую функцию (15), или закона Эйхгорна. Однако последний при низких полнотах дает существенно завышенное соотношение к эмпирическим показателям и более корректно запас рассматривается как функция высоты и полноты древостоев одной-

временно (Терсков, Терскова, 1980). Поскольку плотность полога является после высоты второй наиболее информативной массообразующей переменной, Р.Нельсон с соавт. (Nelson et al., 1986a,b) предложили продвинутую зависимость

$$\ln M = a_0 + a_1 H + a_2 C, \tag{16}$$

где C - сомкнутость (плотность) полога, которая по существу представляет собой модификацию уравнения (10). Уравнения (14) и (16) были использованы и для оценки фитомассы древостоев P (т/га), включающей общую надземную массу без листвы, в свежем состоянии.

Путем подстановки в уравнения (14) и (16) было проверено 6 различных лазерных характеристик дерева (табл. 7). Уравнением (16) была также проверена одна лазерная характеристика плотности полога, которая представлена совместным действием двух показателей - числом импульсов, отраженных прямо от земли, и вторичных импульсов из-под полога. Средняя высота полога также будет снижаться, поскольку импульсы, отраженные прямо от земли (нулевые значения высот) усредняются с замерами высот деревьев на пробе. Для оценки влияния плотности полога на эти две характеристики (переменные 7 и 8 в разд. 2.2.3.2) они были перемножены (переменная 9).

3.2. ПРОВЕРКА ПРИГОДНОСТИ РЕГРЕССИОННЫХ МОДЕЛЕЙ.

3.2.1. Оценка моделей по проверочной выборке из массива лазерных данных, по которому получена модель.

Эффективность уравнений (14) и (16) (проверено 12 моделей - 2 уравнения x 6 лазерных характеристик высоты полога) была оценена путем сравнения теоретических и фактических значений запаса и фитомассы древостоев по линейным соотношениям

$$M_T = a_0 + a_1 \cdot M_F, \tag{17}$$

$$P_T = a_0 + a_1 \cdot P_F, \tag{18}$$

где M_T и M_F - соответственно теоретические и фактические значения общего запаса, м³/га; P_T и P_F - соответственно теоретические и фактические значения надземной фитомассы древостоев в свежем состоянии без листвы, т/га. Из 113 пробных площадей сформирована случайная выборка из 75 проб (обучающая

совокупность) для расчета уравнений (14) и (16). Затем эти регрессии сопоставлены с проверочной совокупностью проб из остальных 38, т.е. использованы соотношения (17) и (18) с целью дать количественное выражение ошибок прогноза фитомассы и запаса древостоя на площадях, не включенных в регрессионный анализ. Результаты такого сопоставления приведены в табл.13, где R^2 - коэффициент детерминации уравнений (17) и (18); От - отклонение, как разность среднего теоретического значения минус среднее фактическое, деленная на среднее фактическое; См - среднеквадратическое отклонение

$$См = \sqrt{SSE/(n-2)} \tag{19}$$

где SSE - сумма квадратов отклонений. Скаттер представляет второй способ оценки отклонений теоретических значений относительно фактических. Например, для общего запаса, модель (16), СРЗМ (первая строка таблицы), 13,2 % теоретических значений находились в пределах ± 10 процентов отклонения от фактических значений.

Результаты анализа большинства из 12 моделей очень близки; ни одна модель не выделяется (см. табл.13). Такое единообразие результатов не является неожиданным, поскольку лазерные характеристики высоты полога тесно коррелируют между собой. Например, четыре переменные, характеризующие площадь профиля полога (СРН, МП12, МП15, МП10), имеют коэффициенты корреляции, превышающие 0,95. Так же коррелируют между собой две переменные, непосредственно отражающие фактические высоты деревьев - СРЗМ и СРНЕЗ.

При отборе лучшей модели принимались во внимание четыре критерия:

- 1) минимизировать расхождение между средним теоретическим и средним фактическим значениями фитомассы, т.е. минимизировать процент ошибки;
- 2) максимизировать надежность линейного соотношения между теоретическими и фактическими значениями фитомассы;
- 3) минимизировать стандартное отклонение и тем самым снизить доверительный интервал и диапазон прогноза относительно линии регрессии между фактическими и теоретическими значениями и
- 4) минимизировать скаттер, т.е. разброс теоретических значений относительно фактических наземных показателей.

Таблица 13.

Показатели, использованные для сравнения двух оценочных уравнений по проверочной совокупности 38 пробных площадей.

№ уравнения	Независимая переменная	Среднее фактическое	Среднее теоретическое	От. %	R ²	Ош	Скаттер σ	
							$\pm 10\%$ (%)	$\pm 25\%$ (%)
Общий запас древесины								
		м ³ /га	м ³ /га			м ³ /га		
(16)	СРЗМ	190,4	187,5	-1,54	0,49	71,9	13,2	55,3
	СРН		191,9	0,79	0,47	73,2	26,3	44,7
	СРНБЗ		192,1	0,89	0,49	71,9	26,3	47,4
	МПП2		192,2	0,95	0,47	73,3	26,3	44,7
	МПП5		192,7	1,29	0,47	73,6	23,7	44,7
	МПП10		192,2	0,93	0,45	74,5	21,1	42,1
(14)	СРЗМ	190,4	186,8	-1,88	0,47	73,4	13,2	39,5
	СРН		191,7	0,66	0,53	69,2	28,9	50,0
	СРНБЗ		190,9	0,25	0,43	76,0	18,4	42,1
	МПП2		191,6	0,62	0,53	69,3	23,7	44,7
	МПП5		192,3	1,00	0,53	69,5	26,3	47,4
	МПП10		193,1	1,44	0,50	71,3	23,6	39,5
Общая наземная фитомасса в снежном состоянии								
		т/га	т/га			т/га		
(16)	СРЗМ	203,3	199,1	-2,06	0,52	69,6	23,6	55,3
	СРН		203,8	0,24	0,50	71,5	31,6	50,0
	СРНБЗ		204,0	0,35	0,52	69,8	28,9	52,0
	МПП2		204,0	0,33	0,49	71,6	31,6	50,0
	МПП5		204,2	0,45	0,49	71,8	31,6	47,4
	МПП10		203,9	0,28	0,48	72,7	31,6	44,7
(14)	СРЗМ	203,3	200,0	-1,65	0,49	72,1	15,8	57,9
	СРН		204,0	0,35	0,54	68,0	23,7	50,0
	СРНБЗ		203,7	0,22	0,44	75,2	15,8	44,7
	МПП2		204,1	0,41	0,55	67,9	23,7	52,6
	МПП5		204,6	0,63	0,55	67,8	21,1	52,6
	МПП10		205,6	1,13	0,52	70,1	21,1	47,4

*) Помехения см. по тексту.

Модель, которая оказалась лучшей по большинству перечисленных критериев, была признана наиболее полезной. Ей оказалась вторая (по порядку, табл. 13) модель, включавшая в качестве независимой переменной лазерную оценку средней высоты пробы СРН. В целом, для прогноза запаса и фитомассы древостоя уравнение (14) оказалось более точным в сравнении с (16). После показателя СРН лучшими по большинству критериев были лазерные оценки МПП2 и МПП5.

Полезность названных трех переменных означает, что общая масса и запас древостоя связаны с площадью профиля полога, измеренной лазером. СРН прямо связана с немодифицированной площадью профиля полога, равной длине пробной площади (сегмента) 20 м, умноженной на СРН. Тогда три наиболее полезные лазерные переменные характеризуют площадь между верхней границей полога и поверхностью земли или некоторой воображаемой поверхностью выше нее. Хотя большая часть остальных лазерных переменных дает приемлемые результаты, она менее точна и/или дает больший разброс данных. На рис. 46 показано соотношение между теоретическими и фактическими значениями фитомассы и запаса, определенными по уравнению (14) с использованием в качестве независимой лазерной переменной высоты СРН (все 113 пробных площадей). Уравнения (14) (рис. 46) характеризовались следующими константами и коэффициентами детерминации:

$$\ln M = 3,6102 + 0,0347(CRN) + 0,4481(\ln CRN); R^2 = 0,93; \sigma \quad (20)$$

$$\ln F = 3,6383 + 0,0250(CRN) + 0,5118(\ln CRN); R^2 = 0,54. \quad (21)$$

Две из шести лазерных переменных в двух оценочных уравнениях (14) и (16) дают неприемлемо результаты: среднее значение трех наибольших с разделенных лазером высот деревьев (СРЗМ) и модифицированный профиль полога с 10-метровым порогом исключения (МПП10). Это означает, что с точки зрения оценки фитомассы лазерная оценка неприемлема, если учитываются только наибольшие деревья пробной площади, и что характеристика профиля полога с большим порогом исключения игнорирует фитомассу и объем мелких деревьев.

