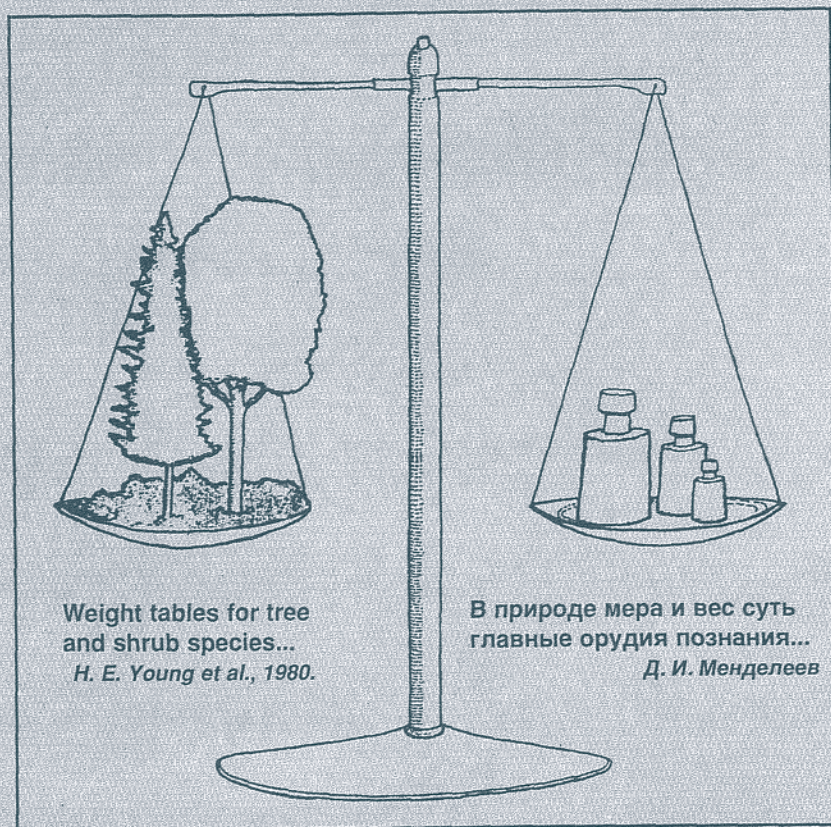


Электронный архив УГЛТУ

В. А. Усольцев

ФОРМИРОВАНИЕ БАНКОВ ДАННЫХ О ФИТОМАССЕ ЛЕСОВ



Weight tables for tree
and shrub species...

H. E. Young et al., 1980.

В природе мера и вес суть
главные орудия познания...

Д. И. Менделеев

1998
07/14



РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
УРАЛЬСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
ИНСТИТУТ ЛЕСА

В. А. УСОЛЬЦЕВ

ФОРМИРОВАНИЕ БАНКОВ ДАННЫХ О ФИТОМАССЕ ЛЕСОВ

ЕКАТЕРИНБУРГ 1998



УДК 630*52:630*174.754+630*16:582.475.4+630*587+630*425

Усольцев В. А. **Формирование банков данных о фитомассе лесов.** Екатеринбург: УрО РАН, 1998. ISBN 5—7691—0832—0.

В монографии изложены принципы формирования банков данных о фитомассе лесов как комплекса исследований, обеспечивающих создание многоцелевой системы информации о фитомассе лесов, упорядоченной в виде структурированных сводок и эмпирических моделей для решения экологических и лесохозяйственных задач разных уровней. Описаны способы и результаты получения и обобщения данных о фитомассе как традиционными наземными, так и дистанционными методами в виде количественных и качественных ее характеристик, с выявлением общих закономерностей ее распределения по зональному градиенту и локальных флуктуаций, обусловленных природными и антропогенными факторами.

Usoltsev V. A. **Compiling forest biomass data banks.** Scientific issue. Ekaterinburg: UrB RAS, 1998.

Some principles of forest biomass data banks compiling are stated as a complex investigation aiming to create a multi-purpose forest biomass information system regulated as systematized harvest biomass data sets and empirical models to solve ecological and forest management problems of different levels. Methods and results of obtaining and processing forest biomass data both with traditional ground and with remote sensing methods in the form of quantitative and qualitative indices with clearing up both common zonal regularities of biomass distribution and its local fluctuations related to natural and man-made influences are described.

Ответственный редактор
доктор биологических наук **С. Г. Шнятов**

Рецензенты
доктор сельскохозяйственных наук **П. М. Матвеев**
доктор сельскохозяйственных наук **П. А. Феклистов**

ISBN 5—7691—0832—0

У ППП—1998—54(98)—137 ПВ—1998
8П6(03)1998

© УрО РАН, 1998 г.

В природе мера и вес суть главные орудия познания.
Наука начинается тогда, когда начинают измерять...

Д. И. Менделеев

ВВЕДЕНИЕ

Наука о количественной оценке лесных ресурсов — лесная таксация, или “древоизмерение”, изначально и традиционно была ориентирована только на стволовую древесину как объект хозяйствования. Лишь в конце XIX в. появились первые данные о фитомассе крон (Flury, 1892; Hartig, 1896), имевшие целью вовлечение в ресурсный потенциал всех частей дерева. Развитие ресурсоведческого аспекта оценки всей фитомассы лесов, определяемого как лесное ресурсоведение (Поздняков, 1973), пришлось на 1930—1960 гг. (Рейхардт, 1934; Солодкий, 1958; Йевинь, Дикельсон, 1962; Р. Томчук, Г. Томчук, 1966) с постепенным осознанием превалирующей роли экономического аспекта в проблеме утилизации всей фитомассы, который усугублялся необходимостью компенсации элементов питания, выносимых из лесной экосистемы.

В 1960—1970 гг. оценка фитомассы лесов была стимулирована “Международной биологической программой” и вслед за ней программой “Человек и биосфера”, в ходе реализации которых получили существенное развитие как методологическая, так и фактологическая стороны проблемы, резко возрос объем информации о фитомассе лесов.

На 1970—1980 гг. (после резкого повышения цен на нефть в 1973 г.) пришелся очередной информационный бум относительно оценки запасов фитомассы уже в качестве возобновляемого источника энергии (Energy..., 1981, 1983, 1985; Hummel et al., 1988). Особенно драматизировали ситуацию в США, приравнивая “энергетический кризис” по исторической значимости к таким событиям, как рождение Христа и мнувшие две мировые войны (Young, 1981). Постепенно выяснилось, что экономика производства “энергетической” древесины, как и эффективность утилизации лесных отходов, оказывается довольно шат-

кой. Цены на нефть выровнялись и проблема отошла на задний план.

Ныне мировая экологическая литература переживает очередную (на этот раз невиданный по масштабам) информационный всплеск в оценке фитомассы лесов в предвидении глобального изменения климата, обусловленного антропогенным выбросом CO_2 и парниковым эффектом. В 1992 г. принята Конвенция ООН по климату, на основе сводок данных о фитомассе лесов начались форсированные расчеты углеродного баланса, определился ряд национальных и международных экологических программ. К настоящему времени проблема вышла на уровень межгосударственных отношений — разрабатывается экономическая и правовая база “углеродных” дотаций и “углеродного” кредита. При этом проблема оценки фитомассы лесов, т. е. приходной части углеродного баланса, усугубляется промышленным загрязнением среды, обусловленными им физиологическими стрессами и снижением биопродуктивности лесов. Система международного лесного мониторинга, в том числе мониторинга фитомассы, основные положения которого приняты международной организацией ИЮФРО в 1994 г., выходит на оценку трансграничных переносов загрязнений на межгосударственном уровне. Очевидно, что для успешной разработки современных экологических программ в качестве исходной основы необходим банк данных о фитомассе лесов.

Предложенная читателю книга представляет собой дальнейшее развитие общей концепции автора в проблеме оценки фитомассы лесов, изложенной в предыдущих трех монографиях (Усольцев, 1985а, 1988а, 1997), на этот раз в плане формирования банка данных о фитомассе. Понятия банка и базы данных появились с началом интенсивной компьютеризации научной и хозяйственной деятельности. Автоматизированный банк данных определяется как система информационных, математических, технических и других средств, предназначенных для централизованного накопления и коллективного использования данных. Его составная часть — база данных, т. е. массив данных, введенный в компьютерную систему (Четвериков и др., 1987). В то же время база данных как совокупность предназначенной для машинной обработки информации, служащей для удовлетворения нужд многих пользователей, предполагает определенную ее структуризацию и совмещение с некоторым набором приклад-

ных программ (Тиори, Фрай, 1985). Тем не менее сегодня термины “база данных” и “банк данных” в массовой литературе стали по существу синонимами, а их приложение зачастую никак не связано с компьютерными системами обработки данных.

Информация о количественных показателях фитомассы лесов в основном разбросана по личным архивам исследователей и лишь некоторая ее часть опубликована. Почти половина опубликованных данных непригодна для коллективного (многопланового) использования, поскольку они не содержат полного набора сопутствующей информации. По мере накопления данных о фитомассе лесов предпринимались попытки объединения опубликованной их части в сводки как на обычном бумажном носителе (Родин, Базилевич, 1965; Уткин, 1970; Гортинский и др., 1975; Поздняков, 1975; DeAngelis et al., 1981; Cannell, 1982; Kimmins et al., 1985; Palumets, 1991; Базилевич, 1993), так и в электронном варианте (Уткин и др., 1994). В последнем случае авторы называют свою сводку “компьютерной базой данных о биопродуктивности лесных экосистем” и ссылаются на нее как на обычный общедоступный литературный источник (Исаев и др., 1995). Она подходит под вышеуказанное определение банка данных (Четвериков и др., 1987) только в первой его части, т. е. предполагает централизованное накопление информации о фитомассе лесов, позаимствованной из литературных источников. В остальном же это обычная сводка, не структурированная, не совмещенная с программным обеспечением и предназначенная для личного (не коллективного) пользования.

В настоящей работе определение банка данных также не совсем соответствует исходному его определению. Под формированием банка данных о фитомассе лесов ее автор понимает комплекс исследований, обеспечивающих создание многоцелевой системы информации о фитомассе лесов, упорядоченной в виде структурированных сводок и эмпирических моделей для решения экологических и хозяйственных задач разного уровня. Предполагается, что разрабатываемая система не ориентирована только на очередную (в настоящее время — “углеродную”) кампанию, а имеет самостоятельное значение и многофункциональную направленность. В перспективе будет создана общедоступная информационная система в сети Интернет, которую, видимо, можно назвать банком данных по определению, хотя совмещение ее с многофункциональным набо-

ром прикладных программ на сегодня представляется проблематичным.

В силу чрезвычайной трудоемкости и многоплановости проблемы сегодня речь может идти о формировании не единого банка, а локальных банков данных, приуроченных к отдельным регионам или научным центрам. Предполагается получение и обобщение данных о фитомассе как традиционными наземными, так и дистанционными методами в виде количественных и качественных ее характеристик, с выявлением общих закономерностей ее распределения по зональному градиенту и локальных флуктуаций, обусловленных и природными факторами, и деятельностью человека.

В монографии приведены сводки опубликованных данных о фитомассе осиновых, еловых и пихтовых лесов бореальной зоны Северной Евразии и ранее не опубликованные автором сведения о фитомассе сосновых, березовых и осиновых древостоев для Урало-Казахстанского региона. В целях корректного совмещения сравнительно немногочисленных данных о фитомассе с огромными "кладбищами цифр", представленными материалами лесоинвентаризаций и разнообразными таксационными нормативами, особое внимание уделено анализу и систематизации переводных коэффициентов фитомассы (отношения массы стволов, хвои, ветвей, корней к запасам стволовой древесины). Основу методологии, как и в предыдущих монографиях, составляет применение многомерного регрессионного анализа и системы связанных уравнений.

Математические модели переводных коэффициентов ориентированы на использование, по крайней мере, в трех направлениях. Во-первых, это стыковка их с многочисленными региональными таблицами хода роста древостоев (ТХР) с последующим применением полученного набора таблиц в лесоинвентаризационных работах и в экологических приложениях. Во-вторых, это стыковка названных коэффициентов с данными государственного учета лесного фонда (ГУЛФ) в целях создания переводных банков данных о фитомассе и картографирования фитомассы лесных экосистем. В-третьих, это расчет предельных показателей фитомассы для оценки ресурсного потенциала лесных площадей и возможного "стока" атмосферного углерода. Изложен также первый опыт выявления региональных различий в эффективности работы ассимиляционного аппарата, обу-

словенных как природными факторами, так и атмосферными загрязнениями.

На первый взгляд могут показаться чрезмерно детализированными главы, посвященные анализу систем связанных уравнений и применению бортовых лазерных систем. В предыдущих монографиях системы связанных и рекурсивных (рекуррентных) уравнений применялись без анализа их возможностей в различных лесоводственных приложениях и без оценки корректности таких систем. Теперь этот пробел восполнен. Лазерные бортовые системы перспективны для зондирования лесных экосистем на больших территориях, в странах с большими площадями лесов, в том числе — России. Однако все исследования по количественной и качественной оценке фитомассы лесов с применением названных систем сосредоточены сегодня в США и Канаде. Повышенное внимание автора книги к упомянутым проблемам частично компенсирует практически полное отсутствие информации по ним в нашей стране.

Автор выражает глубокую признательность за активное содействие при выполнении работы аспирантам А. А. Сальникову и В. В. Кирилловой, а также д. б. н., профессору С. А. Шавнину, к. б. н. Л. А. Семкиной, кандидатам ф.-м. наук В. В. Летучеву, А. Ю. Вдовину и Г. Б. Кофману, высказавшим ценные замечания при написании отдельных глав монографии.

Глава 1

ГЛОБАЛЬНЫЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ОЦЕНКИ ФИТОМАССЫ ЛЕСОВ

1. 1. ПРОБЛЕМА ИЗМЕНЕНИЯ ГЛОБАЛЬНОГО УГЛЕРОДНОГО ЦИКЛА И КЛИМАТА

Ухудшение экологической обстановки на планете создает опасность существенного повышения содержания углерода в атмосфере. Атмосферный углерод находится в непрерывном круговороте: в результате фотосинтеза он усваивается растительностью, а в результате сжигания и разложения органики — освобождается и выбрасывается в атмосферу (рис. 1). Атмосферный углерод совершает круговорот посредством наземной биоты через каждые 7 лет, и на планетарные леса приходится около 90 % атмосферно-наземного круговорота. Поток углерода через наземную биоту вследствие фотосинтеза растений, дыхания и разложения составляет ежегодно около 100 Гт (гигатонн, или млрд т). Океан имеет больший резерв углерода, но годичный нетто-поток в атмосферу через его биоту примерно равен наземному (рис. 2).

Леса играют особо важную роль в глобальном углеродном цикле, поскольку представляют экосистемы с наибольшими запасами фитомассы. Согласно одной из оценок (Olson et al., 1983), живой растительный покров содержит около 600 млрд т углерода, в том числе: 440—550 — лесная растительность, 20—50 — травянистая растительность, 17—30 — сельскохозяйственные культуры, 5—15 — болота, 10—40 — тундра и аридные территории, 1—45 — океан. Согласно более поздней оценке (Dixon et al., 1994), запасы углерода в мировых лесных экосистемах составляют 1100 млрд т, распределенные по зонам бореальных, умеренных и тропических лесов в соотношении 49, 14 и 37 %.

Развитие человеческой цивилизации привело к нарушению естественного биосферного круговорота и баланса не только углерода, но и другой важной биосферной компоненты — кисло-

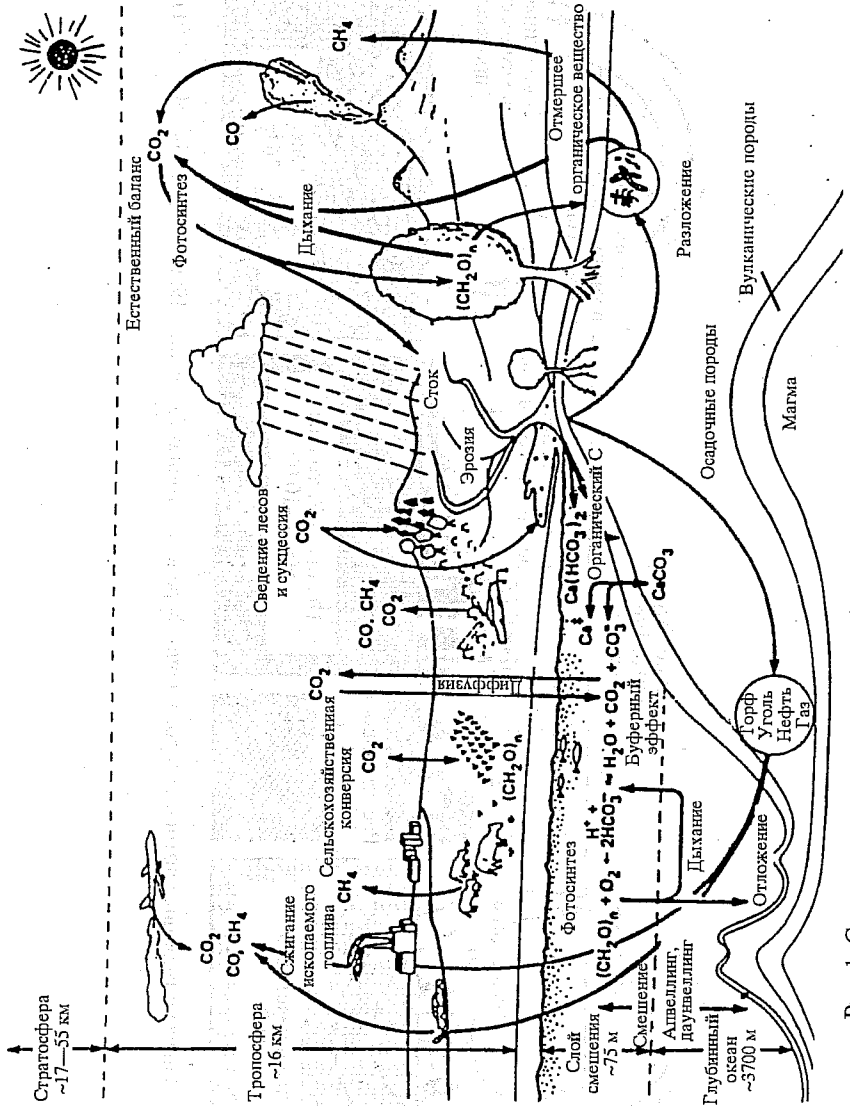


Рис. 1. Схематическая диаграмма глобального углеродного цикла (Solomon et al., 1985)

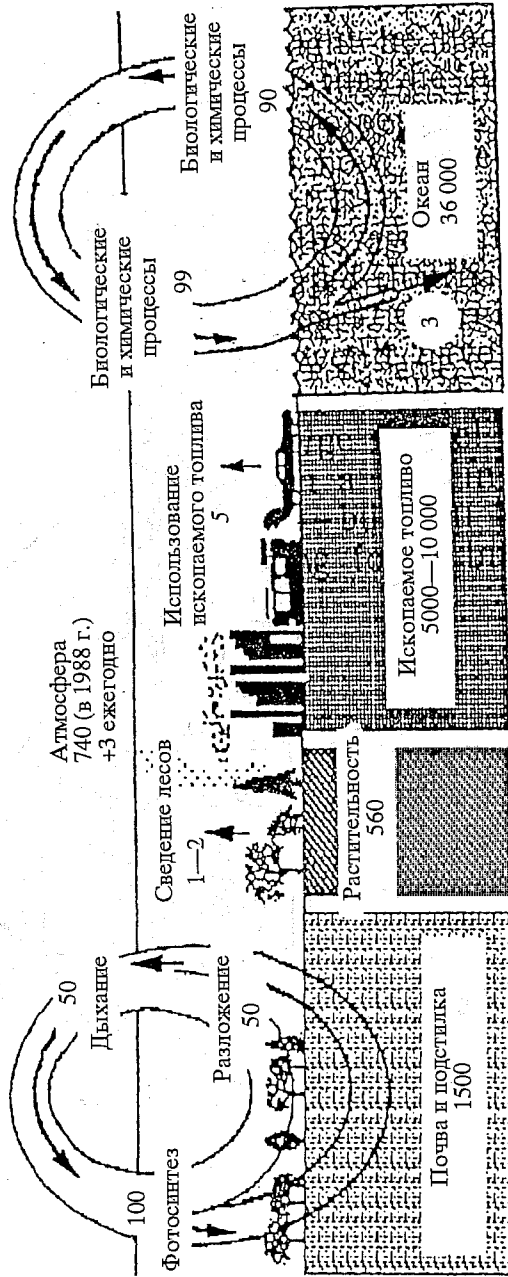


Рис. 2. Запасы и годичные потоки углерода в биосфере в гигатоннах (Schneider, 1990; цит. по: Global..., 1991)

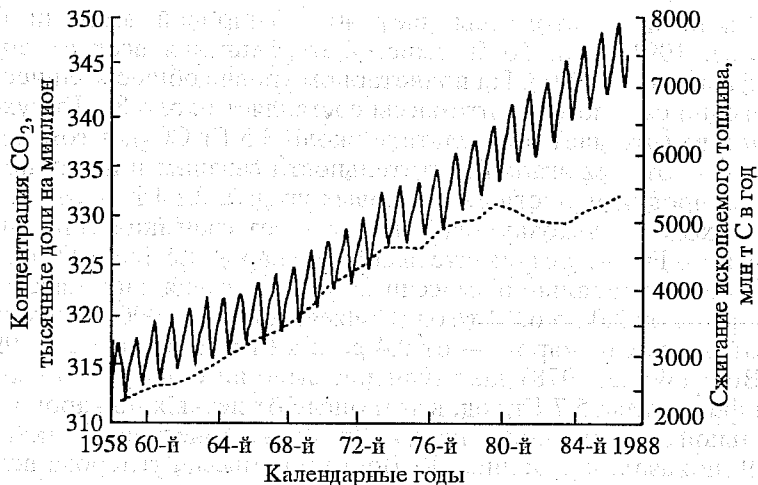


Рис. 3. Увеличение концентрации атмосферного CO₂ (сплошная пульсирующая кривая) и эмиссия C от сжигания ископаемого топлива (прерывистая линия). Ежегодная пульсация содержания CO₂ обусловлена сезонностью фотосинтетической активности (Lashoff, Tirpak, 1989; цит. по: Levine, 1991)

рода. Сегодня высказываются предположения о непрерывном процессе оксидизации Земли как следствии технической деятельности человека, а Марс рассматривается как модель “хорошо оксидизированной” планеты (Чесноков, 1997).