С целью обеспечения повторяемости полученных результатов был выполнен дополнительный анализ (Wilson et al., 1983a), в ходе которого были сформированы новые обучающая и проверочная совокупности пробных площадей (75 и 33 соответственно)

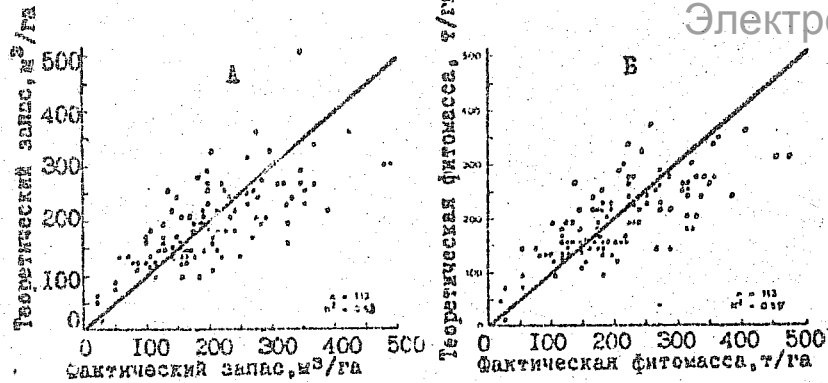


Рис. 46. Соотношение между теоретическими и фактическими значениями запаса (А) и фитомассы (В) для 113 пробных площадей. Теоретические значения рассчитаны по (20) и (21). Показаны линии равных теоретических и фактических значений Nelson et al., 1988a).

случайным отбором из 113 проб. Из 38 тестовых пробных площадей предыдущего варианта тридцать вошло в новую обучающую совокупность из 75 проб. Результаты показали, что, как и ранее, большинство результатов анализа моделей были близки между собой. С использованием четырех выше упомянутых критериев уравнения (14) с переменными СРН и МП12 опять оказались лучшими как по величине ошибки прогноза, так и по степени разброса данных. Расхождение между теоретическими и фактическими значениями возросло с 0,66 до 2,6 % и с 0,35 до 2,0 % для запаса и фитомассы соответственно (табл. 13, модель (14), СРН). Диск варьирования, объясненная теоретическими значениями запаса и фитомассы в новой проверочной совокупности возросла до $R^2 = 0,58$ и $0,54$ соответственно с полученных при первом тестировании $R^2 = 0,53$ и $0,54$ соответственно (табл. 13). Следовательно, точность прогностического уравнения изменяется в зависимости от используемых при этом обучающей и проверочной выборок.

Можно заключить, что данные лазерного профилирования на большом числе пробных площадей (например, 38) могут быть использованы для оценки средних значений запаса и фитомассы древостоя; однако локальное варьирование остается очень вы-

соким. Это происходит потому, что лазером невозможно непосредственно оценить диаметр ствола, который является ведущим фактором при любом расчете фитомассы древостоя. При данной высоте дерева небольшое изменение диаметра ствола значительно изменяет его объем и фитомассу. Например, при высоте дерева сосны ладанной 20 м и диаметре на высоте груди 24 см увеличение диаметра на 3 см (12 %) увеличит фитомассу на 27 %, что эквивалентно возрастанию высоты на 5 м (27 %). Несмотря на точность лазерных измерений, варьирование диаметра ствола при данной высоте определяет большой разброс данных теоретической фитомассы относительно фактических, рассчитанных по наземным измерениям.

3.2.2. Проверка моделей по данным, полученным при дополнительных залетах.

Для проверки уравнений (20) и (21) на других массивах экспериментальных данных по тем же маршрутам (рис. 34), но в иной последовательности были выполнены в двух повторностях дополнительные залеты: по маршруту 1 (средний), затем по маршруту 2 (северный) и, наконец, по маршруту 3 (южный). Скорость полета 100 м/сек., частота пульсаций лазера на маршруте 1 была 100 гц (отражения импульсов через каждые 0,5 м); а на маршрутах 2 и 3 - 200 гц (отражения импульсов через 1 м) (Nelson et al., 1988b).

Для каждого из 6 залетов (3 маршрута, по два залета в каждом) вдоль линии полета определяли запас и фитомассу древостоев. Регистрировались не все импульсы, а только отдельные, приходящиеся на каждый одиннадцатый метр линии полета. Они давали лазерные оценки высоты полога СРН (табл. 7), подставляемые в (20) и (21), так что оценки запаса М и фитомассы Р приходились на каждый 11-й метр. Полученные значения М и Р суммировались и рассчитывались средние величины и их отклонения по каждому залету.

11-метровый шаг был установлен по результатам двух специальных исследований. В первом из них изучали влияние размера лазерной пробы на точность оценок фитомассы, или, иными словами, устанавливали, сколько последовательных импуль-

сов необходимо для расчета средней величины СРН? Результаты показали, что по мере снижения числа лазерных импульсов, учтенных при расчете величины СРН, снижаются стандартные ошибки определения фитомассы древостоев. Поэтому, чтобы минимизировать изменчивость оценок запаса и фитомассы, для расчета СРН в уравнениях (20) и (21) был использован только один лазерный импульс.

Во втором исследовании рассматривалось влияние автокорреляции на изменчивость оценок фитомассы. Предполагалось, что измерения высот по двум соседним отражениям импульсов коррелированы, поскольку, скорее всего, относятся к одной и той же высоте. Поэтому фактическая изменчивость фитомассы и полученные стандартные ошибки ее расчета будут занижены. Тогда возникает вопрос, насколько нужно увеличить расстояние между импульсами, чтобы устранить это смещение?

Ответ на этот вопрос можно получить с помощью метода полувариограммы (Traugott et al., 1985; Warrick et al., 1986), которая представляет диаграмму зависимости видимой дисперсии от расстояния между замерами (лага наблюдений) (рис. 47). Если имеется эффект автокорреляции, то дисперсия будет увеличиваться по мере нарастания лага наблюдений. Точка, где график выходит на асимптоту, соответствует исчезновению автокорреляции. По данным шести залетов выявлены две асимптоты: обычно дисперсия быстро нарастает до лага 5-25 м, а затем медленно, но неуклонно увеличивается до лага примерно 300 м, оставаясь далее в состоянии неустойчивого равновесия (рис. 47). Таким образом, имеются две различные структурные единицы, обуславливающие исчезновение автокорреляции - крона дерева и полог древостоя выдела. Поскольку первоочередной интерес представляет автокорреляция на уровне отдельной кроны, для каждого из шести залетов был установлен размер лага, соответствующего началу первой асимптоты, а затем выведено его среднее значение - 11 м (с колебаниями от 6 до 21 м).

3.2.3. Оценка расхождений между повторностями (основными и дублирующими залетами).

После разработки стратегии выборочного учета при лазерной съемке были сопоставлены две повторности лазерной оценки

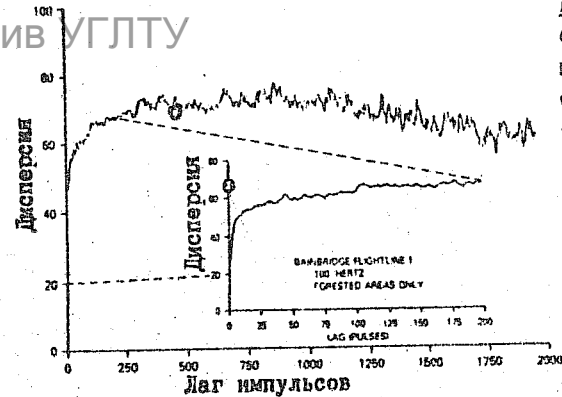


Рис. 47. Полувариограмма, показывающая изменение дисперсии лазерной оценки высоты дерева с увеличением расстояния (лага) между регистрационными импульсами (Nelson et al., 1988b).

фитомассы древостоев по каждому маршруту, чтобы установить степень воспроизводимости лазерных наблюдений. При повторном залете самолет не может в точности повторить линию полета, которой он придерживался накануне по наземным маркерам. Расстояния между трансектами повторностей на маршрутах 1, 2 и 3 колебались соответственно в пределах (0-30), (0-70) и (0-120) м, при средних значениях соответственно 15, 30 и 60 м. При этом повторные залеты по маршруту приходились на те же категории земель и во многих случаях - на тот же таксационный выдел. Результаты приведены в табл. 14а.

Данные табл. 14а дают представление о некотором критерии воспроизводимости (т.е. точности) лазерной оценки запаса, фитомассы и высоты древостоя. Большие отклонения при дистанционном зондировании наземных объектов означают отсутствие воспроизводимости, а невозможность схем выборочного учета хуже, чем бесполезные, поскольку они создают ауру ложной точности, которая может ввести в большое заблуждение (Cottam et al., 1953). Как видно из табл. 14а, расхождения между двумя повторностями одного маршрута находятся в пределах 3-6 %.

Оценки запаса и фитомассы древостоев, полученные по лазерным данным, Р.Нельсон с соавт. (Nelson et al., 1988b) сопоставляли далее с наземными. Для расчета последних была использована случайная подвыборка пробных площадей наземной таксации, первоначально примененных для вывода уравнений (20) и (21). Все таксационные пробные площади приведены к условиям

Таблица 14.

Расхождения в оценках запаса древесины, фитомассы и средней высоты древостоя: а) между двумя повторностями залетов по 3 маршрутам и б) между объединенными повторностями и наземными данными

Маршрут	Число вы- борочных импульсов	Запас, м ³ /га			Фитомасса, т/га			Высота, м		
		\bar{X}	σ	От, %	\bar{X}	σ	От, %	\bar{X}	σ	От, %
а) Между повторностями каждого маршрута										
1А	676	154,5	4,4	3,7	165,1	4,5	3,8	10,6	0,30	4,3
1Б	675	149,1	4,5		159,3	4,7		10,2	0,33	
2А	955	140,9	4,0	6,1	149,9	4,0	5,9	9,6	0,27	5,3
2Б	922	132,8	4,0		141,6	4,3		9,1	0,27	
3А	621	159,1	4,7	3,6	169,3	4,9	3,2	10,8	0,33	3,7
3Б	587	153,6	4,5		164,2	4,7		10,4	0,33	
б) Между объединенными повторностями и наземными данными										
Лазер, по А	2454	154,0	4,1	8,0	164,0	4,3	7,9	10,5	0,30	28,5
Лазер, по В	2531	155,8	4,1	7,0	165,5	4,3	7,1	10,6	0,30	27,7
Земля	72	167,5	12,1	-	178,1	12,1	-	14,7	0,55	-

Примечания: \bar{X} - среднее значение; σ - стандартное отклонение.

трансект 1А, 2А и 3А, но ни одна из них - к трансектам 1Б, 2Б и 3Б. Эти наземные оценки фитомассы и запаса являются смещенными (табл. 14б) вследствие лишь приблизительного соответствия наземных пробных площадей условиям шести лазерных трансект. Сопоставление лазерных и наземных измерений выполнено с единственной целью показать, что лазерные оценки того же порядка, что и наземные.

Расхождения между лазерными и наземными оценками фитомассы и запаса составляют 7-8 %, а между наборами двух повторностей маршрутов (один набор - 1А, 2А и 3А, второй - 1Б, 2Б и 3Б) - лишь 0,9 и 1,2 % для фитомассы и запаса соответственно. Стандартные отклонения между лазерными оценками составляет примерно 1/3 от отклонений между наземными оценками вследствие высокой интенсивности выборочного учета вдоль лазерных трансект. Лазерные оценки в табл. 14б основаны на выборке, размер которой более чем в 30 раз превышает размер наземной выборки, даже если учесть, что в лазерную выборку включен лишь один импульс из каждых 11 (100 гц) или 23 (200 гц).

Таблица 14б подтверждает также обсуждаемый выше факт, что лазерные измерения высоты древостоев существенно занижают соответствующие наземные оценки, в среднем на 4 м (27-29 %). Однако это занижение высоты при лазерной ее оценке не является деструктивным с точки зрения оценки фитомассы и запаса, поскольку этот эффект легко устраняется путем моделирования.

3.2.4. Влияние стратификации древостоя по породам на лазерную оценку фитомассы.

Выше упоминалось, что при разделении древостоев по породному составу точность определения запаса древесины на единице площади существенно повышается. Однако вероятность точного определения состава даже в самом грубом приближении (хвойные, лиственные и смешанные) с помощью лазерного дальномера системы KID3 близка к вероятности случайного совпадения.

С В экспериментах с лидаром НАСА задача лазерной оценки состава не ставилась, а основное внимание было уделено влиянию разделения выделов по породам на точность лазерной оценки фитомассы. Модель (14), хорошо подобранная с точки зрения точности и остаточного разброса данных, была протестирована с целью определить, повышает ли стратификация данных по породам точность оценки запаса и фитомассы и снижает ли остаточный разброс теоретических значений. Результаты такого анализа даны в табл. 15.

Таблица 15.

Значения средних запаса и фитомассы и оценки остаточного разброса данных для стратифицированных по породам и нестратифицированных показателей с использованием уравнения (14) и СРН в качестве независимой лазерной переменной (75 проб).

Зависимая переменная	Фактическое значение \bar{X}	Теоретические значения							
		без стратификации			с стратификацией				
		\bar{X}	От, %	скаттер	\bar{X}	От, %	скаттер		
Запас, м ³ /га	201,2	190,8	5,14	20,0	52,0	192,8	4,15	19,2	56,0
Фитомасса, т/га	214,7	205,4	4,42	20,0	57,3	205,1	3,88	22,6	58,6

ж) Взвешенное по числу наблюдений в каждой породе: $192,9 = [(172,7)(11) + (268,6)(16) + (174,9)(26) + (194,8)(17)] : 78$

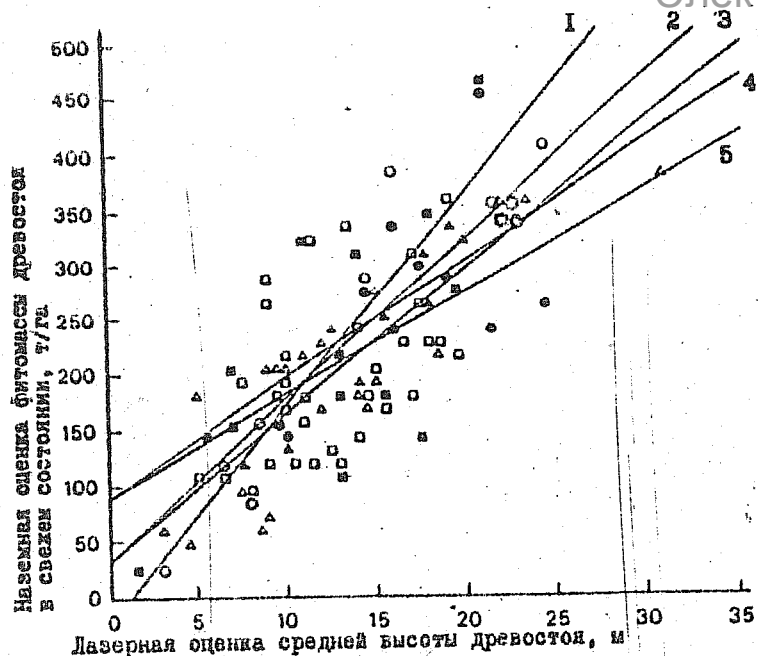


Рис. 48. Зависимость наземной оценки фитомассы древостоя от лазерной оценки средней высоты полога СРН. 1 - о - сосна ладанная, 2 - ■ - с.боякотная, 3 - △ - смешанные лиственные, 4 - ◆ - с.ежовая, 5 - □ - с.Эллиота (Nelson et al., 1988a).

Стратификация по породам лишь незначительно повышает точность (на 1,0-0,4 %) оценки и снижает разброс прогнозируемых значений (табл. 15). Графики зависимости высота-диаметр по наземным измерениям каждой породы показывают значительный разброс данных в пределах одной породы и наличие обобщающего соотношения для всех пород. Высокая внутривидовая изменчивость зависимости фитомасса-высота по отношению к межвидовой (рис. 48) свидетельствует о бесполезности стратификации хвойных пород юга США с целью улучшения оценок фитомассы. Предыдущая работа Р.Мак-Лина и У.Крейбила (Maclean, Kravill, 1986) предполагает, что стратификация имеет смысл на площадях с большим участием лиственных пород.

3.3. РЕГРЕССИОННЫЕ МОДЕЛИ ДЛЯ ОЦЕНКИ НАДЗЕМНОЙ ФИТОМАССЫ ПРИ ЛАЗЕРНОМ ЗОНДИРОВАНИИ ЛЕСОВ УРАЛО-КАЗАХСТАНСКОГО РЕГИОНА.

Теперь, когда выявлены основные массообразующие показатели древостоев, идентифицируемые при лазерной съемке, можно для основных регионов страны по имеющимся экспериментальным данным подготовить регрессионные модели и таблицы для лазерной оценки фитомассы древостоев различных пород по фракциям (ствол, скелет кроны, хвоя). В разделе приводятся результаты таких исследований, выполненных в древостоях саксаула белого и черного, сосны, ели, березы и осины Урало-Казахстанского региона, где были заложены соответственно 75, 75, 93, 27, 50 и 30 (всего 350 шт) пробных площадей в широких возрастных и эколого-ценотических диапазонах со взятые модельных деревьев по ступеням толщины (всего около 5000). Характеристика объектов исследований опубликована (Усольцев, 1988; Усольцев и др., 1993, 1994).

Для саксаульников пустынной зоны Казахстана, произрастающих в форме редколесий (Кзылординская и Джамбулская обл.), получены регрессионные модели для оценки наземной фитомассы в свежем состоянии саксаула белого

$$\ln(P_0/G_{кр}) = 0,4260 + 0,8750 \ln H; R^2 = 0,640; \quad (22)$$

$$\ln(P_T/G_{кр}) = -0,8648 + 1,5258 \ln H; R^2 = 0,635; \quad (23)$$

и черного $\ln(P_0/G_{кр}) = 0,4348 + 1,2483 \ln H; R^2 = 0,709; \quad (24)$

$$\ln(P_T/G_{кр}) = -1,1318 + 2,5373 \ln H; R^2 = 0,627. \quad (25)$$

где P_0 и P_T - соответственно общая и товарная масса (с диаметром среза более 2 см), т/га; $G_{кр}$ - сумма площадей проекций кроны, тыс.м²/га; H - средняя высота древостоев, м. Для черносаксаульников получена также модель для оценки общей зеленой массы (побеги последних 1-2 лет с диаметром 2-3 мм) P_{03} , т/га:

$$\ln(P_{03}/G_{кр}) = -0,4159 - 0,8843 \ln H - 2,4885(\ln H)^2; R^2 = 0,598. \quad (26)$$

Частично использованы экспериментальные данные Э.И.Нагинова, И.В.Мельниковой, В.В.Деженева, С.В.Теникина, А.А.Сальникова и В.В.Кирилловой, а также материалы Казахского лесохозяйственного предприятия по фитомассе саксаульников.