Оценки эмиссии атмосферного углерода, связанной с технической деятельностью человека и особенно — с интенсивным сжиганием ископаемого топлива (каменного угля, нефтепродуктов, газа) и сведением лесов, составляют от 3 (Tans et al., 1990) до 7 Гт/год (Kläuchi, 1993). Особенно интенсивно этот процесс идет в последние десятилетия. Начиная с 1958 г., наблюдалось хорошее соответствие между нарастанием эмиссии и количеством сжигаемого ископаемого топлива. Но в начале 80-х годов взаимосвязь названных двух тенденций внезапно нарушилась и первая из них стала все более преобладать над второй (рис. 3). Причины такого расхождения кроются в интенсивном сведении лесов, особенно тропических, и в нарастающих масштабах сжигания органики, или фитомассы как первичной продукции растительного покрова, в том числе вследствие лесных пожаров.

Сжигание фитомассы дает 40 % мировой эмиссии CO_2 (Levine, 1991), или 50 % эмиссий от сжигания всех ее видов (Andrasko et al., 1991). На планетарном уровне общее количество ежегодно сжигаемой фитомассы составляет около 8,7 Гт сухого вещества (что дает в результате около 3,5 Гт CO_2), в том числе 3,7 Гт — от выжигания растительности саванны в целях повышения продуктивности ее кормовых угодий, 2,0 Гт — от сжигания отходов сельхозкультур, 1,4 Гт — от сжигания топливных дров и 1,6 Гт — в результате лесных пожаров (Levine, 1991). Другие оценки глобальной эмиссии CO_2 от сжигания фитомассы колеблются от 3,0 до 6,2 Гт/год (Crutzen, Andreae, 1990), в том числе от лесных пожаров — от 0,4 до 2,6 Гт/год (Tans et al., 1990). К. Вонг (Wong, 1978) дает значение эмиссии углерода от сжигания фитомассы 5,7 Гт/год, в том числе от лесных пожаров в бореальной и умеренной зоне 0,47 Гт/год. Г. Фанесток (Fahnestock, 1979) показал, что данные К. Вонга по эмиссии углерода вследствие лесных пожаров завышены примерно в 4 раза, поскольку были получены в предположении полного сгорания лесной фитомассы. Г. Фанесток показал, что при верховых пожарах сгорает только хвоя, листва и ветви тоньше 6 мм, т. е. фракции, составляющие лишь 8 % живой надземной фитомассы.

Бореальные леса России играют существенную роль в углеродном цикле планеты и составляют свыше 25 % мировых лесных ресурсов. Прямая и косвенная эмиссия CO_2 в результате лесных пожаров в России достигает 0,33 Гт/год (Dixon, Krankina, 1993) и примерно равна количеству CO_2 , связываемому лесной растительностью — 0,41 Гт/год (Sedjo, 1992).

Накопление углеродсодержащих газов CO_2 , CO , CH_4 , хлорфлюороуглеродов и др., из которых абсолютно преобладает первый, приводит к так называемому парниковому эффекту как следствие минимизации фитомассы растительного покрова планеты при одновременной максимизации содержания CO_2 и других парниковых газов в атмосфере (Межжерин, 1994). Согласно прогнозам (Gammon et al., 1985), в ближайшие 200—300 лет содержание CO_2 в атмосфере может подняться в 10 раз и за сравнительно короткое время достичь уровня, который уже был на Земле 100 млн лет назад (рис. 4). Исходя из этой тенденции в следующем столетии может наступить глобальное потепление климата с непредсказуемыми и необратимыми катастрофическими последствиями.

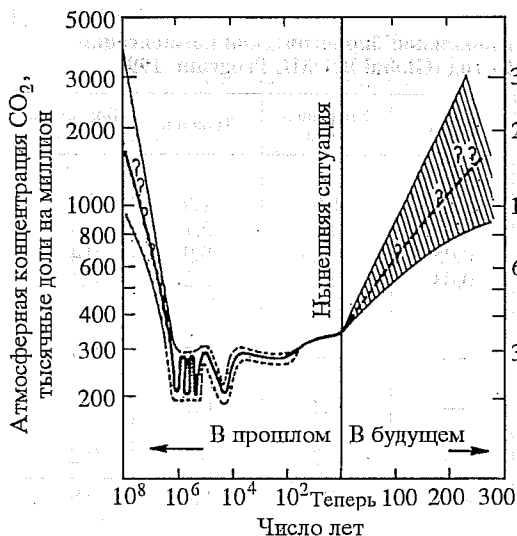


Рис. 4. Ретроспектива динамики содержания атмосферного CO_2 в течение 100 млн лет в логарифмических координатах. Для сравнения в линейном временном масштабе дан прогноз на последующие столетия. Пульсация кривой в течение последнего миллиона лет связана с периодическими обледенениями (Gammon et al., 1985)

В качестве одного из вариантов решения предлагаются проблемы повышения продуктивности фитомассы лесов (Dyson, 1977) и интенсификации лесного хозяйства (Winjum et al., 1993). Потенциальный уровень глобальной компенсации содержания углерода в атмосфере составляет около 10 Гт/год (табл. 1), в том числе в тропиках, умеренной и бореальной зонах соответственно 70, 20 и 10 % (Global BIOME Program, 1991). Последние расчеты (Brown, 1996) показывают, что путем интенсивных лесоводственных мероприятий в течение предстоящих 50 лет можно скомпенсировать 11—15 % антропогенных выбросов CO_2 в атмосферу за тот же период. При этом предполагается по существу тройной эффект: депонирование излишков углерода, повышение ресурсного потенциала и улучшение природной среды (Яблоков, 1995).

Однако климатические изменения влекут за собой трудно предсказуемые последствия для самих лесов на уровнях растения, экосистемы, биома (Kraeuchi, Xu, 1995). Разные виды растений имеют разные адаптивные реакции. Поскольку на ближайшие десятилетия предсказываются изменения климата более существенные, чем за последние тысячелетия, легко приспособляющиеся виды будут находиться в лучших условиях. Быстрое изменение климата может вызвать разрушение лесных экосис-

Таблица 1

Потенциальный уровень глобальной биологической компенсации содержания углерода, Гт/год (Global BIOME Program, 1991)

Мероприятие	США	Умеренная зона	Тропики	Бореальная зона
Связывание углерода				
Облесение территорий	0,10	1,6	1,9	0,1
Агролесоводство	0,05	0,1	2,1	—
Лесовосстановление	0,05	0,2	0,9	0,4
Лесоводственные приемы	0,03	0,1	0,2	0,1
Консервация углерода				
Сокращение сведения лесов	—	—	1,5	0,1
Приостановка аридизации	—	0,2	0,2	—
Контроль за сжиганием фитомассы	—	0,2	—	0,2
Итого	0,23	2,4	6,8	0,9

тем, снижение их продуктивности и возобновительной способности. Если в ближайшие 50 лет среднегодовая температура поднимется на 1,5 °С, то граница лесов в Европе и Северной Америке сместится к северу на 200 км. При более существенных климатических изменениях бореальные хвойные леса Европы продвинутся на крайний север Скандинавии, широколиственные неморальные леса сместятся из Англии в Шотландию, а склерофильная растительность Средиземноморья достигнет Англии (Holdgate, 1995). Сейчас невозможно предвидеть последствия такого перераспределения растительного покрова для планетарной фитомассы лесов и интенсивности связывания ими атмосферного углерода.

В свое время В. И. Вернадский сожалел о том, что уровень наших знаний пока не позволяет учесть, какую часть всего живого вещества составляет фитомасса растительного покрова. В настоящее время такие оценки сделаны, однако они различаются между собой в несколько раз. Климатические изменения и атмосферные загрязнения усугубляют эти противоречия в оценках. Еще более неопределенны возможные изменения в двух других основных резервуарах органического углерода лесных экосистем — в детритах и почвах, оценки которого здесь сопровождаются наибольшими ошибками (Robinson, 1989). В итоге роль лесных экосистем в глобальном углеродном балансе раз-

ными исследователями оценивается с точностью до наоборот: от положительной (Кобак и др., 1980) до отрицательной (Woodwell et al., 1978). В целом в проблеме изменения глобального углеродного цикла и климата пока много неясного.

Среди наземных экосистем эффективность фотосинтеза лесов (0,33 %) намного выше по сравнению с агроценозами (0,25 %) и травянистой растительностью (0,1 %) (Аггес, 1982). Поэтому Международной Конвенцией ООН по климату, принятой в 1992 г., предусмотрено максимально облесить земли, неудобные для других видов пользования. В США разрешение на строительство новых тепловых станций на ископаемом топливе связано с обязательствами облесения соответствующих площадей в странах тропического пояса, ежегодно теряющих вследствие рубок более 3 млрд т фитомассы. В лесах умеренной зоны лесопосадки ежегодно проводятся на площади около 1 млн га. Однако роль такого процесса, видимо, ограничена. Подсчитано, что для компенсации всех антропогенных выбросов углекислоты в атмосферу потребуется засадить площадь размером с Европу — от Атлантики до Урала (Nilsson, 1992). Нереально изыскать такие свободные площади в мире, где население сегодня составляет 6 млрд человек, а к середине XXI столетия необходимо будет обеспечить средствами существования 8,5—10 млрд людей.

В этой связи наряду с облесением предполагается замена ископаемого топлива “энергетической” древесинаой путем переключения энергетики на активный углеродный цикл. Данная проблема экономическая: сегодня стоимость 1 кВт/ч составляет 1,5—2,0 пенса, а “энергетические” плантации становятся рентабельными при его цене 3—5 центов (Holdgate, 1995).

Новую экономическую значимость приобретает биосферная роль лесов в целом, предстоит смена приоритетов в системе кадастровой оценки лесных земель. При необходимости компенсации антропогенных выбросов CO₂ получает стоимостную оценку каждая тонна депонируемого лесной растительностью углерода. Эти оценки варьируют в разных странах от 2—31 (Winjum et al., 1993) до 79 (Ноен, Solberg, 1994) американских долларов, а в расчете на 1 га лесопокрытой площади — от 80 до 1700 (Winjum et al., 1993) и даже до 3000 (Медведев, 1997) долларов.

Предстоит не просто смена парадигм в лесоводстве и лесопользовании (Тупыця, 1977; Тепляков, 1994; Уткин, 1995), но

глубокая перестройка всей экономики. В рамках международных соглашений предполагается распределение квот на выбросы углекислоты. Увеличение таких квот в одних странах за счет компенсирующего снижения выбросов в других получило название углеродного кредита. Имеется в виду увеличение квоты на выброс CO_2 от энергетики одних стран за счет их инвестиций в лесовосстановление других. В пределах страны такой принцип может быть перенесен и на отношения между регионами. Предусматривается не только плата за загрязнение в ходе экологизации системы налогообложения, но и формирование особого рынка разрешений на загрязнение (Гусев, Гусева, 1996). Первыми на пути прогресса окажутся те, кто раньше переведет свою экономику на путь естественного процесса, в котором доминирующую роль играют не орудия и способы производства, а способы максимизации живого вещества и энергии, обеспечивающие, по выражению В. И. Вернадского, автотрофность человеческого общества (Межжерин, 1994). По существу это составляет основу стратегии устойчивого развития страны и общества.

1.2. РЕКОМЕНДАЦИИ ИЮФРО ПО МЕЖДУНАРОДНОМУ МОНИТОРИНГУ ЛЕСОВ

Современная наука переживает новый этап своего развития, обозначенный в концепциях В. И. Вернадского об эволюции биосферы и роли человека в ней в качестве новой преобразующей геологической силы и И. Р. Пригожина — об эволюции сложных саморазвивающихся систем, в которые включается сам человек, как активно действующий компонент. К проявлениям этой тенденции можно отнести реализацию международного лесного мониторинга и тесно смыкающихся с ним глобальных экологических программ.

Основные задачи экологического мониторинга — слежение за состоянием экологических систем, определение направления и темпов естественных изменений и выявление ответных реакций на внешние возмущения, вызванные деятельностью человека (Базилевич, 1985). Составной частью экологического мониторинга является мониторинг лесов — систематическое слежение за состоянием лесов и земель лесного фонда в целях организации рационального хозяйства, обнаружения и предотвращения

негативных изменений в лесах, включая учет, оценку и прогноз (Терминологический словарь..., 1993).

Состоявшееся в мае 1993 года в Финляндии совещание экспертов ФАО ООН и ЕЭК по глобальной оценке лесных ресурсов рекомендовало разработку проекта глобального мониторинга фитомассы лесов. Для изучения и моделирования изменений в лесных ресурсах ученые всего мира, национальные агентства, Европейская Экономическая Комиссия, Объединенный Исследовательский Центр европейского сообщества, ФАО ООН и другие организации собирают, анализируют и интерпретируют разнообразную информацию по лесному покрову планеты. У них одна общая цель — дать полную картину состояния и тенденций в динамике мировых лесных ресурсов. В целях координации и стандартизации этих усилий XIX Мировой конгресс ИЮФРО в Монреале в 1990 г. инициировал разработку “Рекомендаций по международному мониторингу лесов”, в которой приняли участие около ста ученых из 20 стран.

Настоящий раздел посвящен изложению основных положений этого документа (IUFRO..., 1994). Ближайшая цель рекомендаций ИЮФРО по мониторингу лесов — дать перечень показателей по лесным площадям и экологическим аспектам и разработать основные принципы сбора данных, пригодных для международного использования. Они преследуют и долгосрочную цель глобальной экологической информационной службы — создание информационной сети мировых лесных ресурсов и международной сети стандартизованных (совместимых) баз данных и методов идентификации данных дистанционного зондирования. Рекомендации разработаны рабочей группой ИЮФРО по дистанционному зондированию и мониторингу мировых лесов (S4.02.05) в кооперации с ФАО ООН при финансовой поддержке Финского агентства международного развития.

1.2.1. УРОВНИ МОНИТОРИНГА ЛЕСОВ

Первым шагом при любом начинании по мониторингу является оценка потребности в информации. Это критическая фаза планирования, которая слишком часто либо игнорируется, либо (в лучшем случае) остается на заднем плане. В любом серьезном начинании наиболее важны два вопроса: “Для какой цели?” и “Кто будет использовать результаты?”.

Существуют три основных уровня мониторинга, на которых оцениваются потребности в информации — глобальный, национальный и локальный. На всех его уровнях рассматриваются три группы полезностей информации:

- получение представлений о состоянии и развитии лесов и связанных с ними ресурсов;
- планирование и управление ресурсами;
- исследование продовольственного потенциала и таких процессов, как нарушение углеродного баланса и изменение климата.

На первом — международном — уровне мировые леса рассматриваются как первичный источник древесины и недревесных продуктов, а также весомых и невосомых полезностей. Столь же (если не более) важны леса как преобладающая составная часть биосферы, обуславливающая ее биологическую продуктивность. Глобальные выходы включают в себя биологическое разнообразие, санитарное состояние и охрану лесов, круговорот углерода и изменение климата, а также водный круговорот.

На втором уровне при инвентаризации национальных лесов предметом первоочередной заботы является непрерывное пользование лесными ресурсами в стране. Наиболее важные показатели — лесная площадь и ее изменение, а также баланс между оценками сокращения и прироста лесных ресурсов. Должны исследоваться также изменения в почвах, санитарном состоянии лесов и т. д., чтобы обеспечить лесопользование на будущее.

Третий уровень оценки потребности в информации — локальный, т. е. осуществляемый в пределах какой-то части страны и обычно необходимый для обеспечения лесопродукцией. Здесь потребности в информации часто концентрируются на растительном покрове, схеме землепользования, кадастровой оценке лесных земель, качественной оценке почв и других характеристиках, необходимых в планировании использования земель под влиянием антропогенной нагрузки. Учитываются также социальная среда и локальные культурные проблемы.

Различные подходы к мониторингу требуют и разной информации, поэтому перечень необходимых показателей может варьировать от проекта к проекту. С учетом нынешней глобальной ситуации первоочередное значение на всех уровнях мониторинга имеют: размер лесного покрова, продукция фитомассы для

Информация, необходимая на различных уровнях мониторинга лесов

Показатель	Степень важности показателя на разных уровнях мониторинга		
	Локальный (сырьевая оценка)	Национальный (инвентаризация лесов)	Глобальный
Целевое землепользование	xxx	xxx	xxx
Вид покрова земли	xxx	xxx	xxx
Деградация территории	xxx	xxx	xx
Тип местообитания	xxx	xxx	xx
Тип почв	xxx	xxx	xx
Топография	xxx	xx	xx
Вид собственности	xxx	xx	x
Доступность	xxx	xx	x
Фитомасса	xxx	xxx	xxx
Запас стволовой древесины	xxx	xxx	xx
Прочие лесные продукты	xxx	xxx	x
Биологическое разнообразие	xx	xxx	xxx
Санитарное состояние лесов	xxx	xxx	xxx
Дикая фауна	xxx	xx	x
Антропогенное воздействие	xxx	xx	xx
Водоразделы	xx	xx	xx

Примечание. Составные элементы (показатели) проскта: xxx — крайне важные, xx — средней важности и x — отчасти важные.

оценки накопления и изъятия углерода, темпы изменений, происходящих в лесных площадях, качественное и санитарное состояние лесов (табл. 2).

1.2.2. ВИДЫ МОНИТОРИНГА

Различают мониторинг (табл. 3):

- покрова земли и землепользования (для управления земельными ресурсами);
- лесных ресурсов (для производства лесопродукции);
- фитомассы (для энергетического использования или контроля баланса углерода);
- качества окружающей среды (для управления экосистемами).

При мониторинге покрова земли представляет интерес общая площадь, ее нынешнее использование, растительный по-

Таблица 3

Данные, необходимые для мониторинга покрова земли, лесов, фитомассы и качества среды (x — необходимый показатель)

Показатель	Покров земли	Лес	Фитомасса	Качество среды
Идентификация положения пробной площади				
Координаты	x	x	x	x
Высота над уровнем моря	x	x	x	x
Экспозиция	x	x	x	x
Положение на склоне	x	x	x	x
Год наблюдений	x	x	x	x
Классификация площади				
Класс землепользования	x	x	x	x
Класс покрова земли	x	x	x	x
Тип растительности	x	x	x	x
Сомкнутость крон	x	x	x	x
Нарушение древостоя		x	x	
Характеристика дерева (растения)				
Порода		x	x	x
Высота дерева		x	x	x
Диаметр на высоте груди (диаметр кроны)		x	x	x
Возраст		x		
Характеристика ствола				
Размеры бревен		x		
Качество сортиментов		x		
Характеристика кроны				
Диаметр кроны			x	x
Длина кроны			x	x
Площадь листовой поверхности			x	
Степень охвоенности		x		x
Биоиндикаторы				x
Оценка повреждения		x		x
Дендрохронология				x
Растительность нижних ярусов		x	x	x
Химический состав листвы				x
Индикаторы продуктивности почв	x	x		x

кров и его потенциал, если предполагается изменение структуры землепользования. Лесное хозяйство — лишь один из пользователей.

При мониторинге лесных ресурсов и мониторинге фитомассы учитывается практически один и тот же набор показателей, хотя традиционная инвентаризация стволовой древесины отличается от оценки фитомассы. При инвентаризации фитомассы (например крон и корней древостоев, подлеска, кустарника и других видов недревесной растительности) требуются специальные подходы. Дополнительно к данным о древесных запасах или фитомассе учитываются масштаб и направление изменений запасов и прироста, темпов сведения и деградации лесов. Необходимо также знать причины изменений (пожары, лесозаготовки, браконьерство, смена породы или видового состава, антропогенное воздействие):

Мониторинг качества окружающей среды включает в себя общее и санитарное состояние экосистемы, биологическое разнообразие растительного покрова и взаимосвязь последнего с другими экосистемами. При оценке качества окружающей среды могут быть использованы специальные биоиндикаторы.

Однако названные виды мониторинга редко применяются в чистом виде, часто мониторинг объединяет сбор данных для нескольких целей одновременно.

1.2.3. ИСТОЧНИКИ ИНФОРМАЦИИ ДЛЯ МОНИТОРИНГА

Большая часть имеющейся информации дается в виде картографического материала, данных дистанционного зондирования и наземных (полевых) измерений.

1.2.3.1. Картографический материал

Картографическим материалом охвачена большая часть территории земного шара. Хотя масштаб, датировка и содержание карт могут варьировать, они дают основу для планирования работ по мониторингу.

Большинство изображений, несущих географическую информацию, имеет то преимущество, что они довольно стабильны (например реки, озера, контурные линии). Другие объекты

(например лесопокрытые площади, дороги и населенные пункты) могут менять очертания в более короткие промежутки времени. Картографические материалы необходимо задействовать в планировании мониторинга, особенно при анализе его данных.

Процедура анализа данных на простейшем уровне включает в себя составление и сопоставление специальных карт. Такой анализ выполняется вручную или более эффективно — с использованием компьютера. Компьютерная технология геоинформационных систем (ГИС) обеспечивает лучшую возможность анализа картографических материалов. Характеристики мониторинга включаются в различные базы данных, а для лесохозяйственных целей — обрабатываются как отдельные уровни информации.

Данные наземные и дистанционного зондирования лесов могут быть объединены в рамках существующей системы мониторинга. ГИС обеспечивает многие полезные функции, в частности:

- объединение карт (информация, прочитанная с карт различных масштабов, проекций и легенд);
- наложение карт (например данные дистанционного зондирования могут быть наложены на лесную тематическую карту);
- пространственный анализ.

1.2.3.2. Данные дистанционного зондирования

Установки и сенсоры для дистанционного зондирования варьируют от обратных спутниковых изображений AVHRR (с разрешением 4 км) до ручных видеокамер на летательных аппаратах (с разрешением менее 1 м).

Для получения дистанционных изображений применяются следующие приборы:

- фотокамеры с различными наборами оптических фильтров;
- видеокамеры (иногда с наборами фильтров);
- сканирующие устройства, дающие изображения на нескольких частотах одновременно, зондирующие поверхность объекта повторными полосами в диапазоне частот от видимой до инфракрасной областей спектра;

Электронный архив УГЛТУ

- радарные системы, работающие в микроволновой части электромагнитного спектра в активном режиме — облучения исследуемой поверхности и приема отраженной энергии;
- лазерные устройства.

При любом виде дистанционного зондирования обеспечивается информация по датировке объекта и методам калибровки, по используемым областям спектра и сенсорам, включая всю процедуру обработки данных.

Аэрофотоснимки. Аэроснимки в сравнении с наземными наблюдениями предполагают наличие синоптической видимости больших лесных площадей. Они дают, с одной стороны, возможность детального анализа и высокую разрешающую способность, а с другой — возможность исследовать труднодоступные территории, где полевые наблюдения требуют большого материально-технического обеспечения и создают климатические, экологические или политические проблемы.

У аэрофотоснимков есть некоторые преимущества:

- широкий диапазон съемки в видимой и инфракрасной областях спектра и высокий уровень технологии наряду с широким выбором высоты полета, что обеспечивает разнообразие масштабов изображений (от очень крупных с высокой разрешающей способностью до мелких для целей общего распознавания);
- сравнительно низкие затраты на съемку;
- не требуется сложной техники для обработки;
- дают реальную информацию об объекте и возможность интерпретации природного процесса;
- измерительная достоверность и возможность точных измерений;
- получение стереоскопических изображений.

Дешифрирование аэрофотоснимков помогает распознавать и картировать различные типы лесной растительности, а также осуществлять мониторинг и оценивать ущерб и состояние экологических стрессов.

В зависимости от вида съемок для получения характеристик исследуемых лесов должен быть подобран соответствующий масштаб. Масштабы мельче 1:30 000 используют для регионального картирования, а масштабы от 1:30 000 до 1:10 000 — для детального картирования лесов, а также для дешифрирования ти-

пов лесной растительности и оценки ущерба (поражения). Масштабы крупнее 1:10 000 применяют для очень детального мониторинга и картирования, включая оценку отдельных деревьев.

Спутниковая информация. Для съемки на континентальном уровне эффективны по затратам и обеспечивают приемлемую точность данные системы AVHRR с разрешением 1 км и суточной периодичностью. С использованием данных LAC с 1-километровым разрешением возможна классификация по укрупненным показателям (например существующие типы растительности, лесная/нелесная площади) в масштабе 1:500 000 и мельче.

Для лесного мониторинга и общих изображений сельскохозяйственных площадей рекомендуются спутниковые системы Landsat и SPOT. Преимущество Landsat MSS в том, что она предоставляет наиболее старую спутниковую информацию для оценки характеристик территорий и дает возможность ретроспективного дешифрирования снимков (начиная с 1972 г.). Landsat TM имеет широкий спектральный диапазон с семью каналами, а SPOT способствует наибольшему пространственному разрешению в цифровой спутниковой информации.

Эти спутниковые системы регистрируют изображение в оптическом диапазоне электромагнитного спектра и наличие облачности — главная помеха получения информации. Однако микроволновые (радарные) спутниковые системы, как существующие (ERS-1, JERS-1, ALMAZ), так и будущие (RADARSAT), могут оказаться эффективным средством для мониторинга лесов.

Основные преимущества спутниковой информации:

- частая повторяемость изображений земной поверхности;
- цифровой формат, что дает возможность автоматизировать дешифровку данных;
- нормируемые и контролируемые измерения во времени и пространстве;
- низкие затраты на единицу снимаемой поверхности.

Основные спутниковые операторы (такие как NOAA, SPOT, NASA, ESA) обеспечивают непрерывность спутниковой информации. Имеется определенная уверенность в том, что и новые спутниковые системы (например Landsat, SPOT, ERS) также обеспечат непрерывность данных. Появятся новейшие спутники (например ODEOS, Radarsat), которые дадут дополнительную информацию.

Стоимость спутниковой информации для целей глобального отслеживания изменений в настоящее время находится в центре внимания многих стран и предполагается (по крайней мере в США) сделать ее доступной (при сниженных затратах).

Обработка спутниковой информации включает в себя подготовительный этап, в ходе которого проводятся необходимые радиометрические и геометрические коррекции, а также цифровая, визуальная или совмещенная (гибридная) классификация изображения.

Планы на будущее.

1. Учитывать ограничения сенсоров в развитии систем классификации, определений классов и описаний.

2. Предлагать данные в геоскорректированном формате. Значительную часть процедуры дистанционного зондирования составляет подготовка данных для обработки (радиометрические и геометрические коррекции, геокодирование и реструктурирование на стандартную проекцию). Это должно выполняться региональными центрами. В файле должны быть точки наземного контроля, каталог вспомогательных данных, сопровождающих изображения.

3. Собирать информацию, обеспечивая ее реформатирование в Систему классификации лесных площадей ФАО.

4. Обеспечивать сбор общих сведений, помогающих более эффективной калибровке данных дистанционного зондирования. Могут сравниваться различные подходы и методы дешифрирования с использованием хорошо оформленных полевых данных в сочетании с соответствующими материалами дистанционного зондирования. Эти комплекты данных должны быть в базах общего пользования (например в ведении ФАО или Программы по окружающей среде ООН (ЮНЕП)).

1.2.3.3. Полевая информация

Для успешного международного мониторинга следует сочетать данные дистанционного зондирования с данными пробных площадей. Поэтому необходимы рекомендации как для проведения дистанционного зондирования, так и для закладки пробных площадей. Сведения по дистанционному зондированию используются для картографирования и мониторинга больших площа-

дей. Выборочная информация (как по дистанционному зондированию, так и по наземной инвентаризации) необходима для калибровки данных зондирования (тренировка, оценка точности результатов); сбора данных (обычно о фитомассе и состоянии лесных объектов), которые невозможно получить с помощью картографического материала и с использованием сенсоров; обеспечения основы научных исследований и построения моделей.

Полевая информация (в чистом виде или в сочетании с дистанционным зондированием) является существенной составляющей при проведении любой лесоинвентаризации и при картографировании. Необходимые данные могут быть получены со всей интересующей площади, но чаще используются некоторые ключевые (пробные) ее участки.

Основные направления использования пробных площадей:

а) инвентаризация и мониторинг лесов — в качестве самостоятельных пробных площадей или в сочетании с данными дистанционного зондирования;

б) исследование роста и продуктивности лесных экосистем.

В соответствии с целевым назначением обычно оптимизируются тип и способ закладки пробной площади. Однако при совмещении полевой информации с данными зондирования вполне применимы пробные площади, заложенные, например, для изучения роста и продуктивности древостоев.

Конфигурация пробных площадей. Пробная площадь — это некоторый участок земной поверхности, имеющий определенные границы или точку привязки. Она может быть малой и большой, круговой или прямоугольной в зависимости от типа растительности, таксационных традиций и направления использования данных. Пробные площади образуют кластеры (наборы) или независимы, могут быть временными или постоянными в зависимости от того, проводятся или нет на них повторные измерения. Временные пробные площади обмеряются лишь однажды и возможность повторного визита для выявления произошедших изменений не предусматривается.

Постоянная пробная площадь закладывается, обозначается и оформляется таким образом, чтобы повторные обмеры проводились в тех же границах и на том же объекте, и имеет план проведения повторных измерений.

Размер и форма пробной площади зависят от условий произрастания (например от ее доступности, лесорастительных усло-

вий и размеров деревьев). Однако распознать пробную площадь при дистанционном зондировании значительно легче, если ее размеры достаточно велики. Поэтому при комбинированном использовании пробных площадей и данных дистанционного зондирования рекомендуется размер пробной площади больший, чем при использовании только пробных площадей.

Для привязки спутниковой информации к наземным условиям всегда нужны полевые данные. Если ставится цель проследить изменения условий произрастания, необходимы постоянные пробные площади с повторными измерениями. Вся полевая информация должна привязываться к определенным координатам.

1.2.4. ПЛАН ВЫБОРОЧНОГО УЧЕТА

Для инвентаризации и мониторинга лесов план выборочного учета — чрезвычайно важен. Цель его — обеспечить эффективный сбор данных при приемлемых затратах и надежности информации.

Мониторинг может осуществляться с использованием двух основных методов: а) исследований в различные моменты времени на независимых выборках, при этом фиксируются произошедшие изменения как разность результатов; б) одних и тех же выборочных единиц в различные моменты времени, произошедшие изменения устанавливаются по разности результатов между повторами.

Преимущество второго метода (периодические измерения на одних и тех же пробных площадях) очевидно, поскольку при оценке изменений ошибки выборки (отклонения по ее репрезентативности) имеют один и тот же знак и, таким образом, дают более достоверный результат.

Оценка изменений по второму методу проводится на площадях, называемых единицами мониторинга (monitoring units), которые формируются из выборочных единиц определенной стадии в многостадийном выборочном учете.

1.2.4.1. Стадии выборочного учета

Первая стадия в планировании процедуры выборочного учета — обозначение границ интересующей генеральной совокупности в соответствии с типом единицы выборочного учета. Если

выборка представлена пробными площадями, генеральная совокупность набирается как большое количество равноудаленных пробных площадей. Если используются выделы, то генеральная совокупность представляет собой набор всех выделов в пределах интересующей территории. С научной точки зрения использование пробных площадей более предпочтительно, поскольку границы между соседними выделами обычно размыты и их установление несет элементы субъективизма. Тем не менее в практическом смысле выделение однородных единиц растительного покрова, т. е. выделов или биотопов, часто бывает привлекательным, особенно когда выделы или другие однородные единицы можно отсортировать с использованием дистанционного зондирования.

Вторая стадия — проверка наличия информации по интересующей генеральной совокупности. Приемлемую основу для стратификации объекта могут обеспечить спутниковые изображения (NOAA, Landsat, SPOT и др.), аэрофотоснимки или карты растительности.

Третья стадия — принятие решения о плане инвентаризации и мониторинга с допустимой ошибкой выборочного учета. Принимаются во внимание также ошибки измерений и моделирования.

1.2.4.2. Стратификация объекта

Стратификация — мощное средство повышения эффективности инвентаризации и мониторинга лесов. Суть ее состоит в объединении в одни и те же страты выборочных единиц, сходных по своим данным. Объем понятия страта обычно устанавливается на основе полевых измерений. Чем меньше варьирование показателей в пределах страта, тем меньше требуется пробных площадей для достижения заданной точности.

Имеются две разновидности стратификации — географическая и стратификация выборочных единиц в пределах данной территории или географического страта.

Географическая стратификация проводится на основе картографического материала, иногда с привлечением данных дистанционного зондирования. Например, страна, экофлористическая зона, защитная или резервная территории, регион, тяготеющий к транспортным путям, могут быть отнесены к различным стра-

там. Эффективность оценки повышается при использовании постоянных пробных площадей, когда они предварительно распределяются таким образом, чтобы наиболее высокая интенсивность выборочного учета соответствовала стратам или регионам с наибольшей вероятностью предполагаемых экологических изменений.

При другой разновидности — стратификации пробных площадей — для каждой пробной площади требуется вспомогательная или предварительная исходная информация, с использованием которой эти выборочные единицы (sample units) объединяются в однородные страты. Часто (но не всегда) есть смысл проводить такую стратификацию по географическим стратам.

1.2.4.3. Многостадийный и многофазный выборочные учеты

Эти термины иногда трудно различить. При экстенсивной лесоинвентаризации могут присутствовать элементы обоих видов учета. Типичная для многостадийного учета ситуация — выборочные единицы сменяются по стадиям, тогда как при многофазном учете они остаются неизменными по фазам (табл. 4).

Многостадийный выборочный учет используется по нескольким различным вариантам. Допустим, что применяется стратификация. Вначале спутниковые изображения стратифицируются или ранжируются по приоритету применительно к инвентаризации. Затем некоторые из них отбираются для более детального изучения на аэрофотоснимках. Последние опять стратифицируются и некоторые из них отбираются для проведения полевых измерений. Более детально эти стадии можно показать на примере.

Стадия 1: а) деление общей площади на форматы спутниковых изображений, пусть их число равно N_1 ; б) получение спутниковых изображений для всех или какой-то части форматов N_1 . Предположим, что получено n_1 спутниковых изображений, представляющих страты, обозначаемые индексом h ; в) деление n_1 спутниковых форматов на N_2 аэрофотоформатов, или единиц второй стадии; г) стратификация N_2 аэрофотоформатов по спутниковым изображениям на страты, обозначаемые индексом hi .

Стадия 2: а) составление подвыборки n_2 из всех N_2 аэрофотоформатов для их аэрофотосъемки; б) подбор аэрофото-

Таблица 4

Пример схемы выборочного учета

Стадия или фаза	Исходный материал	Выборочная единица	
		Многостадийный учет	Многофазный учет
1	Спутниковая информация	Спутниковое изображение	Полевой кластер (набор пробных площадей)
2	Аэрофотосъемка	Фотоснимок	Полевой кластер
3	Полевые измерения	Полевой кластер	Полевой кластер

снимков для составленной подвыборки аэрофотоформатов n_2 ; в) деление n_2 аэрофотоформатов на N_3 потенциальных полевых кластеров, или единиц третьей стадии; г) стратификация N_3 полевых кластеров путем дешифрирования аэроснимков на страты, обозначаемые индексом h_{ij} .

Стадия 3: а) составление подвыборки n_3 из N_3 полевых кластеров; б) отбор каждого из n_3 полевых кластеров по схеме кластера (часто более предпочтителен систематический отбор); в) проведение измерений на всех полевых кластерах; г) расчет фактических наземных данных для каждого полевого кластера.

Вес фактического измеренного наземного показателя (например запаса стволовой древесины, $m^3/га$, или доли лесопокрытой площади) для выборочной единицы U_{hij} при расчете показателей всей генеральной совокупности представляет собой обратную величину от произведения компонентов выборочного учета: $N_1h/n_1h \cdot N_2hi/n_2hi \cdot N_3hij/n_3hij$.

Многофазный выборочный учет отличается от многостадийного тем, что единицы учета на всех уровнях одни и те же. Применительно к приведенному выше примеру (см. табл. 4) это могут быть полевые кластеры. По аналогии с многостадийным учетом получаем следующий перечень фаз и операций.

Фаза 1: а) деление общей площади на единицы равного размера, представляющие площадь полевого кластера. Количество этих единиц, скажем N_1 , может быть очень большим. Они хорошо обозначаются картами и координатными системами; б) получение спутниковых изображений на все или только часть единиц N_1 . Предположим, что для n_1 единиц получены спутниковые изображения; в) стратификация n_1 единиц по спутниковому изображению на однородные страты с получением n_1h единиц в страте h .

Фаза 2: а) составление подвыборки n_2 из n_1 единиц с получением n_2h единиц из страта h ; б) получение аэрофотоснимков для подвыборки n_2 . Из практических соображений подвыборка должна быть географически сконцентрирована в целях рационализации работы по аэрофотосъемке, дешифрированию фотоснимков и особенно по полевым измерениям; в) по единицам второй фазы n_2 дешифрирование на аэроснимках тех показателей, которые находятся в тесной корреляции с показателями, наиболее важными для инвентаризации и мониторинга лесов; г) на основе дешифрирования аэроснимков стратификация n_2 единиц в однородные страты U_2hi .

Фаза 3: а) составление выборки необходимого количества (n_3hij) единиц каждого страта (U_2hi) второй фазы для полевых измерений. Здесь также важно предусмотреть географическую концентрацию n_3 полевых единиц во избежание больших затрат на передвижение; б) полевые измерения всех показателей, которые важны для лесоинвентаризации и мониторинга; в) расчет фактических наземных данных для каждой единицы U_3hij (например среднего запаса, $m^3/га$, или доли лесной площади).

Обозначим фактические наземные данные, полученные на страте U_1hi , индексом u_1hi . Это будет матрица полевых данных, полученных с n_3hij полевых кластеров. Все выборочные единицы страта U_1hi , дешифрированные по аэроснимкам, могут быть обеспечены полевыми данными u_1hi . Это означает, что все n_2 выборочных единиц второй фазы могут быть обеспечены данными полевых измерений.

Поскольку все единицы второй фазы имеют фактические наземные данные, можно перенести данные с n_2 единиц второй фазы на n_1 единиц первой через страты U_h . Единицы, относящиеся к одному и тому же страту, получают одинаковые значения наземных показателей. Поэтому при необходимости все n_1 единиц второй фазы могут быть обеспечены самостоятельными значениями наземных показателей. Это придает инвентаризации и мониторингу любой выборки генеральной совокупности достаточную гибкость.

В случае мониторинга экологических изменений все или отдельные стадии или фазы периодически обеспечиваются новыми данными. Сравнение новых и прежних материалов дистанционного зондирования дает возможность проведения стратифика-

ции на основе экологических изменений, т. е. эффективного выделения страт для инвентаризации сведения лесов или их деградации.

1.2.4.4. Целевой, или нестатистический выборочный учет

При планировании инвентаризации и управления лесами обычно более предпочтительны строгие статистические процедуры. Однако как исключение может использоваться систематический выборочный учет, более практичный и эффективный по сравнению с рандомизированной выборкой, хотя такие результаты не имеют подтверждения статистической надежности.

Иногда у нас нет возможности для сбора полевых данных объективным методом. Однако некоторые измерения можно провести вблизи путей транспорта. В комбинации с картой лесов или со спутниковой информацией даже такие измерения лучше, чем их полное отсутствие. Путем целевой выборки можно обеспечить полевыми данными каждый страт. При этом могут использоваться пробные площади, заложенные для других целей (например для изучения роста и продуктивности древостоев).

1.2.4.5. Общие аспекты

Вся информация в пределах площади инвентаризации и мониторинга должна быть упорядочена в координатной и временной системах. С этой точки зрения вся информация теоретически соответствует требованиям постоянной пробной площади. Необходимо подчеркнуть особую важность точности территориальной привязки получаемых данных.

Роль пробных площадей, обмеренных в поле, очень велика. Необходимы пробные площади, равномерно представляющие генеральную совокупность в целом как географически, так и по стратам (пропорциональное размещение пробных площадей) в пределах географического страта.

Постоянные пробные площади нужны при мониторинге экологических изменений, т. е. инвентаризации динамики лесов. Для точной привязки постоянных пробных площадей рекомендуются глобальные системы определения их местоположения. При мониторинге роста и отпада деревьев необходимо их карти-

рование, при котором в полярных координатах измеряются направление и расстояние деревьев от центральной точки. Размещение пробных площадей должно быть географически равномерное и в то же время не должны быть велики транспортные расходы при проведении измерений. Поэтому обычно используются кластеры (территориальные группировки) пробных площадей.

В целом оценки, выполненные на основе точных научных методов, более надежны и обладают доверием у пользователей. Лучше иметь всего несколько надежных пробных площадей, чем много ненадежных. Информация используется учеными, имеющими представление о статистической точности и применяющими оценки точности при интерпретации своих научных результатов.

1.2.5. ПОСТРОЕНИЕ ИНФРАСТРУКТУРЫ МОНИТОРИНГА

1.2.5.1. Структура и организация мониторинга

Глобальная база данных основывается на структурах национального уровня, которые могут быть объединены на планетарном уровне. Основные составляющие этих структур имеются сегодня во многих регионах мира, как в развитых, так и в развивающихся странах. Международные организации могут помочь в проведении мониторинга регионам, не имеющим достаточной поддержки на национальном уровне. Цель международного мониторинга — обеспечить поддержку и помощь этим странам в развитии своей национальной структуры для мониторинга лесов.

Ученые, государства и организации, участвующие в мониторинге лесов, должны выполнять следующие функции:

- оказывать благотворительную помощь в проведении мониторинга, особенно в развивающихся странах;
- поддерживать правительства и национальные организации;
- содействовать координации и стандартизации технологий дистанционного зондирования лесов;
- обеспечивать лучшее взаимодействие и координацию усилий ученых, государств, организаций и благотворительных фондов;

- осознавать важность наличия текущей информации о лесных ресурсах и банка данных, составляемого международной организацией для поиска и коррекции нужной информации;
- изыскивать новые источники поддержки лесоводственных исследований.

ФАО и ЮНЕП являются организациями, функционально предназначенными для координации и осуществления деятельности, связанной с глобальным ресурсным мониторингом. Международным организациям следует взаимодействовать с государствами-участниками и другими организациями, обеспечивающими вклад в региональный и глобальный мониторинги.

Все страны должны иметь одинаковый доступ к новой технологии и информации. Необходимы: стажировка участников, особенно в развивающихся странах; обеспечение потоков информации в двух направлениях — от международных организаций — к странам-участницам, ученым и ответственным чиновникам и обратно, для чего следует разрабатывать новые и совершенствовать существующие базы данных, обобщающие глобальную, региональную и национальную информацию о лесном покрове.

1.2.5.2. План мониторинга

Для проведения мониторинга необходимо составить его план, включающий в себя следующие позиции:

1. Полномочия (юридические мандаты и уставы, согласно которым организация будет выполнять программу мониторинга);
2. Стратегию (общие принципы организации мониторинга);
3. Цели (разработку целей путем оценки потребности в информации);
4. Обязанности и инфраструктуру (положение о том, кто выполняет работу, когда и в какой последовательности);
5. Определение терминов, ссылок и источников информации (разработку общих стандартов для сбора данных и для обобщения сопоставимых результатов);
6. План выборочного учета (включает в себя интенсивность выборки, план и конфигурацию пробных площадей в соответствии с целями мониторинга);

7. Измеряемые или наблюдаемые показатели (стандарты, определения и кодировки);
8. Методику полевых работ (порядок привязки, оформления и обеспечения сохранности пробных площадей, методику измерений, последовательность записи данных и заполнения полевых форм и очередность закладки и повторных измерений на пробных площадях);
9. Порядок подготовки и анализа данных (как использовать данные для выполнения поставленных целей, выполнять статистическую обработку и оформлять отчетность);
10. Финансовые потребности и источники финансирования закладки и повторных измерений на пробных площадях;
11. Утверждение составленного плана (экземпляр утвержденного плана направляется в координирующую организацию).