Уравнения (22)-(26) объясняют от 60 до 71 % общей изменчивости фитомассы саксаула, приходящейся на единицу площади проекции кроны. Они были проверены Казахским лесоустойчивым предприятием при устройстве саксаульников в 1984 г. по ОБГ-методу и по обычной наземной технологии на площади 100 тыс. га. Отклонения при оценке запасов не превышали 5% (Усольцев, 1988).

Насаждения лесобразующих пород лесной зоны (Урал и Северный Казахстан) образуют сомкнутые древостой, и возникает проблема оценки части полога, не видимой на аэрофотоснимках и не регистрируемой лазерным лучом. Поэтому на первом уровне приближения рассчитаны регрессионные модели оценки надземной фитомассы древостоев только по их средней высоте. Для массы стволов за основу взята структура модели (14) (Nelson et al., 1988a, b), а также аллометрическая функция (15). Результаты их расчета в сравнении с экспериментальными данными приведены на рис. 49. Расчет уравнений, аналогичных (14) и (15), для остальных фракций фитомассы дал существенно более низкие значения R^2 для массы скелета кроны (68-78 %) и неприменно низкие - для массы листвы (хвой) (0,4-1,2 %). Поэтому при их последующем расчете были введены три модификации: во-первых, для "гармонизации", т.е. согласования между собой различных фракций фитомассы применен рекурсивный принцип, т.е. использована система (цепочка) уравнений, где зависимая переменная каждого предыдущего уравнения входит в каждое последующее в качестве независимой переменной (Усольцев, 1988; Vorders, 1989); во-вторых, массу хвой стали вводить в уравнение не в абсолютном, а в относительном выражении, в процентах к массе стволовой древесины; и в-третьих, в уравнения были включены блок-переменные "фиктивные" переменные (Дрейпер, Смит, 1973), характеризующие видовую принадлежность древостоев:

$X_1=0, X_2=0, X_3=0$ - для сосны; $X_1=1, X_2=0, X_3=0$ - для ели;
 $X_1=0, X_2=1, X_3=0$ - для осины; $X_1=0, X_2=0, X_3=1$ - для березы.
 Тогда система уравнений имеет общий вид:

$$\left. \begin{aligned} \text{I. } \ln P_{st} &= f(X_1, X_2, X_3, H, \ln H) \\ \text{II. } \ln P_{sk} &= f(X_1, X_2, X_3, \ln H, \ln P_{st}) \\ \text{III. } \ln(P_f/P_{st}) &= f(X_1, X_2, X_3, \ln H, \ln H, \ln P_{sk}) \end{aligned} \right\} (27)$$

где P_{st} ; P_{sk} и P_f - соответственно фитомасса стволов, скелета кроны и хвой в абсолютно сухом состоянии, т/га.

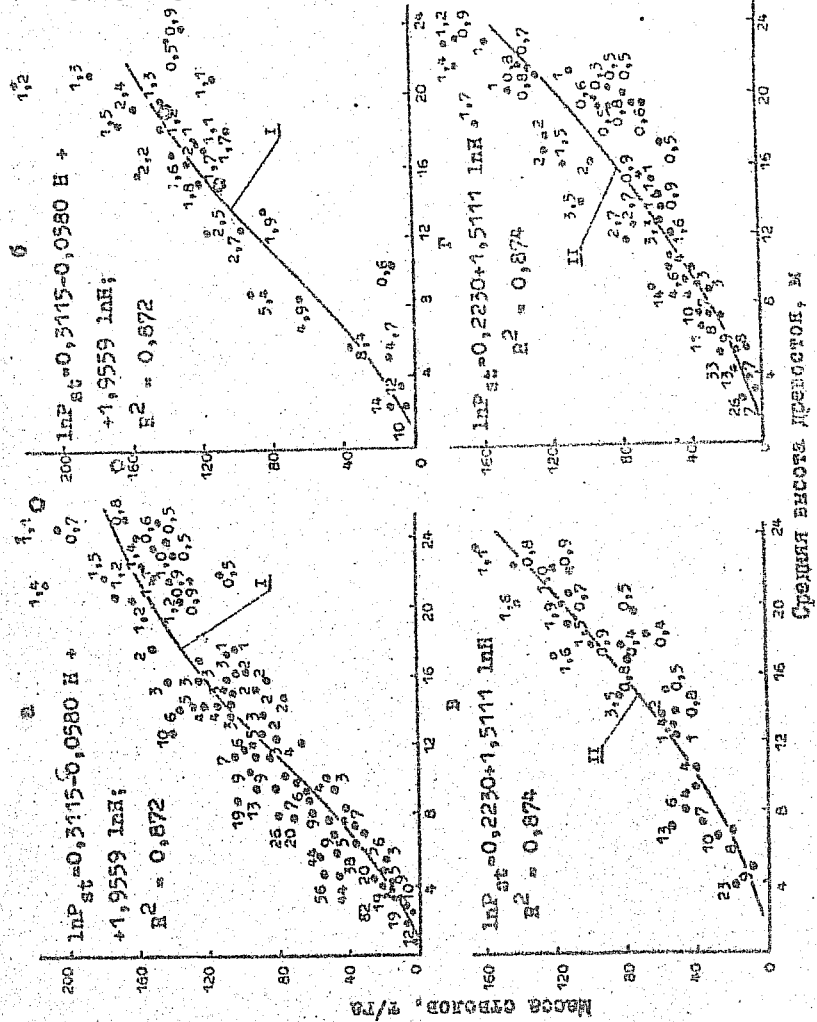


Рис. 49. Зависимость массы стволов сосны (а), ели (б), осины (в) и березы (г) в абсолютно сухом состоянии от средней высоты древостоев. Цифрами обозначены участки древостоев, тыс. деревьев на I га. I - линия регрессии вида (14), II - то же, (15). С

Таблица 16

Характеристика уравнений, выражающих зависимость надземной фитомассы древостоев (P_1) от определяющих факторов:

Константы независимых переменных a_0 и a_1	Первое приближение $P_1=f(N)$ для зависимых переменных:				Второе приближение $P_1=f(N, N)$ для зависимых переменных:			
	$\ln P_{st}$		$\ln \frac{P_1}{P_{st}}$		$\ln P_{st}$		$\ln \frac{P_1}{P_{st}}$	
	хвойные листья		хвойн. листья		хвойн. листья		хвойн. листья	
a_0	0,3115	0,2230	-0,3622	5,5318	-2,0713	-2,3375	1,8544	7,1990
$a_1(X_1)$	0	0	0,2228	0,7150	0	0	0,0893	0,6233
$a_2(X_2)$	0	0	0,3770	-0,6094	0	0	0,3720	-0,6974
$a_3(X_3)$	0	0	0,2038	-0,3650	0	0	0,2559	-0,4723
$a_4(N)$	-0,05805	0	0	0	-0,0417	-0,0417	0	0
$a_5(\ln N)$	1,9552	1,5111	0,5590	-1,7611	2,5177	2,6172	-1,1048	-2,2165
$a_6(\ln N)$	0	0	0	0	0,2544	0,2544	-0,6871	-0,5442
$a_7(\ln N \ln N)$	0	0	0	0	-0,1582	-0,1582	0,0877	0,1248
$a_8(\ln P_{st})$	0	0	0,2660	0	0	0	0,8493	0
$a_9(\ln P_{st} \ln N)$	0	0	0	0,1453	0	0	0	0,1181
B^2	0,872	0,874	0,724	0,821	0,933	0,933	0,800	0,844

н) Константа значима на уровне $t_{0.1}$
 и) В числителе - значения констант, в знаменателе - их значимость по Стьюденту.
 ж) P_1/P_{st} - масса листьев, отнесенная к массе стволов, %.

При расчете уравнений (27) оказалось, что по массе стволов нет различий между сосной и елью ($t = 1,5 < t_{0.5} = 2$), а также между березой и осинной ($t = 0,7 < t_{0.5} = 2,0$). Поэтому из четырех выборок было скомплексовано два (хвойные и лиственные); в этом случае различие между двумя группами пород было достоверное ($t = 3,0 > t_{0.5} = 2,0$). Для хвойных лучший результат показало уравнение вида (14), а для лиственных - (15), приведенные в табл. 16 раздельно. При расчете уравнений для массы скелета кроны и массы листьев (хвойн) видовая принадлежность древостоев оказалась значимой для всех пород; значимость констант a_1, a_2 и a_3 составила от 2,7 до 7,9 $> t_{0.5} = 2,0$.

После обозначения экспериментальных точек на рис. 49 показателями густоты древостоев становится очевидным, что при

одной и той же высоте фитомасса стволов прямо пропорциональна густоте древостоев. Поэтому в качестве второго приближения рассчитаны регрессионные модели общего вида

$$\ln P_1 = f(X_1, X_2, X_3, N, \ln N, \ln N, \ln N \cdot \ln N). \quad (28)$$

Результаты расчета моделей (28) показали (табл. 16), что и в этом случае нет достоверного различия по массе стволов между сосной и елью ($t_0 = 1,0 < t_{0.5} = 2$), а также между березой и осинной ($t = 1,3 < t_{0.5} = 2$). Различия же между объединенными выборками, т.е. между хвойными и лиственными, оказалось существенным ($t = 7,0 > t_{0.5} = 2$). Результаты их попарного расчета приведены в табл. 16. При расчете продвинутых (включающих не только N , но и N) уравнений для остальных фракций фитомассы видовая принадлежность древостоев также оказалась значимой для всех пород. Исключение составила константа a_1 (сопоставляющая сосну и ель по массе скелета кроны), значимость которой оказалась равной 1,2 (уровень $t_{0.1}$) (табл. 16).