Национальные и международные организации должны иметь сведения о необходимой финансовой и юридической поддержке лесного мониторинга. Перечень некоторых контактных агентств имеется в Руководстве по грантам и стипендиям Лесной Службы США.

В нашей стране работы по лесному мониторингу всех уровней, дистанционному зондированию и его наземной идентификации часто нескоординированы между собой. Применение различных методов и подходов дает несопоставимые результаты. Для одних территорий информация отсутствует, для других — дублируется. В настоящее время в лесном хозяйстве России осознана необходимость интеграции собираемой информации об изменениях состояния лесного фонда в единую информационно-поисковую систему на основе компьютерной информационно-технологии. Концепция информатизации лесного хозяйства разработана в 1990 г. ВНИИЦлесресурсом (Концепция..., 1990). Для реализации единой научно-технической политики в области мониторинга лесов России постановлением коллегии Федеральной Службы лесного хозяйства России от 21 октября 1993 г. № 10 утверждены "Основные положения лесного мониторинга в России", направленные на объединение различных видов наблюдений в единую систему лесного мониторинга на локальном, региональном и федеральном уровнях. Предложена система лесного мониторинга для регистрации текущих изменений в состоянии лесного фонда России. При

осуществлении комплексного экологического мониторинга лесов и непрерывного лесоустройства как его составной части (Сухих, 1995) необходима база лесоустроительных данных и соответствующая нормативная основа, в частности таблицы хода роста фитомассы древостоев или эскизы таблиц биопродуктивности.

1.3. ГЛОБАЛЬНЫЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОГРАММЫ

В настоящее время международным научным сообществом активно исследуются вероятность климатических изменений и их экологические последствия. Одна из ключевых программ — Международная геосферно-биосферная программа IGBP (International Geosphere-Biosphere Programme) Международного совета научных союзов. Ее разработка предполагает ответить на следующие вопросы (Krauchi, 1993).

1. Как регулируется химический состав атмосферы и какова роль биологических процессов в продуцировании и потреблении рассеянных газов?

2. Как влияют и реагируют на изменения климата биогеохимические процессы мирового океана?

3. Как влияет изменение в землепользовании на биологические ресурсы прибрежной зоны и как повлияет изменение уровня моря на прибрежные экосистемы?

4. Как взаимодействует растительность с физическими процессами гидрологического цикла?

5. Как влияют глобальные климатические изменения на наземные экосистемы?

6. Какие существенные климатические и экологические изменения имели место в прошлом и каковы их причины?

7. Как интегрировать и синтезировать наши знания о компонентах биосферы на количественной основе в целях обеспечения возможности прогнозирования?

Для решения обозначенных проблем начата разработка нескольких исследовательских программ. Среди них можно отметить две: Международный проект глобального химического состава атмосферы IGAC (International Global Atmospheric Chemistry Project) и проект “Глобальные изменения и наземные экосистемы” GCTE (Global Change and Terrestrial Ecosystems Project). Цель

первой — познать процессы, регулирующие биогеохимические взаимодействия между наземными и морскими компонентами биосферы и атмосферы, и их роль в изменении климата. Вторая предполагает исследования в трех направлениях: изменения в физиологии экосистем, структуре экосистем и влияние глобальных изменений на сельское и лесное хозяйство.

Для получения научной информации, связанной с различными последствиями климатических изменений, и для разработки реалистичных стратегий управления климатическими изменениями Международной метеорологической организацией и ЮНЕП в 1988 г. организована Межправительственная комиссия по изменению климата IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). Первый отчет IPCC (1990 г.), подготовленный 170 учеными всего мира, был попыткой оценить все многообразие последствий увеличения концентрации парниковых газов в атмосфере. Следующий отчет IPCC (Houghton et al., 1992) включает в себя обширный круг вопросов: анализ источников эмиссии и связывания парниковых газов, оценку воздействия на климат возрастающей солнечной радиации, обзор различных сценариев эмиссии CO_2 , моделирование и прогнозирование климатических изменений, проверку моделей и др.

Главная цель Программы исследований мирового климата WCRP (World Climate Research Programme) — определить, в какой мере предсказуемы краткосрочные климатические отклонения, и создать научную основу прогнозирования реакции планетарного климата на антропогенные воздействия. Программа поддерживается Международной метеорологической организацией и Международным советом научных союзов.

Глобальная программа BIOME (BIOSpheric Mitigation and Evaluation — Биосферная компенсация и оценка) осуществлялась Агентством по защите окружающей среды (США, Корваллис, шт. Орегон) в течение 1992—1997 гг. и включала в себя оценку вариантов наземного биосферного контроля в целях снижения уровня атмосферного накопления парниковых газов; пригодности вариантов ведения лесного и сельского хозяйства; технологий переработки фитомассы на топливо для планетарного применения.

Цель программы BIOME — оценить, в какой мере лесные и агроэкосистемы могут быть приспособлены к связыванию атмосферного углерода и его консервации в лесной фитомассе, а так-

же в какой степени ископаемые источники топлива могут быть заменены фитомассой в целях снижения уровня накопления в атмосфере парниковых газов. Иными словами, глобальная программа BIOME должна ответить на принципиальный вопрос: можно ли повышение концентрации атмосферного CO_2 эффективно снизить или приостановить путем связывания его лесными и агроэкосистемами и путем замены ископаемого топлива фитомассой? (Global BIOME Program, 1991).

В целях сокращения эмиссии CO_2 вследствие сжигания ископаемого топлива как наиболее значительного антропогенного фактора исследуется потенциальная возможность замены некоторой его части энергией фитомассы. Использование фитомассы способствует также более интенсивному созданию лесных культур и агроэкосистем, которые будут усваивать и связывать CO_2 . Утилизация фитомассы — потенциально важнейшая часть программы BIOME, поскольку приемы ведения лесного и сельского хозяйства имеют ограниченные возможности и накопленный наземный углерод в конце концов окажется в составе CO_2 в атмосфере. Проблема заключается в том, чтобы свести к минимуму бесполезное сжигание и разложение фитомассы и путем переработки ее в спирты подготовить экологически безопасный заменитель ископаемого топлива. Тем самым поток CO_2 в атмосферу, имеющий место при бесполезном сжигании и разложении углеродсодержащей фитомассы, предварительно пропускается через двигатели внутреннего сгорания, котельные и т. д., а уровень снижения CO_2 в атмосфере в этом случае будет определяться количеством сэкономленного ископаемого топлива.

Для реализации программы BIOME проводился сбор данных по 12 ключевым странам, располагающим наиболее значительными лесными ресурсами. Эти страны представляют все континенты планеты в зонах бореальных, умеренных и тропических лесов (бореальная зона представлена двумя странами — Россией и Канадой). По ключевым странам и биомам рассчитываются балансы углерода, включая биогенные и антропогенные компоненты, и моделируются потоки его связывания и эмиссии для оценки вклада каждой страны (положительного или отрицательного) в общий углеродный баланс и выяснения договорных позиций по климатической конвенции (Winjum et al., 1993).

Программа исследований бореальных экосистем и атмосферы BOREAS (Boreal Ecosystem — Atmosphere Study) представляет

собой совместное исследование США и Канады, посвященное взаимодействиям между биомом бореальных лесов и атмосферой и выяснению роли этих взаимодействующих компонентов в глобальных изменениях.

Советом по исследованиям природной среды Соединенного Королевства в 1991 г. начата программа “Наземная инициатива по глобальному исследованию окружающей среды” TIGER (Terrestrial Initiative in Global Environmental Research), имеющая четыре основных раздела: наземный углеродный цикл, рассеянные парниковые газы, глобальные водный и энергетический балансы и воздействие климатических изменений на экосистемы. Эта программа связана с программой IGBP. Аналогичный проект — Национальная исследовательская программа “Изменение климата и природные катастрофы” (NFP 31), которая начата в 1992 г. в Швейцарии.

Важным источником информации является Аналитический информационный центр по двуокиси углерода CDIAC (Carbon Dioxide Information Analysis Center), расположенный в Отделе по изучению окружающей среды Национальной лаборатории Оак Ридж и обеспечивающий информационную поддержку международным исследованиям экологических последствий увеличения атмосферного CO_2 , включая потенциальное изменение климата. CDIAC основан в 1982 г. Департаментом по энергии США для поддержки Исследовательской программы по двуокиси углерода CDRP (Carbon Dioxide Research Program). Цель программы CDRP — обеспечивать научную информацию для формирования политики и правительственных мероприятий по поводу изменений концентрации атмосферного CO_2 . Перечислим основные направления программы CDRP:

- выяснение процессов, контролирующих глобальный углеродный цикл и обеспечивающих прогнозирование изменений концентрации атмосферного CO_2 в будущем;
- обеспечение информацией и моделированием процессов, благодаря которым изменения радиационного баланса Земли могут повлиять на климат, и предсказание темпов этих изменений;
- предоставление информации и моделей, необходимых для определения и предсказания совмещенного воздействия климата и CO_2 на растения, культуры и экосистемы.

Программа по оценке биологических ресурсов лесов бывшего СССР и их вклада в углеродный баланс финансируется Международным сообществом и разрабатывается в Международном институте прикладного системного анализа (IIASA) в Австрии. При этом не только оценивается влияние наземной биоты на углеродный баланс по всей территории бывшего СССР по состоянию на начало 90-х годов, но и разработан сценарий возможно-го повышения количества связываемого углерода путем рационализации ведения лесного и сельского хозяйства в течение следующего столетия (Shvidenko et al., 1994). Реализация программы дает на сегодня наиболее детальные и систематизированные данные по запасам, отпаду и продуктивности фитомассы и ее вкладу в углеродный баланс лесных экосистем бывшего СССР.

Успешно завершен первый этап совместного российско-японского проекта “Накопление углерода и углеродный баланс в лесных экосистемах”, разрабатываемого Исследовательским институтом лесоводства и лесных продуктов в Саппоро и Якутским институтом биологии РАН в целях выяснения роли сибирской тайги в изменении глобального углеродного баланса, а также влияния глобального потепления на лесные экосистемы в зоне вечной мерзлоты (Takahashi, 1994).

В рамках проекта “Изучение лесных экосистем” ГНТП-18 “Глобальные изменения природной среды и климата” проводятся исследования по оценке депонирования углерода в фитомассе лесных экосистем России в Центре по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН в Москве (Исаев и др., 1993). Для оценки биологических и оперативных возможностей создания и управления углерододепонирующими насаждениями в России, выступающими в роли стока атмосферного углерода, разрабатывается совместный российско-американский проект RUSAFOR-SAP на базе Саратовского управления лесами Федеральной службы лесного хозяйства России.

Характерная черта всех проводимых исследований — отсутствие единой, достаточно достоверной и детальной базы данных о фитомассе и ее продуктивности как для мировых лесов, так и для лесов России, а также отсутствие единого, научно обоснованного методического подхода к проблеме, в результате чего оценки ежегодно связываемого лесной растительностью углерода разнятся на порядок и более: на планетарном уровне от 1 (Kräuchi, 1993) до 10 Гт (Global..., 1991), а для лесов России и

Электронный архив УГЛТУ

бывшего СССР — от 212 (Исаев и др., 1993) до 900 (Shvidenko et al., 1994) и даже 4360 млн т (Kolchugina, Vinson, 1993a). При таком разбросе данных возможность какого-либо прогнозирования экологической ситуации представляется сомнительной.

* * *

Поскольку лесной покров играет определяющую роль в формировании газового состава атмосферы, отправным этапом реализации глобальных экологических программ является создание баз данных о всей органической массе лесов и ее круговороте. Сегодня технология лесоустройства в нашей и большинстве западных стран не учитывает потребности мониторинга лесов и не соответствует решению актуальных экологических проблем различного уровня. Создаваемые банки и базы лесоустроительных данных дают количественную информацию только о запасах стволовой древесины и иногда — описательную информацию о нижних ярусах растительности. Базы данных о всей фитомассе лесов необходимы не только при разработке систем экологического мониторинга и глобальных программ, но и при решении других проблем — разработке ресурсосберегающих стратегий в лесопользовании, создании автоматизированных систем обработки данных дистанционного зондирования лесов, разработке и реализации математических моделей лесных пожаров, прогнозировании вспышек популяций энтомовредителей и т. д.

ГЛАВА 2

ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМ СВЯЗАННЫХ РЕГРЕССИОННЫХ УРАВНЕНИЙ ПРИ ОЦЕНКЕ ФИТОМАССЫ ЛЕСОВ

Лес представляет собой сложную биологическую динамичную систему, и исследование его структуры и динамики осуществляется на основе системного подхода, в том числе его простейшей математической реализации — регрессионного моделирования. При выборе общей стратегии моделирования до сих пор ведутся дискуссии о том, что лучше: упрощать или усложнять модели? При вполне разумном требовании наиболее экономичного описания природных явлений количественными методами разрабатываются и подходы к описанию динамики лесных экосистем на основе сложных моделей, особенно если последние дополняются некоторыми исходными интерпретируемыми взаимосвязями (Drew, Flewelling, 1977). Прикладная сторона проблемы по существу сводится к согласованию уровня требуемой точности и соответствующей сложности модели с возможностями их реализации на практике.

Применительно к лесной экосистеме регрессионная модель представляет собой результат статистического оценивания параметров системы математических выражений, которые характеризуют некоторую биологическую концепцию о взаимосвязи явлений. Многомерная регрессионная модель предполагает вычленение основных определяющих факторов воздействия и количественную оценку их совокупного эффекта в виде результирующих показателей, или характеристик. При исследовании сложных систем изолированные оценки редко дают адекватные результаты. Обычно динамика лесных экосистем может быть более или менее эффективно описана с помощью не одной, а нескольких характеристик, которые частично или полностью взаимозависимы. Раздельное описание подобных зависимостей регрессионными уравнениями приводит к тому, что полученные оценки характеристик не будут сбалансированными. Математи-

ческие зависимости, объединенные в единую логически непротиворечивую концепцию, образуют систему связанных уравнений, основным достоинством которой является внутренняя согласованность описываемых закономерностей. История развития этих систем восходит к началу текущего столетия, когда в ходе экономического анализа рыночных равновесий и разработки экономической теории рынка предполагалось, что рыночное равновесие в данный период обуславливается равновесием рынка в предшествующий период (Moore, 1917; Ezekiel, 1938; Harlow, 1962; Waugh, 1964; Ehrlich, 1969; Halvorsen, 1975).

В контексте выбора упомянутого компромисса между простотой и сложностью моделей в прикладном аспекте возникает вопрос, насколько оправданно обеспечение согласованности уравнений путем дополнительных модельных построений и компьютерных затрат в сравнении с отдельным и независимым описанием зависимостей и не усугубляется ли этим сложность проблемы вместо реального ее решения? (Wagen, 1971). Имея в виду возможность таких возражений, Дж. Клаттер (Clutter, 1963) обращается к истории развития научной мысли, по его мнению, свидетельствующей, что научный прогресс обеспечивается развитием только логически обоснованных и основополагающих взаимосвязей или моделей. Он строит предположение, какого успеха мог достичь Исаак Ньютон, если бы стал решать проблему знаменитого агрессивного яблока путем простой подгонки несвязанных регрессионных уравнений с целью предсказать: а) скорость яблока в процессе падения и б) время, необходимое для его падения с заданной высоты. Без сомнения, результирующая прогностическая способность таких уравнений была бы впечатляющей и Ньютону не пришлось бы прибегать к использованию сложного аппарата дифференциальных уравнений. Однако система полученных несвязанных уравнений, очевидно, не имела бы такого безграничного успеха, какой приобрел открытый им закон.

2.1. ОБЩИЕ ПОНЯТИЯ

2.1.1. СТРУКТУРНЫЕ ФОРМЫ СИСТЕМ СВЯЗАННЫХ УРАВНЕНИЙ

Как уже упоминалось, теория систем связанных уравнений зародилась и получила основное развитие в экономике и основа-

тельно изложена в эконометрической литературе (Moore, 1917; Ezekiel, 1938; Haavelmo, 1943; Anderson, Rubin, 1949; Klein, 1962; Harlow, 1962; Johnston, 1963; Waugh, 1964; Goldberger, 1964; Ehrich, 1969; Dutta, 1975; Маленко, 1975, 1976; Четыркин, 1977; Förster, Rönz, 1979; Pindyck, Rubinfeld, 1981; Четыркин, Калихман, 1982; Fomby et al., 1984; Айвазян и др., 1985; Rönz, Förster, 1992).

Существуют несколько классификаций систем связанных уравнений. Согласно одной из них (Pindyck, Rubinfeld, 1981), системы связанных уравнений делятся на три категории:

- 1) псевдонесвязанные (seemingly unrelated);
- 2) рекурсивные (recursive);
- 3) одновременные (simultaneous).

Типичная система **псевдонесвязанных** уравнений имеет вид

$$\left. \begin{aligned} Y_1 &= b_{10} + b_{11}X_1 + b_{12}X_2 + e_1; & e_1 &\sim N(0, \sigma_1^2), \\ Y_2 &= b_{20} + b_{21}X_3 + b_{22}X_4 + e_2; & e_2 &\sim N(0, \sigma_2^2), \\ Y_3 &= b_{30} + b_{31}X_5 + b_{32}X_6 + e_3; & e_3 &\sim N(0, \sigma_3^2). \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Первый индекс при параметре указывает номер уравнения системы, в которое он входит, а второй индекс соответствует переменной, к которой он относится. Очевидно, что между уравнениями отсутствуют аналитические взаимосвязи. Если $\text{cov}(e_i, e_j) = 0$ для всех пар i и j , тогда никаких взаимосвязей нет. Однако, если одни составляющие ошибки коррелированы с другими [т. е. некоторая $\text{cov}(e_i, e_j) \neq 0$], тогда уравнения связаны (Borders, 1989). При наличии таких межрегрессионных корреляций оценка параметров возможна по трехшаговой процедуре подгонки, разработанной А. Цельнером (Zellner, 1962) (метод псевдонесвязанных регрессий) и проанализированной Д. Ридом (Reed, 1987).

Альтернативной является система линейных **одновременных** уравнений вида

$$\left. \begin{aligned} Y_1 &= b_{10} + b_{12}Y_2 + b_{13}Y_3 + b_{14}X_1 + b_{15}X_2 + e_1, \\ Y_2 &= b_{20} + b_{21}Y_1 + b_{23}Y_3 + b_{24}X_1 + b_{25}X_2 + e_2, \\ Y_3 &= b_{30} + b_{31}Y_1 + b_{32}Y_2 + b_{34}X_1 + b_{35}X_2 + e_3. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Эти системы называются также одновременно взаимозависимыми (Amateis et al., 1984), или взаимозависимыми (Четыркин,

1977). В системе (2) через Y_i ($i = 1, 2, 3$ и т. д.) обозначены те переменные, которые должны быть объяснены с помощью модели, представленной системой уравнений. Причинно обусловленные соотношения между переменными в уравнениях более не являются односторонними, как это имело место в изолированном регрессионном уравнении. Односторонней причинной связью характеризуются лишь переменные X_j ($j = 1, 2$), которые объясняют переменные Y_i , но сами не объясняются ими. Очевиден одновременный характер модели (2): зависимая переменная одного уравнения выступает как объясняющая (независимая) переменная в других уравнениях или объясняющие переменные в одном или нескольких уравнениях включены в другое уравнение системы как подлежащие объяснению, т. е. как независимые. Отдельные уравнения модели не могут более рассматриваться изолированно друг от друга. К ним должны быть применены и особые приемы оценивания. В силу сказанного, обычно принятое в регрессионном анализе разделение переменных на зависимую и объясняющие теряет смысл (Ферстер, Ренц, 1983).

Применительно к системе связанных уравнений переменные Y_i левой части уравнений называются **эндогенными** (т. е. внутрисистемными), поскольку они определяются внутри системы уравнений. Переменные правой части уравнений называются **предопределенными** и могут представлять собой либо эндогенные переменные Y_i , величина которых определена предшествующим уравнением, либо **экзогенные** (т. е. внесистемные) переменные X_j , величина которых определяется совершенно независимо от системы уравнений (Borders, 1989). Эндогенные переменные Y_i , которые объясняются моделью (2), называются также **совместно зависимыми** переменными. Они совместно зависимы потому, что между ними существуют многосторонние связи и определяются не одним уравнением, а одновременными уравнениями модели.

Система (2) охватывает те переменные, которые оказывают существенное влияние на совместно зависимые переменные, а возмущающие переменные e_i ($i = 1, 2, 3$ и т. д.) имеют случайный характер. Она содержит столько уравнений, сколько в ней имеется совместно зависимых переменных, так что каждая совместно зависимая переменная может быть объяснена с помощью соответствующего уравнения. Система (2) имеет однозначное решение относительно совместно зависимых переменных.

Для описания функционирования системы уравнений (2) обычно вводят априорные внутри- и межрегрессионные ограничения на параметры. Это прежде всего так называемые нулевые ограничения, вызванные тем, что некоторые переменные не входят в определенные уравнения системы. Кроме того, на параметры модели накладываются общие линейные ограничения. Исключая некоторые переменные, можно добиться необходимой спецификации модели, так как в противном случае нельзя получить оценку модели и достичь ее адекватности изучаемому явлению (Ферстер, Ренц, 1983).

Форма, в которой записаны модели (1), (2) и (3), называется **структурной** формой модели, которая создается в процессе формирования (спецификации) самой модели при стремлении отразить причинно-следственный механизм, существующий в реальности. Она позволяет проследить влияние изменений в экзогенных переменных модели на значения эндогенных переменных. Параметры уравнений модели в данной форме получили название **структурных** коэффициентов, общее их число равно или меньше $i(i - 1 + j)$ (Четыркин, 1977).

Структурная форма — это предполагаемая исследователем модель, основанная на априорных теоретических взаимосвязях, от которых предположительно происходят эмпирические данные. Таким образом, структурная форма — прообраз истинных основополагающих взаимосвязей, а не просто набор эмпирических регрессионных моделей. Априорные взаимосвязи, на которых основывается структурная форма, будут предписывать, что некоторые эндогенные и predetermined переменные из некоторых уравнений необходимо удалить и что некоторые переменные будут иметь одни и те же значения параметров. Необходимо отметить, что данные, используемые для оценки параметров, должны быть распределены независимо и идентично. Однако ошибки для различных уравнений системы могут показывать одномоментные межрегрессионные корреляции (т. е. уравнения могут быть коррелированы в данный момент времени) (Borders, Bailey, 1986).

Одновременный набор регрессионных уравнений, рассчитанных по одному в логически последовательном порядке, называется **рекурсивной системой**, и многие исследователи рассматривают ее как частный случай одновременной системы (Маленко, 1975, 1976; Ферстер, Ренц, 1983; Amateis et al., 1984). Рекурсивная

система, ее называют еще рекуррентной (Усольцев, 1985 а, б, 1988), учитывает последовательные взаимосвязи уравнений

$$\left. \begin{array}{l} Y_1 = b_{10} + \dots + b_{13}X_1 + b_{14}X_2 + e_1, \\ \downarrow \\ Y_2 = b_{20} + b_{21}Y_1 + \dots + b_{23}X_1 + b_{24}X_2 + e_2, \\ \downarrow \\ Y_3 = b_{30} + b_{31}Y_1 + b_{32}Y_2 + b_{33}X_1 + b_{34}X_2 + e_3. \end{array} \right\} (3)$$

В первое структурное уравнение рекурсивной системы включена обычно только одна эндогенная переменная, а в последующих уравнениях каждый раз добавляются другие эндогенные переменные. Так, в (3) в первом уравнении содержится только Y_1 , во втором уравнении к Y_1 добавляется другая эндогенная переменная Y_2 , в третьем уравнении — Y_3 и т. д. Таким расположением переменных добиваются в каждом структурном уравнении только односторонне направленных зависимостей между переменными. Так, в (3) Y_2 зависит от Y_1 , но Y_2 не оказывает влияния на Y_1 , так как переменная Y_2 не включена в первое уравнение. Хотя в модели содержится несколько эндогенных переменных, они не являются взаимозависимыми, а образуют одну причинную цепь (Ферстер, Ренц, 1983).

Общее условие, которому должна отвечать по определению рекурсивная система, — матрица преобразования Якоби должна быть треугольной и ее определитель, известный как определитель преобразования Якоби, должен равняться единице. Кроме обозначения элементов, эта матрица идентична матрице коэффициентов эндогенных переменных в системе, когда переменные входят в уравнение в линейном виде. Таким образом, общее условие выполняется, когда коэффициенты эндогенных переменных в системе образуют треугольную матрицу (Harlow, 1962).

Чтобы обычный метод наименьших квадратов (ОМНК) давал несмещенные, устойчивые и эффективные оценки параметров, есть следующие стандартные допущения относительно случайных возмущений:

- 1) возмущениями являются нормально распределенные случайные переменные с нулевым средним и постоянной дисперсией;

- 2) возмущения распределены независимо от объясняющих переменных;
- 3) в уравнении отсутствует сериальная корреляция между последовательными возмущениями.

Возмущения в рекурсивной системе могут быть гарантированно распределены независимо от объясняющих переменных, если только возмущения каждого структурного уравнения в системе не коррелируют с возмущениями любого другого уравнения в этой же системе. Это означает, что дисперсионно-ковариационная матрица содержит по диагонали только ненулевые элементы, т. е. все ковариации равны нулю. При допущениях 1) и 3) и при наличии нулевых ковариаций в ОМНК-подходе к оценке параметров могут быть использованы скорее экспериментальные, чем теоретические значения эндогенных переменных (Harlow, 1962).

Таким образом, для получения оценок параметров рекурсивной регрессионной системы может быть применен ОМНК, если нет межрегрессионной корреляции между компонентами ошибок разных уравнений системы. Если точно следовать определению рекурсивной системы, то она не связана с проблемой корреляции между эндогенными переменными правой части уравнений и компонентами ошибки эндогенных переменных левой части. Однако это предположение основывается на факте, что ошибки уравнений системы попарно не коррелированы. Когда такие корреляции имеют место, то утверждение, что эндогенные переменные правой части не коррелированы с компонентами ошибки эндогенных переменных левой части, не соответствует действительности. Таким образом, если система рекурсивного типа обнаруживает межрегрессионные корреляции, то она не является рекурсивной по определению, и с помощью метода ОМНК, модифицированного А. Цельнером (Zellner, 1962), нельзя получить устойчивых оценок ее параметров.

2.1.2. ПРОБЛЕМА ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ В ОДНОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМАХ

Рассмотрим проблемы, связанные с оценкой коэффициентов системы двух уравнений

$$\left. \begin{aligned} Y_1 &= b_{11}X_1 + b_{12}X_2, \\ Y_2 &= b_{21}Y_1 + b_{22}X_2. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Очевидно, что с оценкой коэффициентов первого уравнения системы (4) методом ОМНК проблем нет. Трудности возникают со вторым уравнением, в котором ожидаемое значение Y_1 становится "независимой" переменной. Проще всего было бы принять фактические значения Y_1 и применить ОМНК. Однако имеется, по крайней мере, интуитивное возражение против такого приема. Фактические значения будут в общем отличаться от ожидаемых, поэтому независимой переменной свойственна ошибка, которую она внесет в систему.

Первое уравнение системы (4) дает выход из этого затруднения. Имея ОМНК-оценки b_{11} и b_{12} , можно рассчитать ожидаемые значения Y_1 по соответствующим значениям X_j в надежде, что расчетные значения будут близки к ожидаемым. Затем можно подставить расчетные значения вместо ожидаемых значений Y_1 и для оценки коэффициентов второго уравнения применить второй шаг метода наименьших квадратов.

Альтернативным и равнозначным образом можно подставить правую часть первого уравнения вместо Y_1 во втором уравнении и переписать систему в виде

$$\left. \begin{aligned} Y_1 &= a_{11}X_1 + a_{12}X_2, \\ Y_2 &= a_{21}X_1 + a_{22}X_2, \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где

$$a_{11} = b_{11}, \quad (6)$$

$$a_{12} = b_{12}, \quad (7)$$

$$a_{21} = b_{21} \cdot a_{11}, \quad (8)$$

$$a_{22} = b_{21} \cdot a_{12} + b_{22}. \quad (9)$$

Уравнения (5) представляют **приведенную** форму системы, и коэффициенты a_{ij} можно рассчитать обычным методом наименьших квадратов. Затем по соотношениям (6)—(9) рассчитываются коэффициенты интересующих нас уравнений структурной формы (4) (Furnival, Wilson, 1971). Таким образом, коэффициенты уравнений приведенной формы модели представляют собой конгломерат коэффициентов структурной формы. Модель в приведенной форме построена как бы с учетом предпо-

сылки, что другие объясняющие переменные не изменяются, так как в этой модели каждая совместно зависимая переменная Y_i объясняется только предопределенными переменными (Ферстер, Ренц, 1983).

Описанные два метода оценки называются соответственно **двухшаговым методом наименьших квадратов (2МНК)**, предложенным Р. Басманом (Basman, 1957) и независимо от него Г. Тейлом (Theil, 1953), и **косвенным методом наименьших квадратов**. Для частной структурной формы (4) оба метода дают идентичные результаты и эффективны не менее, чем любой известный альтернативный метод. Оценки коэффициентов являются смещенными, но устойчивыми.

К сожалению, для других структурных форм расчет коэффициентов может быть более сложным, а в некоторых случаях — невозможным. С одной стороны, если мы заменим второе уравнение системы (4) выражением

$$Y_2 = b_{21}Y_1 + b_{22}X_1 + b_{23}X_2, \quad (10)$$

то применение 2МНК будет невозможно. Расчетные значения Y_i являются, конечно, линейной функцией X_1 и X_2 , и поэтому матрица сумм квадратов и произведений, образованная на втором шаге, будет особенной (вырожденной). Аналогичная тупиковая ситуация возникает при попытке оценить структурные коэффициенты уравнения (10) по коэффициентам уравнений приведенной формы. Тогда уравнения (8) и (9) заменяются выражениями

$$a_{21} = b_{21} \cdot a_{11} + b_{22}, \quad (11)$$

$$a_{22} = b_{21} \cdot a_{12} + b_{23} \quad (12)$$

и получаем систему двух уравнений (11) и (12) с тремя неизвестными b_{21} , b_{22} , b_{23} .

С другой стороны, если заменить второе уравнение системы (4) выражением

$$Y_2 = b_{21}Y_1, \quad (13)$$

то при попытке оценить коэффициенты через приведенную форму появляется еще одна проблема. В этом случае уравнения (8) и (9) заменяются выражениями

$$a_{21} = b_{21} \cdot a_{11}, \quad (14)$$

$$a_{22} = b_{21} \cdot a_{12} \quad (15)$$

и тогда очевидно, что коэффициент b_{21} имеет две оценки — одну по уравнению (14) и другую — по уравнению (15). Причина этого затруднения в том, что принятие выражения (13) в качестве действительного структурного уравнения налагает на коэффициенты системы ограничение

$$a_{21}/a_{22} = a_{11}/a_{12}, \quad (16)$$

которое при оценке косвенным методом наименьших квадратов игнорируется.

Казалось бы, ничто не мешает применить к оценке системы

$$\left. \begin{aligned} Y_1 &= b_{11}X_1 + b_{12}X_2, \\ Y_2 &= b_{21}Y_1 \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

метод 2МНК: очевидно, что в ее втором уравнении можно получить единственную оценку коэффициента b_{21} . Однако ограничение (16) применяется только на втором шаге процедуры оценки. Поэтому будет иметь место некоторая потеря эффективности модели.

Как отмечалось выше, эндогенные переменные могут находиться как в левой, так и в правой частях уравнения. Эндогенные переменные определяются системой, и поэтому являются стохастическими, так что может быть нарушено основное условие ОМНК. При использовании ОМНК предполагается, что переменные правой части уравнения не коррелированы с ошибками и обычно они считаются известными константами. Когда стохастические переменные появляются в правой части регрессионного уравнения в качестве предопределенных переменных, то их независимость от неизвестной составляющей стохастической ошибки исчезает. Можно показать, что вследствие этого оценки параметров по ОМНК становятся смещенными и неустойчивыми — явление, обычно называемое смещением метода наименьших квадратов.

Если процесс моделируется с использованием единичной регрессии, в которой одна или более независимых переменных являются стохастическими, нарушение выше названного предпо-

ложения может быть не опасным. Довольно часто величины этих стохастических переменных фиксируются на наблюдаемых уровнях и они применяются как истинно предопределенные переменные. Однако при работе с взаимозависимыми системами уравнений, в которых эндогенные переменные определяются системой, а потом используются в качестве предопределенных в других частях системы, нарушение этого предположения становится серьезным и может привести к ложным результатам.

В общем случае применение ОМНК к расчету уравнений системы (2) дает смещенные и неустойчивые оценки параметров вследствие явных корреляций между объясняющими переменными правой части уравнений и элементами ошибки эндогенной переменной левой части (Pindyck, Rubinfeld, 1981). Впервые смещенность оценок при применении ОМНК непосредственно к каждому уравнению одновременной (взаимозависимой) линейной системы обнаружил Т. Хаавелмо (Haavelmo, 1943).

При оценке параметров одновременных систем уравнений альтернативами ОМНК являются 2МНК и **трехшаговый метод наименьших квадратов**. Эти два альтернативных метода дают устойчивые, хотя необязательно несмещенные оценки параметров. Для применения 2МНК и трехшагового метода наименьших квадратов (3МНК) уравнения преобразуют к приведенной форме. Эти уравнения приведенной формы выражают каждую эндогенную переменную как функцию только экзогенных переменных в системе и выводятся с использованием стандартного метода алгебраической подстановки для решения i неизвестных в i уравнениях, где i неизвестных являются эндогенными переменными. Когда вся система уравнений одновременно взаимозависима (т. е. отсутствует блочная рекурсивность), приведенная форма уравнений будет выражать каждую эндогенную переменную как функцию всех экзогенных переменных в системе.

При 2МНК на первом шаге производится оценивание параметров уравнения приведенной формы с помощью ОМНК. Затем генерируются ряды прогнозируемых значений эндогенных переменных, входящих в правую часть структурных уравнений. На втором шаге эндогенные переменные, находящиеся в правой части структурных уравнений, заменяются их оценками (прогнозируемыми значениями), выступающими в качестве объясняющих переменных, и параметры структурного уравнения оцениваются с помощью ОМНК. По существу метод 2МНК заменяет эн-

догенные переменные правой части предсказанными значениями этих переменных, полученными расчетом каждой эндогенной переменной по всем предопределенным переменным системы уравнений в целом (Pindyck, Rubinfeld, 1981). Эти предсказанные эндогенные переменные правой части не коррелированы с компонентами ошибки эндогенных переменных левой части уравнений, и результирующие оценки параметров являются смещенными, но устойчивыми.

Трехшаговый метод наименьших квадратов является продвинутым на один шаг вариантом 2МНК с применением генерализованной (обобщенной) процедуры наименьших квадратов А. Цельнера (Zellner, 1962) (метод псевдонесвязанных регрессий) для учета межрегрессионных корреляций между компонентами ошибок разных уравнений. Дисперсионно-ковариационная взвешенная матрица, применяемая в обобщенной процедуре наименьших квадратов, выводится из остатков, полученных на втором шаге оценки по 2МНК. В случае, когда перекрестные ковариации равны нулю, 2МНК и 3МНК дают идентичные оценки; в остальных случаях 3МНК будет давать более эффективные оценки параметров. Большинство стандартных пакетов статистического анализа включает оценку по 3МНК, которая фактически не связана с дополнительными затратами и усилиями по сравнению с 2МНК-оценкой обсуждаемых здесь малых систем уравнений.

Для любого уравнения системы 2МНК учитывает все предопределенные переменные. Однако из эндогенных переменных учитываются лишь те, которые включены в данное уравнение. Как показали А. Цельнер и Х. Тейл (Zellner, Theil, 1962), 3МНК при оценке параметров учитывает все взаимозависимости системы в целом. Вследствие такого различия между 2МНК и 3МНК первый известен как метод ограниченной информативности, а второй — как метод полной информативности (т. е. используется вся имеющаяся информация). А. Цельнером и Х. Тейлом (Zellner, Theil, 1962) показано также, что результирующие оценки по 3МНК устойчивы, асимптотически нормально распределены и асимптотически эффективны, т. е. 3МНК дает устойчивые и эффективные оценки для выборок большого объема.

Коль скоро коэффициенты системы уравнений определены, полезно получить приведенную форму уравнений, выведенную аналитически. Аналитически выведенные уравнения приведен-

ной формы используют рассчитанные коэффициенты системы, чтобы выразить каждую эндогенную переменную как функцию только экзогенных переменных системы. Такая математическая манипуляция позволяет использовать уравнения для прогностических целей.

Детальное изложение продвинутых методов наименьших квадратов применительно к системам одновременных уравнений будет дано в разделе 2.3 на конкретных примерах из области лесоводственных исследований. Большое применение у экономистов и лесных биометристов нашли рекурсивные и одновременные (взаимозависимые) системы уравнений. В дальнейшем их применению в лесоводственных исследованиях уделено основное внимание.

2.1.3. ПРОБЛЕМА ИДЕНТИФИКАЦИИ СИСТЕМЫ ОДНОВРЕМЕННЫХ УРАВНЕНИЙ

Применение техники оценки одновременных уравнений требует, чтобы система была идентифицируемой. Идентифицируемость структурных уравнений означает, что путем линейной комбинации уравнений модели невозможно получить ни одного уравнения, которое бы противоречило модели и параметры которого отличались бы от параметров структурных уравнений, подлежащих проверке (Ферстер, Ренц, 1983). Проблема идентификации — это проблема получения единственных оценок параметров структурных уравнений, т. е. единственности соответствия между приведенной и структурной формами. Это подобно понятию определяемых функций в контексте общих линейных моделей. Идентифицируемость — основной момент при оценке параметров взаимозависимых систем линейных уравнений, этому вопросу посвящена обширная эконометрическая литература (Fisher, 1966; Rothenberg, 1971; Johnston, 1972; Dutta, 1975; Kelley, 1975; Brown, 1983). При отсутствии априорных ограничений по параметрам отдельных уравнений системы, т. е. когда каждое уравнение содержит полный набор X_j , приведенная форма имеет ij параметров; при этом структурная форма в свою очередь может содержать $i(i-1+j)$ параметров. Ясно, что $i(i-1+j)$ оценок параметров структурной формы невозможно получить единственным образом на основе ij параметров приведенной формы. Положение исправляется тем, что принимаются некоторые ог-

раничения на коэффициенты матриц структурной формы. Обычно многие из них равны 0 (если между переменными нет связи) или 1 (для тождеств). Модельеры априорно знают, что одни и те же регрессоры (объясняющие переменные) не будут входить в каждую модель и последовательно накладывают ограничения на параметры каждого уравнения системы. Это могут быть нулевые ограничения, когда некоторые переменные удаляются из некоторых уравнений путем приравнивания их параметров нулю. Ограничение может состоять в том, что некоторые параметры уравнения имеют заданное соотношение, так что они равны между собой, или могут быть ограничения между уравнениями (межрегрессионные), так что некоторые параметры в разных уравнениях системы имеют специфические априорные соотношения. Все эти ограничения — прямое следствие основополагающих теоретических взаимосвязей, так что окончательная форма структурной модели фактически является точным представлением основополагающих процессов и параметры оцениваются по данным, которые предположительно есть результат такой структуры (Borders, Bailey, 1986). Таким образом, проблема идентификации — это прежде всего проблема конструирования алгебраической формы модели. Формулировка полного решения проблемы довольно громоздка и приводится в обширной монографии Э. Маленво (1975, 1976).

Если априорных ограничений недостаточно для однозначного определения матриц структурной формы, то система **не идентифицируема**. Если указанные дополнительные ограничения накладывать нет необходимости, то система такой модели называется **точно идентифицируемой**. Наконец, если таких ограничений больше, чем это нужно для точной идентификации, то система **сверхидентифицируема**; обычно она применяется на практике (Четыркин, 1977).

Приведенные выше система (4), а также уравнения (10) и (13) представляют примеры соответственно точно идентифицируемого, не идентифицируемого и сверхидентифицируемого структурных уравнений. Таким образом, при идентификации системы возможны три случая.

1. Если система включает в себя лишь точно идентифицируемые уравнения, то параметры структурной модели определяются однозначно, методы 2МНК и косвенный дают одинаковые результаты и может быть применен любой из них.

2. Если в систему входит неидентифицируемое уравнение, то параметры структурной модели получить невозможно.
3. Если в систему входит сверхидентифицируемое уравнение, то параметры структурной модели оцениваются однозначно с помощью многошаговой регрессионной процедуры (2МНК дает устойчивые оценки, но имеются более эффективные методы, которые будут обсуждаться ниже).

Очевидно, необходимо иметь некоторые критерии идентифицируемости уравнений. Простое правило, хотя и не лишенное недостатков, может быть сформулировано следующим образом:

1. Если число неизвестных коэффициентов в уравнении больше числа эндогенных переменных в системе, то уравнение не идентифицируемо.
2. Если имеет место обратное соотношение, то уравнение сверхидентифицируемо.
3. Если число неизвестных коэффициентов равно числу экзогенных переменных, уравнение точно идентифицируемо (Furnival, Wilson, 1971).

В системе (4) и ее производных имеются две экзогенные переменные. Таким образом, уравнения системы (4) с двумя оцениваемыми коэффициентами точно идентифицируемы. Уравнение (10) с тремя коэффициентами — не идентифицируемо и уравнение (13) с одним коэффициентом — сверхидентифицируемо.

В общем случае идентификация одновременно взаимозависимой системы уравнений требует удовлетворения некоторым порядковым и ранговым условиям (критериям). Необходимым (но не достаточным) является порядковое условие идентифицируемости, которое обычно используется в практике моделирования (Четыркин, Калихман, 1982):

$$(i + j) - (i_k + j_k) \geq (i - 1), \quad (18)$$

где i — полное число уравнений, т. е. число эндогенных переменных; j — число экзогенных переменных всей системы; $(i_k + j_k)$ — число экзогенных и эндогенных переменных, присутствующих в k -м уравнении. Таким образом, число исключенных переменных не должно быть меньше числа уравнений системы без единицы. Достаточным условием идентификации уравнения является ранговое условие, которое гласит, что матрица коэффициентов переменных, исключенных из уравнения (эндогенных и экзоген-

ных), но имеющихся в других уравнениях системы, должна содержать, по крайней мере, один не обращающийся в нуль определитель с рангом, равным числу эндогенных переменных, действующих в качестве объясняющих переменных в рассматриваемом структурном уравнении (Amateis et al., 1984). Система идентифицируема, если идентифицируются все ее структурные уравнения. Проблема идентификации рекурсивных моделей не возникает, так как они всегда идентифицированы. Более детальное обсуждение порядковых и ранговых условий можно найти в монографии Г. Маддалы (Maddala, 1977).

Для сверхидентифицируемой системы применяется метод оценки по наименьшей обобщенной остаточной дисперсии. После модификации первого уравнения системы (4) и уравнения (13) в терминах фактических значений Y , уравнения имеют вид

$$\left. \begin{aligned} Y_1 - b_{11}X_1 - b_{12} &= e_1, \\ Y_2 - b_{21}Y_1 &= e_2, \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

где e_i — случайные возмущения. Затем минимизируется определитель дисперсионно-ковариационной матрицы возмущений. К сожалению, эти расчеты довольно сложны и включают решение системы нелинейных уравнений. Альтернативный метод оценки — 3МНК — обладает тем преимуществом, что нелинейные члены в уравнениях минимальной остаточной дисперсии являются выборочными дисперсиями и ковариациями возмущений. Можно просто подставить оценки этих дисперсий и ковариаций, выполненные методом 2МНК, в уравнения минимальной остаточной дисперсии. В итоге получаем легко решаемую линейную систему (Furnival, Wilson, 1971).