Как было показано выше, легко идентифицируемым массообразующим показателем древостоев является также средний диаметр кроны, величина которого, в отличие от густоты, практически не зависит от количества невидимых сверху деревьев. Поэтому в качестве третьего уровня приближения регрессионная модель (28) дополняется третьим массообразующим показателем - диаметром кроны D_k (м). При ее расчете, кроме экспериментальных данных N и N , получаемых при стандартной процедуре таксации, необходимы данные диаметра кроны, для получения которых требуется проведение значительных наземных работ, связанных с картированием пробных площадей. Последнее было выполнено в 35 чистых сосновых древостоях Аман-Карагайского бора естественного и искусственного происхождения в возрасте от 9 до 105 лет, I-Va классов бонитета.

Полученное уравнение

$$\ln P_{st} = -2,0365 + \frac{1,5988}{13,4} \ln N + \frac{0,6288}{11,0} \ln N + \frac{0,7189}{4,0} \ln D_k; R^2 = 0,981 \quad (29)$$

объясняет 98 % общей изменчивости массы стволовой древесины, тогда как двухфакторное уравнение (28) - 93 %, а однофакторное (14) - 87 % (табл. 16). Судя по величине критерия Стьюдента в уравнении (29), вклад диаметра кроны в объяснение общей изменчивости фитомассы стволов наименьший в сравнении

и H или ρ , а при расчете соответствующего уравнения для остальных фракций - практически нулевой ($t = 0,58-0,76 < t_{0,05} = 2$). Но поскольку при расчете последних учитывается P_{st} , то диаметр кроны прямо или косвенно вносит существенный вклад в объяснение изменчивости всех фракций фитомассы.

Для случая, когда нет возможности провести в сосняках достаточный объем наземных работ по коррекции густоты, т.е. по выявлению соотношения между количествами видимых и невидимых сверху деревьев полого, предлагаются двухфакторные уравнения

$$\ln P_{st} = -0,8300 + \frac{2,4680}{12,6} \ln H - \frac{1,0503}{3,7} \ln D_k; R^2 = 0,911; \quad (30)$$

$$\ln P_{ak} = -0,8953 - \frac{0,1752}{2,3} \ln H \ln P_{st} + \frac{0,5267}{2,2} \ln P_{st} + \frac{1,2120}{5,8} \ln D_k; \quad (31)$$

$$\ln(P_{st}/P_{ak}) = 6,4219 - \frac{3,2911}{11,8} \ln H + \frac{0,9441}{3,3} \ln D_k + \frac{0,2848}{3,5} \ln H \ln P_{ak}; \quad (32)$$

ВЫВОДЫ.

1. Поскольку из всех массообразующих показателей древостоя лучше всего лазерным дальномером определяется его высота, то проблема лазерной оценки фитомассы сводится, по существу, к нахождению оптимальных соотношений между фитомассой и высотой древостоя. Еще в 1902 г. было установлено, что данной высоте древостоя для всех значений классов бонитета и возраста соответствует один и тот же общий запас древостоя. Это положение, известное как закон Эдгорта, позднее было интерпретировано с теоретических позиций как проявление закона аллометрии и получило многократное эмпирическое подтверждение.

2. Однако это положение действительно лишь для сомкнутых древостоев, и по мере снижения их плотности соотношение фитомасса-высота дает все большее завышение. Поэтому в регрессионную модель необходимо включать характеристику плотности полого, которая после высоты является второй наиболее информативной массообразующей переменной, определяемой лазерным дальномером достаточно точно.

3. Тем не менее, при включении в регрессионную модель высоты и плотности полого остается еще некоторая доля не учтен-

ного варьирования, поскольку дистанционные методы не дают информации об одной из наиболее существенных характеристик запаса - распределении стволов по толщине.

4. Сравнительная проверка одно- и двухфакторных моделей фитомассы по данным, полученным системой лидара НАСА по проверочной совокупности 38 выделов, показала, что включение показателя плотности в модель фактически не повлияло ее точности.

5. Локальное варьирование остается довольно высоким. При сравнении теоретических (лазерных) значений фитомассы с соответствующими фактическими (наземными) около половины оценок различаются более чем на 25 %. Лишь 20-30 % лазерных оценок находится в пределах ± 10 % от фактических наземных оценок. Большая часть этого разброса объясняется варьированием диаметра ствола. Поскольку последние не могут быть непосредственно измерены с помощью бортового вертикально ориентированного лазера, можно ожидать, что проблемы устранения этого локального варьирования сохранятся и в будущем.

6. Однако при расчете фитомассы не отдельного выдела, а всей снимаемой площади, расхождение между фактическим и расчетным показателями не выходило за пределы 0,3-0,7 % - при проверке по той же совокупности лазерных данных, по которой рассчитана модель, за пределы 2,0-2,6 % - при оценке по проверочной совокупности 38 выделов, и за пределы 7-8% при проверке по данным дополнительных залетов.

7. О влиянии разделения выделов по породам на точность оценки фитомассы на больших площадях (совокупностях выделов) окончательного вывода не получено. Этот вопрос требует дополнительных исследований.

8. Не выявлено различий в массе стволов между сосной и елью, а также между березой и осинкой при равных высотах и густотах древостоев Урало-Казахстанского региона. Однако по массе остальных фракций все четыре породы при прочих равных условиях достоверно различаются. Уровень объясненной изменчивости различных фракций наземной фитомассы (ствол, скелет кроны, хвоя) при ее оценке по высоте древостоя составляет 72-87 %, по высоте и густоте - 80-93 % и по высоте, густоте и диаметру кроны (для массы стволов сосны) - 96%.

4. ЛАЗЕРНАЯ ОЦЕНКА КАЧЕСТВЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛЕСНОГО ПОКОГА.

4.1. ИССЛЕДОВАНИЕ НАВЕДЕННОЙ ЛАЗЕРОМ ФЛУОРЕСЦЕНЦИИ ХЛОРОФИЛЛА.

Количественный анализ пигментов, связанных с процессом фотосинтеза и многоспектральное разрежение наведенной лазером флуоресценции (НЛФ) обеспечивают возможность идентификации растений, оценки степени поспевания культур, а также раннего предупреждения стрессов. Превентивное распознавание стресса у растений способствует повышению их продуктивности путем своевременных корректирующих мероприятий - орошения, применения удобрений и гербицидов. Канадскими исследователями установлено, что количество флуоресцентных частиц и структура флуоресцентных спектров могут быть использованы для распознавания вида и клонов вида. Возможность различать сорта одного вида позволяет регионально идентифицировать наследуемые признаки устойчивости у различных культур. Большинство исследований в этой области ограничены либо стенами лабораторий, либо полевыми наземными экспериментами. Методы экспериментов и их инструментарий можно в принципе подразделить следующим образом: а) измерение отрицательной способности, б) различение линий Фраунгофера, в) стандартная, т.е. нелазерная спектрофлуориметрия и г) спектрометрия наведенной лазером флуоресценции. В последние годы получила развитие спектрометрия НЛФ, адаптированная к борту авианосителя.

Исследования НЛФ лесного покрова на базе океанографического лидера НАСА были проведены на о. Уэллс, шт. Виргиния, входящем в систему обеспечения полетов в Годдардском центре космических полетов НАСА. До этого лидер НАСА применялся для распознавания и картирования нефтяных разливов в океане, измерения кнд спектральной конверсии флуоресценции нефти и картирования фотопигментов в морском фитопланктоне (Noge et al., 1983). По маршруту полетов с лидаром собирали образцы листьев некоторых преобладающих видов и исследовали их на лабораторном лазерном спектрофлуориметре (Noge et al., 1983). На рис. 50 показаны спектры четырех видов растительности: верхний спектр получен на базе лазера 422 нм, а нижний - на базе лазера 532 нм.

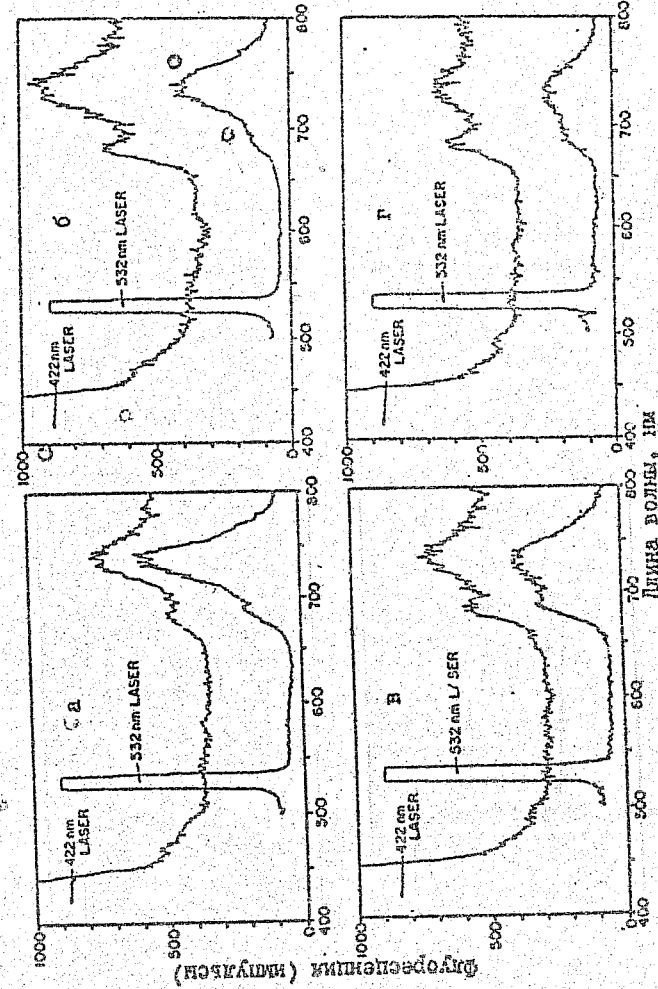


Рис. 50. Спектры НЛФ на длинах волн 532 и 422 нм: а) амаранта, б) соя, в) клевер, г) клевер. (Noge et al., 1983).

На рис. 51 и 52 представлены профили земной поверхности, полученные лазером одинарного действия путем регистрации только первичных отражений сигнала лазерного дальномера. Применение лазера двойного действия вкупе с регистрацией ИЛФ существенно повышает информативность съемки, поскольку детальная количественная информация о лесном пологом (высота древостоя, плотность полога) совмещается с качественной характеристикой (активность хлорофилла).

Известно, что у хвои ели, находящейся под воздействием кислотных дождей и вследствие ухудшения процесса фотосинтеза, период флуоресценции короче, чем у хвои здоровых деревьев (Chappelle, Williams, 1987). При самолетных экспериментах обнаружена связь между состоянием растительности и соотношением интенсивности флуоресценции в зонах спектра 685 и 740 нм. Лабораторные исследования с импульсно-периодическим лазером выявили особенности флуоресценции в диапазоне волн от 337 до 710 нм у можжевельника виргинского, сосны Веймутова, сосны ладакской, ели белой, дуба красного, клена красного, карики бахромчатой. В отличие от сельскохозяйственных культур древесные породы имеют дополнительный максимум флуоресценции в зоне 525 нм. Отмечено отсутствие одного из максимумов ее интенсивности в зоне 685 нм у хвои здоровых деревьев по сравнению с листовыми породами. У последних максимумы наблюдаются в зонах 440, 525, 685 и 740 нм. При повреждении хвойных пород, например, кислотными дождями, появляется дополнительный максимум интенсивности флуоресценции в зоне 685 нм, что означает негативную аномалию в процессе фотосинтеза хвои (Жирин, 1993).

4.2. ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ КРОН ПО СТЕПЕНИ ДЕПОЛЯРИЗАЦИИ ЛАЗЕРНОГО СИГНАЛА.

При исследовании структуры лесного полога используется бортовой лидар НАСА, работающий в двух диапазонах волнового спектра - 532 и 1064 нм, снабженный для регистрации отраженных сигналов с учетом свойств деполяризации сенсором ALPS (Airborne Laser Polarization Sensor). Сенсор состоит из 12 трубок и устанавливается на внешней подвеске вертолета. При высоте съемки 250 м размер лазерного пятна на поверхности земли 20 см (Kalshoven, Dabney, 1988, 1990; Жирин, 1993).

В зеленой зоне спектра (532 нм) отраженный сигнал в большей степени характеризует особенности текстуры кроны деревьев, а проявление свойств деполяризации при этом слабое. Напротив, в инфракрасной зоне (1064 нм) эффект деполяризации отраженного сигнала проявляется в максимальной степени и зависит от свойств отражающей поверхности. Среди исследованных объектов (крупнотравье, кроны клена, ели и лиственницы) наиболее отчетливый эффект деполяризации наблюдается у кроны лиственницы за счет большей длины и более хаотического расположения хвои (Kalshoven, Dabney, 1988, 1990; Жирин, 1993).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ.

Исследования пригодности данных бортового лазера для таксации лесов показывают, что оценки фитомассы древостоев на площадях, измеряемых тысячами гектаров, являются воспроизводимыми, с расхождениями между отдельными повторностями одного и того же маршрута от 3 до 6 %, а при объединении повторностей всех маршрутов - в пределах 1,5 %. Предварительное сопоставление лазерных и наземных оценок фитомассы показало наличие расхождений на уровне 7-8 %. Необходимы специальные исследования по уточнению этой ошибки, в которых будут также учтены варианты разной интенсивности выборочного учета и разных способов прокладки трансект.

Преимущества использования данных бортового лазера при таксации лесов - двойного рода. Во-первых, данные о высоте древостоев с привязкой к рельефу могут быть получены вдоль трансект длиной в десятки и сотни километров в течение небольшого времени. Например, лазерные данные по шести залетам общей протяженностью 70 км были получены в течение одного часа. Во-вторых, лазерная съемка может быть выполнена в любое время суток, при любой погоде и на недоступных обширных территориях, где наземные работы сопряжены с большими трудностями.

Необходимо отметить и некоторые ограничения лазерного зондирования лесов. Во-первых, велики расхождения лазерных и наземных оценок фитомассы, обусловленные породным разнообразием лесов. Лазер измеряет только высоту и плотность древостоя, а о распределении стволов по диаметру можно судить лишь предположительно, например, с помощью моделей высота-диаметр. Поэтому

му лазерные данные эффективны скорее при усредненных оценках большой территории, чем при характеристике небольших выделов. Если учесть, что, с одной стороны, в наземных имитациях лазер обеспечивает очень высокую точность оценок структуры крон и полога в целом, а с другой - оценочные многофакторные модели могут объяснить до 98 % общего варьирования фитомассы, то низкая точность оценок на уровне выдела обуславливается лишь фактом биогеографии исследователей и связана с пока еще низким уровнем технологии съемки.

Во-вторых, при лазерном зондировании лесов в других регионах коэффициенты регрессионных моделей, например, уравнений (20-21) и (29-32), видимо, необходимо рассчитывать вновь. Возможности переноса таких уравнений на другие регионы, как и географические закономерности распределения фитомассы лесов в целом, не изучены. При экстраполяции моделей, связывающих лазерные и наземные данные, очевидно, сказываются те же факторы, что проявляются в снижении точности объемных таблиц при изменении лесорастительных условий.

Совмещение на одном авианосителе нескольких сенсоров (дальномера двойного действия, а также сенсоров флуоресценции пигментов и деполаризации волны) позволит существенно повысить информативность лазерной съемки. Тогда в оценочные регрессионные модели войдут дополнительные лазерные переменные, которые обеспечат выход на безошибочную идентификацию породного состава, а также на прямую оценку фотосинтезирующей биомассы лесного полога.

Возможность регрессионной оценки фитомассы древостоев по данным бортового лазера зависит от точности привязки лазерного следа на местности. Это всегда представляет проблему, связанную с возможностью распознавания контрольных точек на аэрофотоснимках, получаемых вместе с лазерными данными. Для привязки трансект к наземным контрольным точкам используются данные инерционной навигационной системы самолета. Такая привязка дает ошибку 1-17 м, т.е. таксационные сегменты профиля оказываются смещенными на расстояние до 17 м от фактического лазерного следа (Nelson et al., 1988a). Ведется работа по интеграции данных глобальной позиционной системы (ГПС) в поток лазерной информации. Эти данные, поступающие в виде сигналов

от навигационных спутников Министерства обороны США, будут использоваться для прокладки лазерных трансект в пределах гораздо менее широкой полосы: точность вертикальной и горизонтальной привязки данных ГПС относительно измерений лазерного высотомера составит порядка 12 см (Krabill, Martin, 1987). Интеграция данных ГПС с лазерными автоматизирует процедуру наземной привязки линии полета и избавит от необходимости совмещенного получения фотоснимков.

Систему получения данных о форме отраженного импульса, состоящую из пропускающего дигитайзера и высокопроизводительного ленточного самописца, которая кодирует импульсы, нельзя считать перспективной для получения данных. Такое оборудование крайне специфичное, сложное и дорогое. Большие возможности лазерного зондирования связываются с заменой системы получения данных и компонентов анализа формы сигнала "черным ящиком" на базе микропроцессора, предназначенным непосредственно выдавать расстояние, высоту древостоев и плотность полога.

Поскольку при съемке импульсно-периодическим лазером обеспечивается фактически такая же точность, как и при аэрофотосъемке, сравнение этих двух способов должно проводиться на уровне затрат. На практике это сложно, поскольку фотодешифрирование предполагает распознавание и идентификацию однородных площадей (выделов), тогда как лазер производит съемку лишь вдоль маршрута полета. Поэтому при идентификации древостоев роль лазера пока будет более эффективной в сочетании с СФГ-методом.

Экономическая эффективность новой технологии будет обеспечиваться в результате повышения точности результатов и снижения трудоемкости в сравнении с затратами на дешифрирование. Объем полевых работ, необходимых для поддержки дешифрирования, может быть существенно сокращен, а также улучшено качество работы, если вместо полевой проверки проводить более экстенсивную лазерную съемку. Получение лазерной информации не должно быть чрезмерно дорогим. Самолет, использованный для сбора данных системой лидара НАСА, представлял собой специальный авианоситель, приспособленный к размещению оборудования широкой конфигурации. Должны быть созданы менее сложные, более легкие и компактные лазерные системы, размещенные на борту вертолета или небольшого самолета. Применение данных лазерного зондиро-

вания для дистанционной оценки высоты деревьев, плотности полога и лесной фитомассы может стать коммерческой реальностью в ближайшее время.