2.2. СОВМЕСТИМЫЕ СИСТЕМЫ УРАВНЕНИЙ РОСТА И ПРИРОСТА ДРЕВОСТОЕВ

Еще в недавнем прошлом основное внимание при изучении продуктивности лесов уделялось разработке функций запаса для полного цикла роста. Быстрое развитие лесной технологии в сочетании с длительным циклом лесовыращивания обуславливают потребность в динамической функции запаса, периодически сверяемой с практическими результатами. Это подразумевает

системное понятие контроля за лесным хозяйством путем использования короткого цикла обратной связи для управления долгосрочным процессом лесовыращивания (Moser, Hall, 1969).

Запас древостоя и его прирост часто рассматриваются в зависимости от качества местообитания, возраста и некоторой характеристики плотности древостоя, а также взаимодействий названных переменных. Плотность древостоя в свою очередь принимается как функция качества местообитания, возраста и характеристики начальной плотности. Качество местообитания, выраженное классом бонитета, зависит от динамики верхней высоты с возрастом древостоя (Clutter et al., 1983). Очевидно, что при моделировании роста и прироста древостоев имеют дело с взаимозависимой системой процессов, лежащих в основе прироста. Каждое уравнение в такой системе описывает определенную взаимосвязь с различным набором переменных системы, но все эти взаимосвязи предполагаются одновременными. Однако довольно часто еще взаимосвязности, характерные для динамики древостоев, при построении моделей игнорируются и при моделировании роста и прироста древостоев используется метод ОМНК для оценки параметров каждой модели системы отдельно от остальных.

2.2.1. КРАТКАЯ ПРЕДЫСТОРИЯ ПОЯВЛЕНИЯ СОВМЕСТИМЫХ МОДЕЛЕЙ ПРИРОСТА И РОСТА ДРЕВОСТОЕВ

Тенденции в развитии методов моделирования роста древостоев — от традиционных таблиц хода роста (ТХР) до многомерных регрессионных и имитационных моделей — практически одинаковые во всех странах. Можно рассмотреть одну из таких тенденций на примере сосны ладанной (США) как предысторию появления совместимых моделей роста и прироста древостоев.

Первые ТХР нормальных древостоев сосны ладанной, получившие широкое применение, были опубликованы Лесной службой США в 1929 г. Позднее (в 1942 г.) В. Мейером (Meuer, 1942) опубликованы такие же таблицы, но на основе другого экспериментального материала. Трудности с использованием ТХР нормальных древостоев возникли сразу же после их внедрения в практику. Эти трудности связаны с попытками использовать ТХР для проекции роста (т. е. прогнозирования изменения запаса в течение заданного возрастного интервала). Инструкцией по

применению ТХР предусматривалось редуцирование нормального запаса, приходящегося на конец возрастного интервала, по проценту, на величину которого полнота наличного древостоя отличалась от нормальной. Подобное статическое представление полноты многими лесоводами считалось несовершенным и были предприняты попытки прояснить ситуацию.

С. Геворкянц (Gevorkiantz, 1934) при исследовании перехода низкополнотных древостоев в нормальное состояние предложил использовать формулу Герхардта для оценки тенденции изменения полноты. Определенное наличие возрастного тренда полноты к нормальной показано Е. Симмонсом и Г. Шнуром (Simmons, Schnur, 1937) при анализе данных повторных переучетов древостоев сосны ладанной в Мэриленде. Анализ показал наличие тесных корреляций процента прироста площади сечений с возрастом и полнотой древостоев. С течением времени концепция нормальной полноты заменяется пониманием того, что полнота — динамичный показатель (Nelson, Bennett, 1965).

В 1939 г. А. Мак-Кинни и Л. Чейкен (MacKinney, Chaiken, 1939) обобщили методы составления ТХР нормальных древостоев и составили эмпирические ТХР для сосны ладанной. Таблицы составлены по данным пробных площадей в широком диапазоне полнот с использованием многофакторного регрессионного анализа вместо ранее применяемого графического метода. В качестве третьей переменной дополнительно к возрасту и классу бонитета была включена полнота древостоя. Позднее Ф. Шумахером и Т. Койлом (Schumacher, Coile, 1960) составлены ТХР сосны ладанной, основанные на уравнениях взаимосвязи различных показателей древостоя, таких как площадь сечений, число стволов и высота, с возрастом, классом бонитета и относительной полнотой. Однако почти все ТХР составлялись по данным временных пробных площадей.

Нарастающая тенденция использования компьютеров и статистических методов приводит к тому, что математическое выражение закономерностей роста древостоев становится более предпочтительным, чем табличное представление результатов в виде ТХР. К. Венгер с соавторами (Wenger et al., 1958) по данным повторных переучетов сосны ладанной с 5-летним интервалом вывели прогностические уравнения объемного прироста ликвидной древесины для прореженных древостоев.

Электронный архив УГЛТУ

$$PAG = 272,08 - 2,47 \cdot S - 5,72(RD) + 0,074(RD)S \quad (20)$$

и для непрореженных древостоев

$$PAG = -91,36 + 4908,0/A - 0,075 \cdot S - 51,79(RD)/A + 0,0289(RD)S, \quad (21)$$

где PAG — периодический (за 5 лет) годичный прирост деревьев с диаметром 4,6 дюйма и более, куб. футов на акр; A — исходный возраст древостоя, лет; S — класс бонитета, футы; RD — относительная полнота как функция площади сечений и среднего диаметра (Stahelin, 1949). Ни (20), ни (21) не объясняли общей изменчивости прироста выше 40 %.

Более точную оценку прироста давало уравнение, рассчитанное по обширным данным перечетов прореженных древостоев сосны ладанной с 10-летним интервалом (Nelson, 1960):

$$PAG = 205,0 + 2600,5/A - 8,1199 \cdot S - 0,03087(RD)^2 + 0,05824(RD)S + 0,05328 \cdot S^2, \quad (22)$$

которое объясняло 78 % общей изменчивости прироста. Е. Брендер (Brender, 1960) по данным повторных перечетов в 202 древостоях сосны ладанной в штате Джорджия рассчитал уравнение, объясняющее 65 % общей изменчивости прироста, в котором вместо относительной введена абсолютная полнота древостоя:

$$PAG = -20,748 + 6,64535 \cdot B - 0,02529 \cdot B^2 + 50260,6/(AS) - 235,034 \cdot B/S, \quad (23)$$

где PAG — периодический годичный прирост деревьев диаметром более 5,6 дюйма, футов³/акр; B — площадь сечений деревьев диаметром более 5,6 дюйма, кв. футов на акр.

Однако ни в одной из упомянутых работ (Wenger, 1958; Nelson, 1960; Brender, 1960) при анализе данных роста сосны ладанной на постоянных пробных площадях не сделано попытки связать модели, используемые для анализа роста, с ранее рассчитанными моделями запаса для этой породы. Дж. Клаттер (Clutter, 1963) полагал, что если для одних и тех же древостоев

модели запаса и изменения запаса не совместимы, то, по крайней мере, одна из них должна быть неадекватна или неточна и для обеспечения эффективности прогнозов одну или обе необходимо пересчитать. Иными словами, несовместимые модели запаса и изменения запасов нельзя считать совершенными.

Исходя из изложенного, Р. Бакман (Buckman, 1962) и Дж. Клаттер (Clutter, 1963) выдвинули и реализовали идею совместимости моделей роста и прироста, когда запас древостоя и его прирост (изменение запаса) находятся в дифференциально-интегральном соотношении. Совместимость моделей запаса и изменения запасов они понимали как возможность получения запасов путем суммирования предсказанных моделью изменений запаса за ряд последовательных возрастных периодов или когда алгебраическая форма модели запаса может быть выведена путем интегрирования модели изменения запасов.

2.2.2. СОВМЕСТИМЫЕ МОДЕЛИ НАЛИЧНОГО ЗАПАСА И ЕГО ПРИРОСТА В ОДНОВОЗРАСТНЫХ ДРЕВОСТОЯХ

Дж. Клаттер (Clutter, 1963) использовал для вывода совместимых моделей запаса и изменения запасов данные повторных перечетов с 5- и 10-летними интервалами 102 прореженных чистых одновозрастных древостоев сосны ладанной. Возраст древостоев — от 21 до 69 лет, класс бонитета — от 53 до 110 футов, площадь сечений к началу второго перечета — от 30 до 154 кв. футов на акр. При каждом перечете обмерялись все деревья с диаметром более 1 дюйма и у 10 деревьев — высота и возраст. Рассчитывались следующие показатели:

- 1) возраст, средний за период роста;
- 2) класс бонитета — по среднему возрасту и средней общей высоте с использованием бонитетной шкалы Т. Койла (Coile, 1952);
- 3) средняя за период роста площадь сечений;
- 4) средний за период роста запас без коры;
- 5) годичный прирост площади сечений на акре, полученный как разность между начальной и конечной площадями сечений, деленная на 5 (число лет периода роста);
- 6) годичный прирост запаса, куб. футов на акр, полученный как разность между начальным и конечным запасами, деленная на 5.

Использовались средние за период роста показатели возраста, площади сечений и запаса вместо обычно измеряемых показателей на начало периода роста в целях получения модели изменения запасов путем дифференцирования моделей запаса. Полученные таким способом модели изменения запасов пригодны для характеристики скорости роста в данном возрасте (мгновенная скорость роста), но неприемлемы (без некоторых манипуляций) для оценки средней за весь период скорости роста. Предполагалось, однако, что при небольшом периоде роста (5 лет) ошибки несущественны.

В 1939 г. Ф. Шумахер (Schumacher, 1939) предложил для нормальных древостоев сосны широкохвойной уравнение запаса V (куб. футов на акр) как функцию возраста A и класса бонитета S , измеряемого высотой древостоя (футов) в 50-летнем возрасте

$$\log V = 0,6381 - 32,9137/A + 0,004284S - 0,2406(S/A) \quad (24)$$

и дал его структуре биологическую оценку. Дж. Клаттер (Clutter, 1963), используя структуру уравнения (24), дополнил его третьей переменной — площадью сечений B (кв. футов на акр) и рассчитал для древостоев сосны ладанной уравнение

$$\ln V = 2,8076 + 0,015108S + 0,95931 \ln B - 21,863/A \quad (25)$$

с коэффициентом детерминации 0,993 и стандартной ошибкой в логарифмических единицах 0,00442.

Путем дифференцирования уравнения (25) по возрасту A получено выражение скорости изменения запаса древостоя

$$(dV/dA) = b_2 V/B (dB/dA) - b_3 V/A^2, \quad (26)$$

не пригодное, однако, для практического применения, поскольку включает в правую часть неизвестное значение скорости изменения площади сечений (dB/dA) .

Чтобы получить выражение (dB/dA) вначале подобрана форма уравнения зависимости площади сечений B от возраста, класса бонитета и площади сечений в возрасте 20 лет. После дифференцирования его по возрасту получена алгебраическая форма уравнения для (dB/dA) как функции возраста, класса бонитета и площади сечений, константы которого затем рассчитаны по фактическим данным обмеров деревьев на пробных площадях

методом множественного регрессионного анализа (ОМНК). Полученная модель

$$dB/dA = (B/A)(4,6012 + 0,013597S - \ln B) \quad (27)$$

объясняет 65,3 % изменчивости годовичного прироста площади сечений со стандартной ошибкой 0,77 кв. футов на акр в год.

После подстановки алгебраической формы правой части уравнения (27) вместо (dB/dA) в уравнение (26) получена алгебраическая форма уравнения для скорости изменения запаса, константы которого затем рассчитаны по фактическим данным объемов пробных площадей (за исключением запаса V). Получена модель

$$dV/dA = 5,7907(V^*/A^2) - 0,78166(V^*\ln B/A) + \\ + 3,6562V^*/A + 0,01741(V^*S/A), \quad (28)$$

где V^* — расчетные значения запаса, полученные по уравнению (25). Уравнение (28) объясняет 69,7 % изменчивости годовичного прироста запаса со стандартной ошибкой 40,96 куб. футов на акр в год.

Уравнения (27) и (28) дают возможность получить модели для проекции площади сечений и запаса на конец данного возрастного периода. Для этого они интерпретированы как дифференциальные уравнения и интегрированы по возрасту. Получены модели

$$\ln B = 4,6012 + 0,013597 \cdot S - \\ - (A_0/A)(4,6012 + 0,013597S - \ln B_0), \quad (29)$$

$$\ln V = \ln V_0 - 5,7907(1/A - 1/A_0) + (0,059626 - 0,006781 \cdot S) \times \\ \times (\ln A - \ln A_0) - A_0(3,5966 + 0,010628 \cdot S - 0,78166 \cdot \ln B_0) \times \\ \times (1/A - 1/A_0), \quad (30)$$

где A_0 и A — соответственно исходный возраст и возраст проекции; B_0 и B — соответственно исходная площадь сечений и ее проекция на конец возрастного периода; V_0 и V — соответственно исходный запас и его проекция на конец возрастного периода.

Используя уравнения (29) и (30), Дж. Клаттер показал возможность оценки общего запаса древостоя для любого сочетания начальной полноты, класса бонитета, длительности периода прогноза и режима рубок ухода.

Совместимые модели обладают рядом достоинств. Возможно, наиболее очевидное из них — логическая согласованность при анализе запаса древостоя и его изменения во времени. Второе их преимущество реализуется, когда имеющиеся модели запаса древостоев используются при построении моделей изменения запасов.

Дж. Клаттер (Clutter, 1963) полагал, что по мере накопления опыта работы с совместимыми моделями можно развить значительно более эффективные методы оценки запаса и его изменения, чем имеющиеся до того времени. Возможности таких методов особенно очевидны, когда запас и изменение запасов древостоев не рассматриваются как независимые явления, а анализируются в их математической взаимосвязи.

2.2.3. СОВМЕСТИМЫЕ МОДЕЛИ ЗАПАСА И ЕГО ПРИРОСТА В РАЗНОВОЗРАСТНЫХ ДРЕВОСТОЯХ

В ТХР и моделях динамики запаса древостоев и его прироста основным определяющим показателем обычно является возраст. Поэтому моделирование хода роста и прироста, а также оценка качества местообитания по показателю бонитета, зависящего от возраста, в разновозрастных древостоях всегда были проблематичными. Одна из попыток решить эту проблему принадлежит Дж. Мозеру и О. Холлу (Moser, Hall, 1969). Исходные данные получены на 49 акрах в разновозрастном древостое, состоящем из смеси хвойных, дуба и гикори в Висконсине.

Идеальны для вывода ростовых функций данные полных хронологических перечетов нескольких древостоев от закладки до рубки, называемые “реальным ростовым рядом” (Turnbull, 1963). Поскольку такой ряд требует на его получение длительного периода времени, обычно используются данные временных пробных площадей, охватывающие широкие диапазоны классов бонитета и возраста, называемые “абстрактным ростовым рядом”. Промежуточным вариантом являются данные постоянных пробных площадей по результатам перечетов через определенные промежутки времени, называемые “приблизженно реальным

ростовым рядом" (Moser, Hall, 1969). Поскольку в разновозрастных древостоях полный ростовой цикл четко не различим, Дж. Мозер и О. Холл провели повторные перечеты на постоянных пробных площадях и использовали полученные показатели площади сечений в качестве основы для построения моделей роста и прироста.

Известно, что скорость роста запаса разновозрастного древостоя связана с площадью сечений (Buell, 1945; Spurr, 1952; Bockman, 1962). Если скорость роста запаса удовлетворительно описывается площадью сечений и, кроме того, рассматривается как производная от кумулятивного роста запаса (т. е. суммы текущих приростов), то общий запас древостоя V можно выразить функцией

$$V = f(B), \quad (31)$$

где

$$B = f(B_0, t), \quad (32)$$

т. е. площадь сечений является функцией начальной площади сечений B_0 и времени. Путем подгонки по данным перечетов с использованием нелинейного метода наименьших квадратов получено аллометрическое уравнение

$$V = 15,651 \cdot B^{1,1424}, \quad (33)$$

где V — в куб. футах и B — в кв. футах; $R^2 = 0,82$; стандартная ошибка $SE = 67,4$.

Уравнение (33) описывает статическое состояние, поскольку связывает средний периодический запас и площадь сечений в данный момент времени. Поэтому было найдено выражение мгновенной скорости изменения запаса древостоя

$$dV/dt = (\partial f(B)/\partial B) dB/dt, \quad (34)$$

которая с учетом уравнения (33) может быть представлена как

$$dV/dt = (b_1 V/B) (dB/dt), \quad (35)$$

где согласно выше сказанному

$$dB/dt = f(B). \quad (36)$$

Экспериментальным путем Дж. Мозер и О. Холл установили, что зависимость (36) может быть описана известной функцией скорости роста Бергаланфи (Richards, 1959)

$$dB/dt = nB^m - kB, \quad (37)$$

после подгонки которого по экспериментальным данным получено

$$dB/dt = -0,46569 \cdot B^{1,0125} + 0,49818 \cdot B; R^2 = 0,89; SE = 0,1. \quad (38)$$

После подстановки уравнения (37) вместо dB/dt в уравнение (35) получено выражение

$$dV/dt = b_1 V [nB^{(m-1)} - k], \quad (39)$$

и после подгонки:

$$dV/dt = 1,3175V(-0,46569B^{0,0125} + 0,49818); \quad (40)$$

$$R^2 = 0,60; SE = 1,4,$$

где коэффициенты для dB/dt взяты из уравнения (38).

Функции запаса и площади сечений получены путем решения соответствующих уравнений их скорости роста. Общее решение для уравнения (40) имеет вид

$$V = b_0 [f(B_0, t)]^{b_1}, \quad (41)$$

где $f(B_0, t)$ соответствует выражению

$$B = [n/k - Ce^{-(1-m)kt}]^{1/(1-m)}, \quad (42)$$

которое является общим решением уравнения (37). Константа интегрирования C в уравнении (42) равна

$$n/k - B_0^{1-m}.$$

Параметр b_0 в уравнении (41) означает, что если $t = 0$, то запас и площадь сечений равны их текущим значениям V_0 и B_0 соответственно. Поэтому

$$b_0 = V_0 / (B_0^{b_1})$$

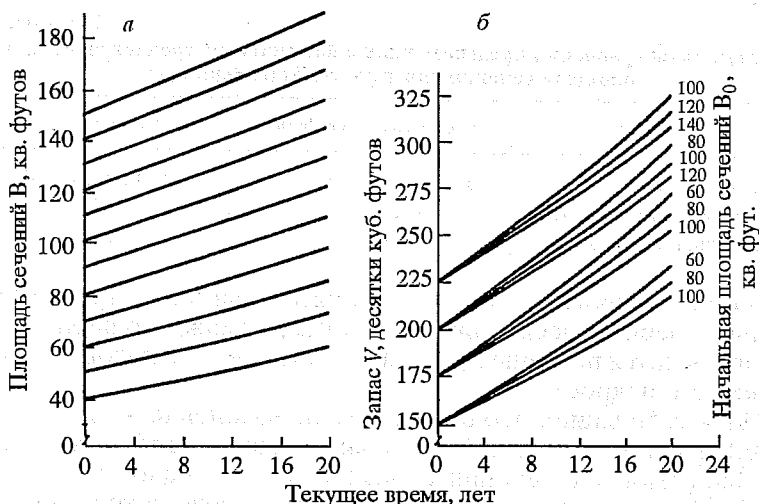


Рис. 5. Динамика площади сечений (а) и запаса стволов (б) разновозрастного смешанного древостоя в зависимости от текущего времени (Moser, Hall, 1969)

и запас древостоя как функции времени и начальных запаса и площади сечений описан уравнением

$$V = V_0 / (B_0^{b_1}) [n/k - (n/k - B_0^{1-m}) (e^{-(1-m)kt})]^{b_1 / (1-m)}. \quad (43)$$

После подстановки в (43) значений параметров из уравнений скорости роста запаса и площади сечений получено прогностическое уравнение запаса

$$V = V_0 / B_0^{1,3175} [0,9348 - (0,9348 - B_0^{-0,0125}) (e^{-0,0062t})]^{-105,4}. \quad (44)$$

Путем подстановки значений параметров из уравнения (38) в (42) получено прогностическое уравнение для площади сечений

$$B = [0,9348 - (0,9348 - B_0^{-0,0125}) (e^{-0,0062t})]^{-80}. \quad (45)$$

На рис. 5 а, б представлена динамика брутто-площади сечений и запаса древостоев за 20 лет текущего времени от данного исходного состояния. Чтобы получить нетто-периодический запас, необходимо сделать поправки на отпад и выросший подрост (ingrowth). Предполагая, что существует метод оценки таких ве-

Таблица 5

Результаты сравнения предсказанных и фактических средних значений площади сечений для двух 6-летних периодов

Показатель	Второй период (кв. футы)	Третий период (кв. футы)
Диапазон	от -1,10 до 0,51	от -1,55 до 0,74
Среднее значение разности	-0,15	-0,21
Стандартная ошибка	0,06	0,09

личин, нетто-прогноз может быть рассчитан как результат нескольких периодических прогнозов, где для каждого периода пересчитываются исходные показатели для учета вкладов отпада и выросшего подроста.

На рис. 5а видно, что в пределах диапазонов начальных площадей сечений и текущего времени можно ожидать повышения итоговой площади сечений с увеличением исходной ее величины. Аналогично на рис. 5б запас увеличивается по ходу текущего времени от начального состояния. Для полного диапазона прогностических функций это неверно, поскольку площадь сечений ограничена значением

$$\lim_{t \rightarrow \infty} B = (n/k)^{1/(1-m)}$$

и запас ограничен значением

$$\lim_{t \rightarrow \infty} V = b_0 (n/k)^{b_1/(1-m)}$$

Подстановка соответствующих числовых значений коэффициентов в этих выражениях дает "предельные значения", которые оказываются вне диапазона экспериментальных данных запасов и полнот древостоев.