ЛИТЕРАТУРА

Анучин Н.П. Лесная таксация. 3-е изд.- М.: Лесн. пром-сть, 1971.- 512 с.

Басов Н.Г., Катулин В.А. Грядущая революция в технологии // Гипотезы. Прогнозы (Будущее науки): Международный ежегодник. М.: Знание, 1989.- Вып.22.- С. 47-61.

Григорьяни В.В. Лазеры.- М.: Знание, 1975.- 64 с.

Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ.- М.: Статистика, 1973.- 392 с.

Желудов А.В. Аэрофотосъемочное оборудование для лазерной таксации лесов // Лесоустройство, таксация и аэрометоды. Сб. научн. тр.- Л.: ЛенНИИЛХ, 1985.- С. 127-129.

Бидин В.М. Дистанционное зондирование при изучении динамики лесных экосистем за рубежом: Обзор. информ.- М.: ВНИИЛесресурс, 1983.- 40 с. (Лесоводство и лесоразведение, вып. 2).

Кокочкин П.А., Нагимов З.Я. Структура фитомассы крон полога сосняка ягодничкового // Лесная таксация и лесоустройство. Межвузовск. сб. научн. тр.- Красноярск: СТИ, 1990.- С. 63-67.

Котман Г.Б. Рост и форма деревьев.- Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1986.- 211 с.

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

Першиков В.П. Проблемы исследования средств дистанционного зондирования лесов // Аэрокосмический мониторинг лесных ресурсов зоны интенсивного ведения лесного хозяйства. Тез. докл. - Львов: ЛПТИ, 1988.- С. 82-84.

Першиков В.П., Анферов В.М. Радиолокационное зондирование лесных территорий с борта вертолета МИ-8 // Там же, с. 84.

Солодухин В.И., Жуков А.Я., Мажугин И.Н., Наркевич В.И. Методы изучения вертикальных сечений древостоев. Методич. рекомендации.- Л.: ЛенНИИЛХ, 1976.- 58 с.

Солодухин В.И., Кулясов А.Г., Утенков Б.И., Жуков А.Я., Мажугин И.Н., Емельянов В.П., Королев И.А. Съемка профиля кроны дерева с помощью лазерного дальномера // Лесн. хоз-во, 1977а.- № 2.- С. 71-73.

Солодухин В.И., Жуков А.Я., Мажугин И.Н., Вокова Т.К., Полежаев В.М. Возможности лазерной аэросъемки профилей леса // Лесн. хоз-во, 1977б.- № 10.- С. 53-58.

Солодухин В.И., Мошкалева А.Г., Мажугин И.Н., Жуков А.Я., Бескова Т.К. Новый метод таксации // Лесоустройство, таксация и аэрометоды. Сб. научн. тр.- Л.: ЛенНИИЛХ, 1978.- С. 39-43.

Солодухин В.И., Шевченко К.В., Мажугин И.Н., Вокова Т.К. Распределение деревьев по площади в связи с высотой древостоев, определяемой по лазерной профилограмме // Там же, 1985.- С. 75-83.

Терскова И.А., Терскова М.И. Рост одновозрастных древостоев.- Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1980.- 205 с.

Усольцев В.А. Рост и структура фитомассы древостоев.- Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1986.- 253 с.

Усольцев В.А. Глобальные экологические программы и базы данных о фитомассе лесов // Изв. вузов. Лесн. журн., 1993.- № 4.- С. 3-7.

Усольцев В.А. Международный лесной мониторинг и базы данных о фитомассе лесов // Лесная таксация и лесоустройство. Межвуз. сб. научн. тр., 1994.- С. 42-49.

Усольцев В.А. Международный лесной мониторинг, глобальные экологические программы и базы данных о фитомассе лесов.- Екатеринбург: УГЛТА, 1995а.- 91 с.

Усольцев В.А. Международный лесной мониторинг, глобальные экологические программы и базы данных о фитомассе лесов // Лесн. хоз-во, 1995б.- № 5.- С. 33-35.

Усольцев В.А., Бедарева О.М., Харитонов Б.Е., Успенский И.С. Опыт составления таблиц надземной фитомассы чернышсакульничков // Лесная таксация и лесоустройство. Межвуз. сб. научн. тр., 1993.- С. 24-35.

Усольцев В.А., Тепикин С.В., Мельникова И.В., Нагимов З.Я. Оценка массы крон сосны и ели Среднего Урала на основе псевдоинвариантных взаимосвязей // Леса Урала и хозяйство в них.- Екатеринбург: УГЛТА, 1994.- Вып. 17.- С. 112-127.

Усольцев В.А., Сальников А.А., Горбунова С.А., Нагимов З.Я. Принципы формирования баз данных о фитомассе лесов России и Швейцарии // Там же, 1995.- Вып. 18.- С. 198-227.

Федоров Б.Ф., Гордон С.А. Что такое лазер.- М.: Изд-во ДССАФ, 1967.- 120 с.

Aldred A.H., Bonnor G.M. Application of airborne lasers to forest surveys // Inf.Rep. PI-X-51, Tech. Inf. and Dist. Gen-

104
ter, Petawawa National Forestry Inst., Chalk River, Ontario,
1985.- 62 pp.

- Aldred A.H., Lowe J.J. Application of large-scale photos to a forest inventory in Alberta // Can. For. Serv., For. Mgmt. Inst., Inf. Rep. FMR-X-107, 1978.- 57 pp.
- Aldred A.H., Sava-Wittgenstein L. Tropical tests of the forestry radar altimeter // Can. For. Serv., For. Mgmt. Inst., Inf. Rep. FMR-X-14, 1968a.- 34 pp.
- Aldred A.H., Sava-Wittgenstein L. Tropical tests of the forestry radar altimeter // Can. For. Serv., For. Mgmt. Inst., Inf. Rep. FMR-X-12, 1968b.- 28 pp.
- Arp H., Griesbach J.C., Burns J.P. Mapping in tropical forests: a new approach using the laser AFR // Photogramm. Eng. Remote Sens., 1982.- Vol. 48.- No.1.- P. 91-100.
- Baldwin V.C.Jr., Saucier J.R. Aboveground weight and volume of unthinned, planted longleaf pine on west gulf forest sites // Res. Paper SO-191, U.S.F.S. Southern Forest Experim. Station, New Orleans, LA, 1983.- 25 pp.
- Borders B.E. Systems of equations in forest stand modeling // Forest Sci., 1989.- Vol. 35.- No.2.- P. 548-556.
- Chappelle E.W., Williams D.L. Laser induced fluorescence (LIF) from plant foliage // IEEE Transactions on geoscience and remote sensing, 1987.- Vol. GE-25.-No.6.- P. 726-736.
- Clark A.III., Taras M.A. Biomass of shortleaf pine in a natural sawtimber stand in northern Mississippi // Res. Paper SE-146, U.S.F.S. Southeastern For. Experim. Stat., Asheville, NC, 1976.- 32 pp.
- Clark A.III., Phillips D.R., Frederick D.J. Weight, volume and physical properties of major hardwood species in the Gulf and Atlantic Coastal Plains // Res. Paper SE-250, U.S.F.S. Southeastern For. Experim. Stat., Asheville, NC, 1985.- 66 pp.
- Collins J.G. Airborne laser valley/stream cross-section data collection // Proc. Rem. Sens. Symp., Oct. 29-31, 1979, Reston, Va, 1979.- P. 63-70.
- Curtis R.O. Height-diameter and height-diameter-age equations for second-growth Douglas-fir // Forest Sci., 1967.- Vol. 13.- No. 4.- P. 365-385.
- Enabnit D. Airborne laser hydrography // Proc. Rem. Sens. Symp., Oct. 29-31, Reston, Va, 1979.- P. 71-72.

- Hibler W.D. Characterization of cold regions terrain using airborne laser profilometry // J. Glaciol., 1975.-Vol.15.- No. 73.- P.329-347.
- Hickman G.D., Hogg J.E. Application of an airborne pulsed laser for near-shore bathymetric measurements // Remote Sens. Environ., 1969.- Vol. 1.- P. 47-58.
- Hoge F.E., Swift R.N., Frederick E.B. Water depth measurement using an airborne pulsed neon laser system // Appl. Optics, 1980.- Vol. 19.- No. 6.- P.871-883.
- Hoge F.E., Swift R.N., Yungel J.K. Feasibility of airborne detection of laser-induced fluorescence emissions from green terrestrial plants // Appl. Optics, 1983.-Vol.22.-No.19.- P. 2291-3000.
- Kalshoven J.E., Dabney Ph.W. An airborne laser polarimeter system (ALPS) for terrestrial physics research // Proc. of SPIE. - 1988.- Vol. 924.- P. 33-35.
- Kalshoven J.E., Dabney Ph.W. Airborne laser polarimetry measurements during the forest ecosystems dynamics experiment // Proc. of the IGARSS'90 Symposium held at the University of Maryland, College Park, MD, May 20-24, 1990.- Vol. 1.- P.897-899.
- Kirby M.E., Sutton J.T. Comparisons of laser profilometer sea ice roughness with surface truthed data and SLAR imagery // Proc. 15th Internat. Symp. on Rem. Sens. of Environ., Ann Arbor, Mi, 1981.- P. 563-575.
- Korbick M., Elacki C. A shuttle scanning laser altimeter for topographic mapping // Proc. 15th Internat. Symp. on Rem. Sens. of Environ., Ann Arbor, Mi, 1981.- P. 741-744.
- Krabill W.B., Collins J.G., Link L.E., Swift R.N., Butler M.L. Airborne laser topographic mapping results // Photogramm. Eng. Remote Sens., 1984.- Vol. 50.- No. 6.- P. 685-694.
- Krabill W.B., Martin C.F. Aircraft positioning using global positioning system carrier phase data // Navigation J. Inst. Navigation, 1987.- Vol. 34.- No.1.- P. 1-21.
- Link L.E. Capability of airborne laser profilometer to measure terrain roughness // Proc. 6th Symp. on Rem. Sens. of Environ., Univ. of Michigan, 1969.- P. 189-196.
- Link L.E. Analysis of the ability of a laser profilometer system to evaluate unprepared landing sites // U.S. Army Eng. Waterways Experim. Misc. Paper M-73-7, 1973.- 51 pp.