Прогностическая модель проверена путем сравнения со стандартом, в качестве которого было отобрано 40 непрореженных площадей. С использованием показателя площади сечений на начало второго периода в качестве исходного состояния прогностировалась итоговая площадь сечений для второго и третьего периодов. Разности между фактическими и расчетными значениями приведены в табл. 5.

Точность прогнозов оценена расчетом значения “хи-квадрат” как отношения между расчетной и фактической дисперсиями (Freese, 1960). Требуемая точность определяется величиной расчетной дисперсии. С учетом того, что прогнозируемые значения находятся в диапазоне 10% от фактических, расчетные величины “хи-квадрат” составили для второго периода 11,0 и для третьего периода 20,2. Это означает, что для 12-летнего периода уравнение (45) обеспечивает необходимую точность прогноза средней площади сечений.

Однако основной вклад исследования Дж. Мозера и О. Холла (Moser, Hall, 1969) определяется не столько результирующими уравнениями, сколько методологией вывода зависимых от времени функций запаса путем интегрирования уравнений скорости роста, не включающих возраст древостоя в качестве независимой переменной.

2.2.4. СОВМЕСТИМЫЕ МОДЕЛИ ОБЩЕЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ И ЕЕ ПРИРОСТА В ОДНОВОЗРАСТНЫХ ДРЕВОСТОЯХ

Первые исследования продуктивности лесов касались главным образом оценки наличного запаса не тронутых рубками древостоев. Составленные в результате таких исследований ТХР нормальных древостоев давали оценки наличного (без учета отпада) запаса сомкнутых древостоев для различных сочетаний возраста и бонитета. Они не несли информации о фактическом приросте древесины и применялись в основном в экстенсивном хозяйстве (без рубок промежуточного пользования).

По мере интенсификации лесохозяйственного производства появлялась потребность оценить продуктивность хозяйственных лесов и сравнить ее потенциалы для различных пород и местобитаний. В этом контексте приобретал большое значение бруто-запас, или общая производительность древостоя (общий запас всей выросшей древесины, включая отпад). При наличии сбыта древесины, идущей в отпад, общая продуктивность древостоев существенно повышалась.

Тем не менее, когда стали обсуждаться фундаментальные биологические обусловленные взаимосвязи между ростом и приростом древостоев в виде дифференциально-интегральных соотношений, первые их реализации касались динамики наличного запаса древостоев, а не их общей производительности (Buckman,

1962; Clutter, 1963). Первые совместимые модели динамики общей производительности древостоев и ее прироста были предложены В. Дамсом (Dahms, 1964), который исследовал общую производительность сосны скрученной без использования данных постоянных пробных площадей. Для определения объемного прироста он брал данные анализа стволов за последние 10 лет у деревьев, оставшихся на момент перечета, и предполагал, что деревья, отмершие за этот период, имели незначительный прирост, которым можно пренебречь. Затем средний общий объемный прирост за период связывался с возрастом, бонитетом и полнотой древостоев, а результирующее уравнение интегрировалось для получения общей производительности древостоев.

Р. Куртис (Curtis, 1967) при исследовании динамики общей производительности и прироста древостоев пихты дугласовой рассматривал запас совокупности деревьев i -й ступени толщины в момент времени t , используя известное выражение

$$V_i = N_i F D_i^2 H_i, \quad (46)$$

где V_i — объем растущих деревьев в ступени толщины в момент времени t ; N_i — число растущих деревьев в момент времени t ; F — видовое число, принимаемое постоянным; D_i — средний диаметр на высоте груди в ступени толщины; H_i — средняя высота растущих деревьев в ступени толщины.

После дифференцирования выражения (46) по t была получена скорость изменения наличного запаса

$$dV_i/dt = N_i F D_i^2 (dH_i/dt) + 2N_i F D_i H_i (dD_i/dt) + F D_i^2 H_i (dN_i/dt). \quad (47)$$

В уравнении (47) $F D_i^2 H_i$ — объем среднего дерева ступени, $dN_i/dt \leq 0$ — скорость отпада, или изменение количества деревьев в единицу времени, а их произведение — запас отпавших деревьев ступени в единицу времени (отрицательная величина). При исключении этой величины из уравнения (47) получается выражение для скорости роста общей производительности, включая отпад

$$d(GV_i)/dt = N_i F D_i^2 (dH_i/dt) + 2N_i F D_i H_i (dD_i/dt). \quad (48)$$

Но это выражение можно получить дифференцированием исходной формулы запаса (46) при условии, что N_i — постоянная величина.

Таким образом, Р. Куртисом (Curtis, 1967) было показано, что различие между дифференциальными уравнениями для скорости роста общей производительности и скорости роста наличного запаса состоит лишь в том, что в первом случае N — постоянная величина, а во втором — переменная, входящая в уравнение как скорость отпада dN/dt . Следовательно, для **оценки общей производительности данные об отпаде не нужны.**

Уравнение (48) использовано Р. Куртисом (Curtis, 1967) для расчетного определения фактических значений прироста общей производительности не тронутых рубками, одновозрастных древостоев пихты дугласовой по 189 переучетам, выполненным на 80 постоянных пробных площадях, и по переучетам 19 временных пробных площадей в штатах Вашингтон и Орегон. В качестве исходных приняты уравнения для объема отдельного ствола v , куб. футов

$$v = 0,004009d^{1,8354}h^{0,9574}, \quad (49)$$

где d — диаметр ствола в коре, дюймов; h — высота дерева, футов, и, исходя из (49) — для запаса всех стволов в ступени толщины

$$V_i = 0,004009N_iD_i^{1,8354}H_i^{0,9574}. \quad (50)$$

Путем дифференцирования уравнения (50), принимая N постоянной величиной, получено уравнение текущего прироста общей производительности для ступени толщины древостоя

$$\begin{aligned} d(GV_i)/dt = N_i\{ & [0,007358D_i^{0,8354}H_i^{0,9574}(dD_i/dt)] + \\ & + [0,003838D_i^{1,8354}H_i^{-0,0426}(dH_i/dt)]\}. \end{aligned} \quad (51)$$

Значения N для каждой пробной площади известны, как и значения D_i и H_i для каждой ступени толщины. Фактические значения текущего прироста диаметра (включая кору) dD_i/dt и текущего прироста высоты dH_i/dt получены по данным анализа модельных деревьев как проекции текущих годовичных приростов предшествующего возрастного периода на основе подеревного расчета регрессий. После суммирования $d(GV_i)/dt$ по ступеням толщины получены для каждой пробной площади значения текущего прироста общей производительности дре-

востоев и выведена его зависимость от возраста на высоте груди A_{bh} , класса бонитета S (в футах) и относительной полноты RD

$$\log[d(GV)/dA = -0,2878 - 0,00511A_{bh} + 0,2240\log A_{bh} + \\ + 1,3743\log S - 0,2566(1/RD)]; R = 0,83; SE = 0,0911. \quad (52)$$

Общая производительность древостоя к возрасту A может быть получена интегрированием (52) в интервале от 0 до A . Однако при расчете уравнения (52) отсутствовали данные для древостоев моложе 20 лет. Поэтому формула общей производительности Y_{gv} была записана в виде

$$Y_{gv} = NV_{20} + \int_{20}^A (\text{функция прироста}) dA, \quad (53)$$

где NV_{20} — запас в возрасте 20 лет, рассчитанный по уравнению зависимости запаса от возраста, класса бонитета и относительной полноты.

Поскольку функция прироста, представленная уравнением (52) после антилогарифмирования, непосредственно не интегрируется, интеграл этой функции был дан Р. Куртисом в виде

$$\int_{20}^A (\text{функция прироста}) dA \approx \sum_{i=21}^{A-1} d(GV_i) + \frac{d(GV_{20}) + d(GV_A)}{2}. \quad (54)$$

В возрастном диапазоне от 20 до 100 лет при полноте 1,0 отношение расчетного наличного запаса к расчетной общей производительности составило в среднем 0,7.

Изложенная процедура не требует обязательного использования данных пересчетов на постоянных пробных площадях. Оценки $d(GV)/dt$ могут быть получены без постоянных пробных площадей и без данных об отпаде деревьев. В отличие от Р. Бакмана (Buckman, 1962) и Дж. Клаттера (Clutter, 1963), давших совместимые уравнения роста и прироста наличного запаса древостоя, Р. Куртис (Curtis, 1967) разработал совместимые уравнения для роста и прироста общей производительности. Основное нововведение Р. Куртиса — расчет текущего прироста общей производительности древостоя путем подстановки в уравнение,

представленное производной от уравнения объема ствола, оценок текущего прироста диаметра и высоты дерева, полученных по модельным деревьям на временных пробных площадях.

Похожий прием использовал И. Я. Лиена (1969, 1980), рассматривая текущий прирост по запасу как полный дифференциал запаса. Приняв в качестве исходных уравнение видовой высоты

$$HF = a + kH,$$

где H — средняя высота древостоя (м), и уравнение запаса наличного древостоя V (м³/га)

$$V = BHF,$$

где B — площадь сечений (м²/га), он получил выражение

$$V = kB(H + a/k).$$

Поскольку величина a/k для шести лесообразующих пород Прибалтики оказалась постоянной и равной 4, формула запаса имела конечный вид

$$V = kB(H + 4). \quad (55)$$

Полный дифференциал формулы запаса (55), или текущий прирост по запасу наличного древостоя dV , записан как

$$dV = k[(H + 4)dB + B \cdot dH], \quad (56)$$

где dH — дифференциал (или текущий прирост) средней высоты; dB — дифференциал (или текущий прирост) площади сечений; k — коэффициент полндревесности стволов, зависящий от древесной породы (Лиена, 1980), или с учетом прироста последнего года

$$dV = k\{(dB)[H - 2(dH) + 4] + (dH)B\}. \quad (57)$$

Поскольку величина dB в древостое обычно не измеряется, она была выражена как дифференциал площади сечений

$$dB = (N\pi D^2/4)' dD = \pi ND(dD)/4, \quad (58)$$

где dD — дифференциал (или текущий прирост) среднего диаметра, мм. После подстановки в (58) выражения для N

$$N = 4B/\pi D^2 \quad (59)$$

и с учетом прироста диаметра и площади сечений текущего года после преобразования (57) И. Я. Лиёпа (1980) предложил окончательную формулу текущего прироста по запасу наличного древостоя

$$dV = kB \left\{ \frac{2(dD)[H - 2(dH) + 4]}{10D + dD} + dH \right\}. \quad (60)$$

Адекватность формулы (60) была проверена в древостоях шести лесообразующих пород Прибалтики (на 57—84 пробных площадях каждой породы), среднеквадратическая ошибка составила 4,1—5,2 %. Необходимо отметить, что величина ошибки рассчитана без учета ошибок измерения величин k , B , D , H , dD и dH в реальных древостоях и точность определения фактического текущего прироста древостоев, по-видимому, ниже. Формула (60) проверена в сосновых и березовых древостоях Северного Казахстана и показала удовлетворительные результаты (Лиёпа, Усольцев, 1985, 1986).

Поскольку измерение dH и dD предполагается проводить на текущий момент, без их осреднения за промежуток времени между перечислениями, и поскольку, согласно (59), число стволов N принято постоянной величиной, то в соответствии с выводом Р. Куртиса (Curtis, 1967) формула (60), видимо, дает значения не прироста наличного запаса, как определяет И. Я. Лиёпа, а прироста общей производительности древостоя.

Переход от модели объемного текущего прироста dv (см³/дерево в год) как функции возраста A (лет) и ранга дерева (K) к возрастной динамике объема ствола был выполнен также на уровне отдельного дерева (Усольцев, 1979). Были рассчитаны уравнения для порослевых

$$\begin{aligned} \lg(dv) = & -1,0320 + 0,02621K - 0,009128K \lg A + \\ & + 3,2840 \lg A - 0,6280(\lg A)^2; R = 0,892; \end{aligned} \quad (61)$$

и для семенных березняков Северного Казахстана

$$\lg(dv) = -6,5959 + 0,08316K - 0,050546K \lg A + 7,5111 \lg A - 0,7058(\lg A)^2; R = 0,860; \quad (62)$$

и затем путем интегрирования (61) и (62) по возрасту деревьев с использованием преобразования Г. Томазиуса (Thomasius, 1965) составлены для порослевых и семенных березняков отдельные таблицы объемов стволов разного ранга в возрастной динамике.

2.3. РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ОДНОВРЕМЕННЫХ СОВМЕСТИМЫХ МОДЕЛЕЙ В ЛЕСОВОДСТВЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

Как можно заключить из раздела 2.2, не все совместимые системы уравнений роста и прироста древостоев являются одновременными. Одновременность, а точнее, ее частный случай — рекурсивность, имела место лишь в тех системах, где площадь сечений рассматривалась, с одной стороны, как зависимая переменная, а с другой — входила в уравнение запаса и его прироста в качестве независимой переменной, т. е. в моделях Дж. Клаттера (Clutter, 1963) и Дж. Мозера и О. Холла (Moser, Hall, 1969). Однако рассчитывались уравнения системы как изолированные методом ОМНК, который, как было показано в разделе 2.1, дает неустойчивые оценки. Рассмотрим несколько примеров более корректного расчета параметров системы уравнений роста и прироста древостоев.

2.3.1. ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ СОВМЕСТИМЫХ УРАВНЕНИЙ РОСТА И ПРИРОСТА ДРЕВОСТОЕВ МЕТОДОМ МАКСИМАЛЬНОГО ПРАВДОПОДОБИЯ

Совместимую систему уравнений Дж. Клаттера (Clutter, 1963) (25) и (29) из раздела 2.2.2 можно переписать в общем виде как

$$\ln V_1 = b_0 + b_1 S + b_2/A_1 + b_3 \ln B_1, \quad (63)$$

$$\ln V_2 = b_0 + b_1 S + b_2/A_2 + b_3 \ln B_2, \quad (64)$$

$$\ln B_2 = (A_1/A_2) \ln B_1 + a_1(1 - A_1/A_2) + a_2(1 - A_1/A_2)S, \quad (65)$$

где V_i — запас (куб. футов на акр) в возрасте A_i ; B_i — площадь сечений (кв. футов на акр) в возрасте A_i ; A_i — возраст древостоя (лет) в момент времени i ; S — класс бонитета, футов; $b_0, b_1, b_2, b_3, a_1, a_2$ — неизвестные параметры.

Чтобы рассчитать эти модели одновременно, А. Салливан и Дж. Клаттер (Sullivan, Clutter, 1972) подставили выражение (65) для $\ln B_2$ в уравнение (64) для $\ln V_2$ и получили

$$\begin{aligned} \ln V_2 = & b_0 + b_1 S + b_2 / A_2 + b_3 (A_1 / A_2) \ln B_1 + \\ & + b_4 (1 - A_1 / A_2) + b_5 (1 - A_1 / A_2) S, \end{aligned} \quad (66)$$

где $b_4 = b_3 a_1$; $b_5 = b_3 a_2$, а для (65) соответственно

$$a_1 = b_4 / b_3; \quad a_2 = b_5 / b_3.$$

Уравнение (66) представляет собой модель для проекции запаса древостоя как функции класса бонитета, начального возраста, возраста проекции и начальной площади сечений. Если $A_2 = A_1$ (т. е. длительность периода проекции равна 0), уравнение (66) приводится к модели запаса (63) и одновременно является моделью запаса для первого перечета и моделью проекции и прироста запаса для последующих наблюдений. Хотя подобные оценки для a_1 и a_2 в (65) нельзя назвать самыми эффективными, такой подход обеспечивает логическую непротиворечивость системы прогностических уравнений.

Система уравнений (63)—(66) обладает двумя примечательными особенностями. Во-первых, уравнения проекции дают расчетные значения, которые являются инвариантными для различных сочетаний длительности проекций. Так, если запас проектируется с A_1 до A_2 , а затем с A_2 до A_3 , то результат должен быть таким же, как при прямой проекции с A_1 до A_3 . Например, проекция B_3 с A_2 до A_3 равна

$$\ln B_3 = (A_2 / A_3) \ln B_2 + a_1 (1 - A_2 / A_3) + a_2 (1 - A_2 / A_3) S. \quad (67)$$

Если проекцию B_2 в (67) заменить уравнением для B_2 с A_1 до A_2 , то результатом будет уравнение

$$\begin{aligned} \ln B_3 = & [(A_1 / A_2) \ln B_1 + a_1 (1 - A_1 / A_2) + a_2 (1 - A_1 / A_2) S] (A_2 / A_3) + \\ & + a_1 (1 - A_2 / A_3) + a_2 (1 - A_2 / A_3) S, \end{aligned} \quad (68)$$

которое приводится к виду

$$\ln B_3 = (A_1/A_3)\ln B_1 + a_1(1 - A_1/A_3) + a_2(1 - A_1/A_3)S. \quad (69)$$

Но это уравнение можно было получить как прямую проекцию B_3 с A_1 до A_3 . Аналогичное свойство **инвариантности** обнаруживается и для проекции запаса, что легко выводится в выше приведенной последовательности.

Вторая примечательная особенность системы — использование проекции площади сечений в уравнении запаса эквивалентно использованию исходной площади сечений в уравнении для проекции запаса. Это свойство вытекает из вывода одновременной модели роста и прироста.

С использованием экспериментальных данных Дж. Клаттера (Clutter, 1963) были рассчитаны константы уравнения (66) по двум методам: ОМНК

$$\begin{aligned} \ln V_2 = 2,7600 + 0,014275S - 21,214/A_2 + 0,98109(A_1/A_2)\ln B_1 + \\ + 3,4863(1 - A_1/A_2) + 0,024368(1 - A_1/A_2)S \end{aligned} \quad (70)$$

и методу максимального правдоподобия (Summers, 1965)

$$\begin{aligned} \ln V_2 = 2,8837 + 0,014441S - 21,326/A_2 + 0,95064(A_1/A_2)\ln B_1 + \\ + 3,2649(1 - A_1/A_2) + 0,025428(1 - A_1/A_2)S. \end{aligned} \quad (71)$$

Уравнения запаса (70) и (71) с использованием полученных оценок коэффициентов объясняют 99,2 % варьирования запасов при первом перечете на 102 пробных площадях. Уравнения проекции запаса (70) и (71) объясняют соответственно 98,0 и 97,9 % варьирования запасов при втором перечете. В табл. 6 дано сравнение результатов табулирования моделей (70) и (71).

А. Салливан и Дж. Клаттер (Sullivan, Clutter, 1972) не дают ответа на вопрос, которое из уравнений (70) и (71) действительно лучше в практическом смысле и имеют ли расхождения между ними какой-то практический смысл. Оценки, полученные методом максимального правдоподобия, теоретически более обоснованы. Расхождения в данном случае (см. табл. 6), по-видимому, в большинстве случаев не имеют практического значения. Однако нет гарантии, что при другом массиве экспериментальных данных эти расхождения не будут больше, и оценки по методу

Таблица 6

Табулированные значения запасов древостоев по (70) за вычетом запасов по (71) для класса бонитета 90 футов

Площадь сечений, кв. футов на акр	Возраст, лет						
	25	30	35	40	45	50	55
50	-17	-21	-24	-26	-28	-30	-32
70	-7	-10	-12	-14	-16	-17	-18
90	6	5	4	3	3	2	1
110	22	23	25	24	24	26	25
130	41	44	47	49	50	52	53

максимального правдоподобия можно считать более “осторожным” вариантом в сравнении с оценками по ОМНК.

С использованием соотношений

$$a_1 = b_4/b_3 = 3,4344; a_2 = b_5/b_3 = 0,026748$$

получено уравнение проекции площади сечений

$$\ln B_2 = (A_1/A_2)\ln B_1 + 3,4344(1 - A_1/A_2) + 0,026748(1 - A_1/A_2)S; R^2 = 0,966, \quad (72)$$

оценки параметров которого отличаются от их значений в уравнении (29). Решение уравнений (71) и (72), показывающее возрастную динамику запасов и площадей сечений в древостоях с различной площадью сечений для классов бонитета 70 и 90 футов, графически представлено на рис. 6 а, б.

Несмотря на то, что оценки a_1 и a_2 в (71) и (72) нельзя рассматривать как эффективные и устойчивые, они в отличие от оценок ОМНК в (29) и (30) обеспечивают совместимость не только уравнений (по определению), но и их параметров.