- Link L.E., Collins J.G. Airborne laser systems use in terrain mapping // Proc. 15th Internat. Symp. on Rem. Sens. of Environ. Ann Arbor, Mi, 1981.- P. 95-110.
- Lowry R.T., Brochu C.J. A system for the treatment of airborne laser profilometer data of ice // Defence Research Establishment Ottawa, DREO Rep. No. 725, 1975.- 53 pp.
- Lyons E.H. Forest sampling with 70 mm ³⁰mm ³⁰mm air-base photography from helicopters // Photogrammetria, 1967.- Vol.22.- P. 213-231.
- Maclean G.A. Timber volume estimation using cross-sectional photogrammetric and densitometric methods. Masters thesis, University of Wisconsin, Madison, 1982.- 227 pp.
- Maclean G.A., Krabill W.B. Gross-merchantable timber volume estimation using an airborne LIDAR system // Can. J. Remote Sens., 1986.- Vol. 12.- No. 1.- P. 7-18.
- Nelson R.F., Krabill W.B., Maclean G.A. Determining forest canopy characteristics using airborne laser data // Remote Sens. Environ., 1984.- Vol. 15.- P. 201-212.
- Nelson R.F., Krabill W.B., Tonelli J. Estimating forest biomass and volume using airborne laser data // Remote Sens. Environ., 1988a.- Vol.24.- P. 247-267.
- Nelson R.F., Swift R.H., Krabill W.B. Using airborne lasers to estimate forest canopy and stand characteristics // J. of Forestry, 1988b.- Vol. 86.- No.10.- P. 31-38.
- Nielsen U. Forestry radar altimeter tests // Can. For. Serv., For. Mgmt. Inst. Internal Rep. FMR, 1970.- 17 pp.
- Nielsen U. Tree and stand measurements from aerial photographs: an annotated bibliography // Can. For. Serv., For. Mgmt. Inst. Inf. Rep. FMR-X-29, 1971.- 111 pp.
- Nielsen U. Description and performance of the forestry radar altimeter // Can. For. Serv., For. Mgmt. Inst. Inf. Rep. FMR-X-59, 1974a.- 17 pp.
- Nielsen U. The forestry radar altimeter tested in the tropics // Can. For. Serv., For. Mgmt. Inst. Inf. Rep. FMR-X-66, 1974b.- 13 pp.
- Nielsen U., Aldred A.H. New development for tropical surveys prove successful // Can. For. Serv., For. Mgmt. Inst. Reprint of paper presented at IUFRO/ISP Meeting, July 8, 1978, Freiburg, Germany, 1978.- 12 pp.

- Rempal R.C., Parker A.K. An information note on an airborne laser terrain profiler for micro-relief studies // Proc. 3rd Symp. on Rem. Sens. of Environ., Univ. of Michigan Inst. of Science and Technology, 1964.- P. 321-337.
- Saucier J.R.O., Clark A.III. Tables for estimating total tree and product weight and volume of major southern tree species and species group // Rep. No. 85-A-11, Southwide Energy Committee, Amer. Pulpwood Assn., Inc., Washington, DC, 1985.- 59 pp.
- Schreier H., Loughheed J., Gibson J.R., Russel J. Calibrating an airborne laser profiling system // Photogramm. Eng. Remote Sens., 1984.- Vol. 50.- No. 11.- P. 1591-1598.
- Schreier H., Loughheed J., Tucker C., Leckie E. Automated measurements of terrain reflection and height variations using an airborne infrared laser system // Int. J. Remote Sens., 1985.- Vol.6.- No. 1.- P. 101-113.
- Taras M.A., Clark A.III. Aboveground biomass of loblolly pine in a natural, uneven-aged sawtimber stand in central Alabama // Tappi, 1975.- Vol. 58.- No. 2.- P. 103-105.
- Thomasius H.O. Untersuchungen über die Brauchbarkeit einiger Wachstumsgrößen von Bäumen und Beständen für die quantitative Standortbeurteilung // Arch. Forstwesen, 1963.- Bd. 12.- H. 12.- S. 1267-1323.
- Tooma S.G., Tucker W.B. Statistical comparison of airborne laser and stereo photogrammetric sea ice profiles // Remote Sens. Environ., 1973.- Vol. 2.- No. 4.- P. 261-272.
- Tranmer B.B., Yost R.S., Uehara G. Application of geostatistics to spatial studies of soil properties // Advances in Agronomy, N.C.Brady, Academic Press, Inc., New York, 1985.- P. 45-94.
- Warrick A.W., Myers D.E., Nielsen D.R. Geostatistical methods applied to soil science // Methods of soil analysis. A. Klute (ed.). Ed. 2. Soil Science Soc. Am., Inc., Madison, WI, 1986.- P. 53-82.
- Weihe J. Massen- und Stärkenwachstum der Fichte als Funktion des Höhenwachstums // Allgemeine Forst- und Jagdzeitung, 1961.- No. 132.- S. 131-136.

О Г Л А В Л Е Н И Е

Электронный архив ИГиЛ

	Стр.
ВВЕДЕНИЕ.....	3
I. СТАНОВЛЕНИЕ И СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ЛАЗЕРНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ.....	7
I.1. Начальный этап радиолокационного и лазерного зондирования земной поверхности.....	7
I.2. Применение лазера непрерывного действия.....	10
I.3. Применение импульсно-периодического лазера.....	13
I.3.1. Импульсно-периодический лазерный дальномер.....	13
I.3.2. Лидар - лазерная система двойного действия.....	15
I.4. Лазерное сканирование.....	20
I.5. Некоторые бортовые лазерные системы.....	20
Выводы.....	27
2. МЕТОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ЛАЗЕРНОЙ ОЦЕНКИ МАССООБРАЗУЮЩИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДРЕВОСТОЕВ.....	28
2.1. Имитация бортовой лазерной съемки в наземных экспериментах.....	28
2.1.1. Исследование лазерных профилей, снятых на горизонтальной измерительной трассе.....	29
2.1.2. Съемка и обработка стереофотограмметрических (СФГ) профилей.....	30
2.1.3. Определение высоты дерева по высоте случайного сечения кроны и ее форме.....	35
2.1.4. Наземные измерения, связанные с оценкой высоты СФГ-профиля.....	36
2.2. Бортовая лазерная оценка массобразующих показателей древостоев.....	41
2.2.1. Объекты и методы.....	41
2.2.1.1. Система лидара КЦДЗ.....	41
2.2.1.2. Система лидара НАСА.....	46
2.2.2. Измерение высоты древостоя.....	51
2.2.2.1. Лазерная оценка высоты древостоя в произвольной точке профиля (система лидара КЦДЗ).....	51
2.2.2.2. Лазерная оценка средней высоты древостоя на профиле таксационного выдела (система лидара КЦДЗ).....	56
2.2.2.3. Прогнозирование наземной оценки высоты деревьев с использованием лидара НАСА.....	61

2.2.3. Измерение плотности полога.....	65
2.2.3.1. Оценка плотности полога лидаром КЦДЗ.....	65
2.2.3.2. Оценка плотности полога лидаром НАСА.....	68
2.2.4. Оценка породного состава.....	69
Выводы.....	71
3. МЕТОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ЛАЗЕРНОЙ ОЦЕНКИ ФИТОМАССЫ ДРЕВОСТОЕВ.....	73
3.1. Вывод эмпирических регрессионных моделей.....	73
3.2. Проверка пригодности регрессионных моделей.....	76
3.2.1. Оценка моделей по проверочной выборке из массива лазерных данных, по которому получена модель.....	76
3.2.2. Проверка моделей по данным, полученным при дополнительных залетах.....	81
3.2.3. Оценка расхождений между повторностями (основными и дублирующим залетами).....	82
3.2.4. Влияние стратификации древостоев по породам на лазерную оценку фитомассы.....	85
3.3. Регрессионные модели для оценки наземной фитомассы при лазерном зондировании лесов Урало-Казахстанского региона.....	87
Выводы.....	92
4. ЛАЗЕРНАЯ ОЦЕНКА КАЧЕСТВЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛЕСНОГО ПОЛОГА.....	94
4.1. Исследование наведенной лазером флуоресценции хлорофилла.....	94
4.2. Исследование структуры крон по степени деполаризации лазерного сигнала.....	98
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	99
ЛИТЕРАТУРА.....	102
ОГЛАВЛЕНИЕ.....	108