2.3.2. ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ НЕСОВМЕСТИМЫХ СИСТЕМ УРАВНЕНИЙ РОСТА И ПРИРОСТА МЕТОДАМИ ОМНК, 2МНК И 3МНК

Г. Фурнивал и Р. Уилсон (Furnival, Wilson, 1971) исходили из того, что ОМНК не приемлем для оценки параметров одновременных уравнений, в которых одна и та же переменная может быть и независимой, и зависимой, коэффициенты одного урав-

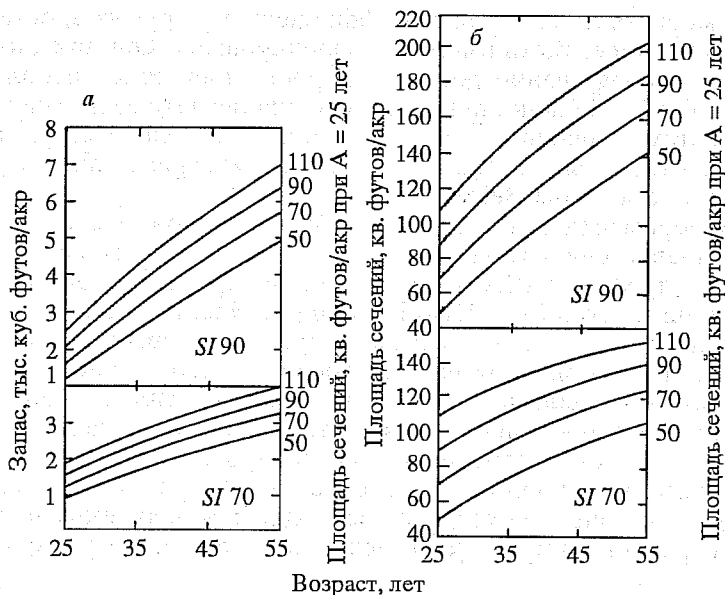


Рис. 6. Проекция запаса стволов (а) и площади сечений (б) в различном возрасте и при разной площади сечений древостоев сосны ладанной для классов бонитета $SI = 70$ и 90 футов (Sullivan, Clutter, 1972)

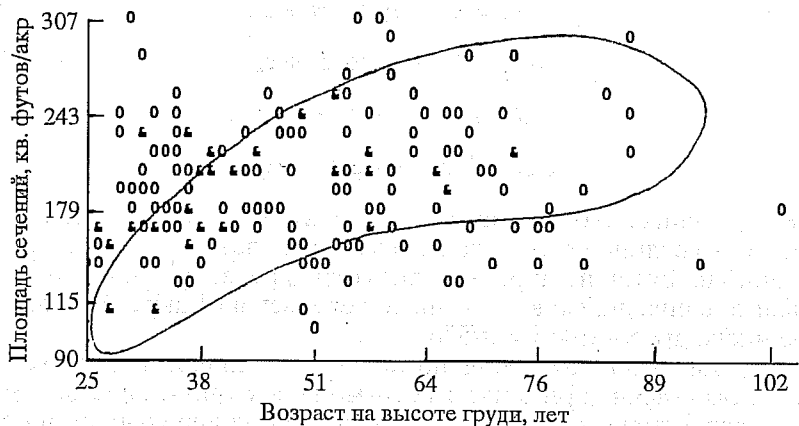


Рис. 7. Распределение пробных площадей древостоев сосны Веймутовой по площади сечений и возрасту (Furnival, Wilson, 1971)

нения могут быть связаны с коэффициентами другого и остатки уравнений могут быть взаимно коррелированы. Они предложили при моделировании роста и прироста древостоев использовать методику, обычно применяемую для расчета взаимосвязанных систем уравнений в эконометрии, и последовательно рассчитали отдельные, не совместимые системы уравнений для роста и прироста сосны Веймутовой.

Экспериментальные данные получены при исследовании роста древостоев сосны Веймутовой, проведенном совместно Лесной службой США и сельскохозяйственными опытными станциями штатов Мэн, Нью Гемпшир и Массачусетс.

Одна из гипотез, проверяемых при исследовании, касалась относительного влияния на рост древостоя его возраста и площади сечений. Были предприняты серьезные усилия, чтобы получить сбалансированное распределение пробных площадей по возрасту и площади сечений древостоев (рис. 7).

Использованы данные перечетов на 175 пробных площадях на начало и конец трехлетнего периода. Для получения модели запаса древостоев применена следующая система уравнений:

$$\log H = b_{11} + b_{12} \log A + e_1, \quad (73)$$

$$\log N = b_{21} + b_{22} \log D + e_2, \quad (74)$$

$$\log B = b_{31} + b_{32} \log H + e_3, \quad (75)$$

$$\log F = b_{41} + b_{42} \log D + e_4, \quad (76)$$

$$\log B = \log k + \log N + 2 \log D, \quad (77)$$

$$\log V = \log F + \log H + \log B, \quad (78)$$

где V — запас, куб. футов; H — средняя высота древостоя, футов; A — средний возраст на высоте груди, лет; B — площадь сечений, кв. футов на акр; D — диаметр дерева, среднего по площади сечения, дюймов; N — число деревьев на 1 акре; F — видовое число древостоя; $k = \pi/576$.

Форма уравнения (73) принята после неудачных подгонок нескольких обычно применяемых сигмоидных кривых роста, вероятно, вследствие того, что был принят не полный возраст, а возраст на высоте груди. Зависимость (74) — это уравнение плотности древостоев Л. Рейнеке (Reineke, 1933), а (75) — уравнение

полноты древостоев, примененное Т. Койлом и Ф. Шумахером (Schumacher, Coile, 1960). Уравнение (76) выражает видовое число как функцию среднего диаметра древостоя и в сочетании с уравнением (78) дает выражение запаса древостоя в терминах густоты, среднего диаметра и высоты древостоя. Простое логарифмическое уравнение для запаса древостоев С. Спурра (Spurr, 1952)

$$\log V = b_{41} + b_{42} \log N + b_{43} \log B + b_{44} \log H + e_4 \quad (79)$$

не было принято вследствие проблем с его идентификацией: система имеет четыре неизвестных коэффициента и лишь две экзогенных переменных — возраст и “фиктивную” переменную, или свободный член.

Уравнения для густоты (74) и площади сечений (75) образуют в пределах модели запаса древостоев блок истинно одновременных уравнений. Это становится очевидным, если подставить (77) в левую часть уравнения (75) и переписать (74) и (75) как

$$\log N - b_{22} \log D = b_{21} + e_2, \quad (80)$$

$$\log N + 2 \log D = b_{31} + b_{32} \log H - \log k + e_3. \quad (81)$$

Совместное и одновременное определение среднего диаметра и числа деревьев на акре имеет биологический смысл и тем не менее подобный подход в других моделях запаса древостоев ранее не применялся. По данным повторных обмеров пробных площадей определены коэффициенты модели по двум методам — ОМНК и 2МНК. Результаты приведены в табл. 7.

Г. Фурнивал и Р. Уилсон (Furnival, Wilson, 1972) вывели модель изменения запасов из модели запаса путем дифференцирования уравнений (73)—(75). Предполагалось, что возмущение в уравнении (73) является главным образом функцией местообитания и поэтому со временем остается по существу неизменным. Было записано

$$\log H_1 - \log H_0 = b_{12} (\log A_1 - \log A_0) + r_1, \quad (82)$$

где r_1 — возмущение. Ф. Шумахер и Т. Койл (Schumacher, Coile, 1960) предложили соотношение “будущей” полноты S_1 и “прошлой” S_0 выразить как

$$\log S_1 = (A_0/A_1) \log S_0 + r. \quad (83)$$

Таблица 7

Оценки коэффициентов и их стандартные ошибки, полученные несколькими методами для моделей запаса и изменения запасов

Метод	Нулевой член			Регрессионный коэффициент		
	Коэффициент	Стандартная ошибка	Коэффициент вариации ×100	Коэффициент	Стандартная ошибка	Коэффициент вариации ×100
	b_{11}			b_{12}		
	Модель запаса					
ОМНК	0,5590	0,05499	9,84	0,7266	0,03227	4,44
2МНК	0,5590	0,05467	9,78	0,7266	0,03208	4,42
	Модель изменения запасов					
ОМНК				1,015	0,03137	3,09
2МНК				1,015	0,03128	3,08
3МНК				1,009	0,03114	3,09
	b_{21}			b_{22}		
	Модель запаса					
ОМНК	4,529	0,05912	1,31	-1,985	0,05726	2,88
2МНК	4,349	0,08208	1,89	-1,809	0,07979	4,41
	Модель изменения запасов					
ОМНК	4,128	0,2061	4,99	-1,463	0,1472	10,06
2МНК	4,271	0,3905	9,14	-1,566	0,2803	17,90
3МНК	4,297	0,1699	3,95	-1,585	0,1208	7,63
	b_{31}			b_{32}		
	Модель запаса					
ОМНК	1,821	0,1183	6,50	0,2564	0,06586	25,68
2МНК	1,932	0,1366	7,07	0,1945	0,07603	39,09
	Модель изменения запасов					
ОМНК	2,086	0,2465	11,82	0,2300	0,1074	46,69
2МНК	1,429	0,7432	51,99	0,5174	0,3252	62,85
3МНК	1,506	0,3176	21,10	0,4849	0,1386	28,59
	b_{41}			b_{42}		
	Модель запаса					
ОМНК	-0,1194	0,01562	13,07	-0,2484	0,01513	6,09
2МНК	-0,1958	0,02255	11,52	-0,1738	0,02192	12,61
	Модель изменения запасов					
ОМНК	-0,1194	0,01562	13,07	-0,2484	0,01513	6,09
2МНК	-0,1194	0,01555	13,03	-0,2484	0,01507	6,06
3МНК	-0,1192	0,01482	12,43	-0,2486	0,01430	5,75

По существу это же соотношение действительно и для густоты

$$\log N_1 - b_{21} - b_{22} \log D_1 = A_0/A_1 (\log N_0 - b_{21} - b_{22} \log D_0) + r_2, \quad (84)$$

$$\log B_1 - b_{31} - b_{32} \log H_1 = A_0/A_1 (\log B_0 - b_{31} - b_{32} \log H_0) + r_3 \quad (85)$$

или

$$\begin{aligned} & (\log N_1 - \log N_0 A_0/A_1) = \\ & = b_{21}(1 - A_0/A_1) + b_{22}(\log D_1 - \log D_0 A_0/A_1) + r_2, \end{aligned} \quad (86)$$

$$\begin{aligned} & (\log B_1 - \log B_0 A_0/A_1) = \\ & = b_{31}(1 - A_0/A_1) + b_{32}(\log H_1 - \log H_0 A_0/A_1) + r_3. \end{aligned} \quad (87)$$

Часто при изучении динамики запаса последний определяется лишь по одному пересчету, поэтому в модели изменения запасов уравнение для видового числа

$$\log F = b_{41} + b_{42} \log D_1 + r_4 \quad (88)$$

было перенесено из модели запаса в модель изменения запасов и, кроме того, использованы равенства (77) и (78).

Поскольку “сдвинутые” значения эндогенных переменных могут рассматриваться в качестве экзогенных, очевидно, что модель изменения запасов сверхидентифицируема. Поэтому коэффициенты рассчитаны тремя методами: ОМНК, 2МНК и 3МНК (см. табл. 7).

Из табл. 7 следует, что коэффициенты, полученные по модели запаса, совершенно отличаются от коэффициентов, полученных по модели изменения запасов, и поэтому названные две модели не совместимы. Видимо, эти расхождения обусловлены смещениями при оценке коэффициентов модели запаса, вызванными корреляцией между остатками и экзогенной переменной — возрастом древостоя. Как уже отмечалось, остатки в уравнении (73) модели запаса связаны с качеством местообитания, а последнее, вероятно, отрицательно коррелировано с возрастом древостоя. Такая корреляция могла быть вызвана тенденцией рубки древостоев сразу по достижении коммерческого среднего диаметра: древостой на лучших местообитаниях достигали требуемого коммерческого диаметра и вырубались в более

раннем возрасте и спелые древостои приходились на худшие местообитания.

Корреляции между возрастом, с одной стороны, и густотой и абсолютной полнотой, с другой, видимо, обусловлены специфической подборки пробных площадей в искомым нормальных древостоях: имелась тенденция отбраковывать низкогустотные и низкополнотные древостои в относительно более часто и широко представленных молодняках и в то же время брать почти все в старших классах возраста, в которых древостои малочисленны и их подбор в натуре затруднен. При подборе пробных площадей стремились получить сбалансированное распределение классов абсолютной полноты в пределах каждого класса возраста, и поэтому полнота оказалась слишком высокой для молодняков и слишком низкой — для спелых древостоев (см. рис. 7).

В модели изменения запасов упомянутые корреляции были менее выражены и представляли меньшую проблему, чем в модели запаса. Остатки в этой модели включали в себя возрастные изменения показателей качества местообитания, абсолютной полноты и густоты, а также другие возмущения (например ошибки измерений).

Оценки большей части коэффициентов, выполненные различными методами, существенно различались. Особый интерес представляет расхождение оценок b_{22} в модели запаса, выполненных методами ОМНК и 2МНК. Исходя из величины оценки $b_{22} = -1,985$, можно заключить, что одновременная система уравнений (80) и (81) является по существу коллинеарной и ее эффективное решение для среднего диаметра и числа стволов невозможно. С другой стороны, оценка b_{22} методом 2МНК составляет $-1,809$ и решение может быть получено. Стандартные ошибки оценок коэффициентов в модели изменения запасов, полученные по 3МНК, оказались неожиданно малы. В остальных случаях ошибки несколько выше ошибок для тех же коэффициентов модели запаса.

В табл. 8 приведена расчетная дисперсионно-ковариационная матрица коэффициентов для модели изменения запасов, полученная методом 3МНК. Эти статистики важны при разработке метода оценки систем уравнений, поскольку они могут быть использованы для расчета стандартных ошибок прогнозируемых запасов и их изменений (проекций). В табл. 9 даны ошибки прогноза показателей запаса древостоя и его составляющих для

Таблица 8

**Расчетная дисперсионно-ковариационная матрица коэффициентов
для модели изменения запасов, полученная методом ЗМК**

	b_{12}	b_{21}	b_{22}	b_{31}
b_{12}	0,000970	-0,000118	0,000264	-0,000010
b_{21}	-0,000118	0,014605	-0,020313	0,015056
b_{22}	0,000264	-0,020313	0,028883	-0,020929
b_{31}	-0,000010	0,015056	-0,020929	0,019213
b_{32}	-0,000133	-0,034364	0,048381	-0,043876
b_{41}	0,000030	0,000003	-0,000004	0,000054
b_{42}	-0,000048	-0,000002	-0,000002	-0,000054

	b_{32}	b_{41}	b_{42}
b_{12}	-0,000133	0,000030	-0,000048
b_{21}	-0,034364	0,000003	-0,000002
b_{22}	0,048381	-0,000004	0,000002
b_{31}	-0,043876	0,000054	-0,000054
b_{32}	0,100880	-0,000131	0,000138
b_{41}	-0,000131	0,000205	-0,000210
b_{42}	0,000138	-0,000210	0,000220

Таблица 9

**Расчетные стандартные ошибки прогнозируемых изменений
продуктивности древостоев класса бонитета 65 и возраста 90 лет
на конец прогнозируемого периода**

Возрастной интервал, лет	Показатели запаса и его составляющих				
	H	N	D	B	V
10—90	7,65	0,17	6,14	8,83	11,29
20—90	5,95	0,59	5,54	10,24	9,53
30—90	5,03	1,32	5,92	11,94	8,90
40—90	4,41	2,37	6,53	13,74	8,68
50—90	3,94	3,76	7,16	15,57	8,63
60—90	3,54	5,46	7,77	17,40	8,61
70—90	3,15	7,45	8,34	19,21	8,49
80—90	2,62	9,73	8,86	21,00	7,84

класса бонитета 65 футов. Наименьшей точностью обладают оценки площади сечений, ошибка достигает 20 %. Однако изменения высоты, густоты, среднего диаметра и запаса почти всегда предсказываются с ошибкой менее 10 %.

2.3.3. ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ СОВМЕСТИМЫХ МОДЕЛЕЙ РОСТА И ПРИРОСТА ДРЕВОСТОЕВ МЕТОДОМ ЗМНК

Дальнейший вклад в развитие методики оценки параметров одновременных совместимых уравнений роста и прироста древостоев был сделан П. Мэрфи и Г. Стернице (Murphy, Sternitzke, 1979), а также П. Мэрфи и Р. Белтцом (Murphy, Beltz, 1981), которые использовали прием, известный как ограниченный трехшаговый метод наименьших квадратов (ОЗМНК) для расчета одновременных моделей роста и прироста для сосен ладанной и ежовой. В обеих названных моделях ОЗМНК применен корректно, но расчеты выполнены для структурной, а не приведенной формы уравнений системы.

Как показано выше, инструментарий, развитый при моделировании и имитации экономических процессов с использованием систем взаимозависимых математических моделей, может быть успешно применен к процессам биологического роста. Кроме того, этот инструментарий дает как точечные, так и интервальные прогнозы. Б. Бордерс и Р. Бейли (Borders, Bailey, 1986) предложили использовать его для построения системы одновременных совместимых уравнений роста и прироста древостоев, подобных уравнениям Дж. Клаттера (Clutter, 1963), и сравнивать результаты с оценками по ОМНК.

В ходе постановки густотных опытов в плантациях сосны Эллиота в университете штата Джорджия был составлен обширный банк данных. Данные получены на 898 постоянных пробных площадях, где проведено до шести повторных пересчетов. Возрастной диапазон — с 2 до 25 лет, густота посадки — от 100 до 1800 деревьев на акре. Экспериментом охвачен географический регион от юга Виргинии и севера Флориды до запада Алабамы.

На первом этапе Б. Бордерс и Р. Бейли (Borders, Bailey, 1986) рассчитали несколько прогностических моделей для запаса и площади сечений древостоев по ОМНК. По доле объясненной изменчивости (R^2) и анализу остатков отобраны лучшие модели

$$\ln V = b_0 + b_1 \ln H + b_2 \ln B + e_v, \quad (89)$$

$$\ln B = a_0 + a_1 \ln H + a_2 \ln N_0 + e_b, \quad (90)$$

где H — верхняя высота древостоя, футов; N_0 — начальная густота, деревьев на акр; e_v и e_b — неизвестные стохастические составляющие ошибки для запаса и площади сечений.

Рассматривая зависимости (89) и (90) как уравнения запаса древостоев, Б. Бордерс и Р. Бейли для вывода совместимых уравнений прироста использовали дифференциально-интегральное соотношение и взяли производные от (89) и (90) по возрасту A

$$(dV/dA)/V = (b_1/H)(dH/dA) + (b_2/B)(dB/dA), \quad (91)$$

$$(dB/dA)/B = (a_1/H)(dH/dA), \quad (92)$$

из которых следует, что относительная скорость изменения наличного запаса зависит от относительной скорости изменения верхней высоты и площади сечений, тогда как относительная скорость изменения площади сечений зависит только от относительной скорости изменения верхней высоты. Поэтому данная система уравнений должна включать также компонент прогноза и проекции верхней высоты. По экспериментальным данным рассчитано несколько моделей зависимости верхней высоты от возраста и с учетом статистик подгонки и простоты выбрана известная зависимость логарифма высоты от возраста (Schumacher, 1939)

$$\ln H = c_0 + c_1(1/A), \quad (93)$$

где c_0 и c_1 — неизвестные параметры. Первая производная от нее по возрасту имела вид

$$(dH/dA)/H = -c_1(1/A^2). \quad (94)$$

Выражения (91), (92) и (94) представляли собой относительно простые, сепарабельные линейные дифференциальные уравнения. Их интегрирование в интервале возрастов от A_1 до A_2 дало следующие уравнения роста, или проекции:

$$\ln V_2 = \ln V_1 + b_1(\ln H_2 - \ln H_1) + b_2(\ln B_2 - \ln B_1) + e_v^*, \quad (95)$$

$$\ln B_2 = \ln B_1 + a_1(\ln H_2 - \ln H_1) + e_b^*, \quad (96)$$

$$\ln H_2 = \ln H_1 + c_1(1/A_2 - 1/A_1), \quad (97)$$

где V_i — запас (куб. футов/акр) в возрасте A_i ; B_i — площадь сечений (кв. футов/акр) в возрасте A_i ; H_i — верхняя высота (футов) в возрасте A_i ; A_i — возраст (лет) в момент i ; $i = 1, 2$. Вследствие наличия взаимосвязи между классом бонитета и верхней высотой в систему включена модель проекции высоты древостоя. Уравнение (97) косвенным образом определяет систему бонитетных кривых, позволяющую дать совместимые оценки величин V_1, B_1, V_2, B_2 и H_2 , используя данные H_1, A_1, A_2 и N_0 и соответственно уравнения (89), (90), (95)—(97).

Все эти модели можно рассчитать изолированно, используя ОМНК. Однако, как и в моделях Г. Фурнивала и Р. Уилсона (Furnival, Wilson, 1971), результирующие модели прогноза и проекции в таком случае не совместимы. К моделям динамики запаса и площади сечений можно применить приемы А. Салливана и Дж. Клаттера (Sullivan, Clutter, 1972) или Г. Буркхарта и П. Спринца (Burkhardt, Sprinz, 1984) с минимизацией функции потерь. Однако результирующие оценки параметров в этом случае не имеют желательных статистических свойств устойчивости и эффективности. Кроме того, этими приемами не предусмотрен вывод доверительных интервалов для результирующих прогнозов роста и прироста древостоев.

Б. Бордерс и Р. Бейли (Borders, Bailey, 1986) рассматривали систему одновременных (взаимозависимых) уравнений, подобных (89), (90), (95)—(97) с k эндогенными переменными и m predetermined переменными, первое уравнение которой имело вид

$$Y_1 = Y_2 b_{12} + \dots + Y_k b_{1k} + X_1 c_{11} + \dots + X_m c_{1m} + e_1, \quad (98)$$

где Y_i — эндогенные переменные; X_j — predetermined переменные; b_{ij} — неизвестные параметры для эндогенных переменных; c_{ij} — неизвестные параметры для predetermined переменных; e_1 — стохастическая составляющая ошибки; $i = 1, 2, \dots, k$; $j = 1, 2, \dots, m$.

Полная система одновременных уравнений, частично представленная уравнением (98), может быть записана в матричной форме

$$bY = GX + U = 0,$$

где b — $k \times k$ матрица коэффициентов для совместно определенных эндогенных переменных; Γ — $m \times k$ матрица коэффициентов c_{ij} для предопределенных переменных; Y — $n \times k$ матрица n наблюдений по k эндогенным переменным; X — $n \times m$ матрица n наблюдений по m предопределенным переменным; U — $n \times k$ матрица возмущений (ошибок) для n наблюдений по k уравнениям. После деления на b и преобразования получена приведенная форма

$$Y = X\Omega + V, \quad (99)$$

где $\Omega = b^{-1} \cdot \Gamma$ — $m \times k$ матрица коэффициентов приведенной формы; $V = b^{-1} \cdot U$ — $n \times k$ матрица возмущений приведенной формы. Теперь для оценки параметров приведенной формы можно использовать ОМНК, поскольку все переменные в правой части уравнения являются предопределенными и поэтому не коррелированы с составляющими ошибок.

Хотя для идентификации системы уравнений разработаны критерии, нелинейность переменных и параметров, а также межрегрессионные ограничения существенно усложняют процесс идентификации. С использованием метода Дж. Келли (Kelley, 1975) для идентификации моделей при наличии ограничений в пределах уравнения и между уравнениями установлено, что система моделей роста и прироста (89), (90), (95)—(97) является сверхидентифицируемой.

При спецификации структурной формы взаимозависимых систем уравнений лесные биометристы-модельеры находятся в лучшем положении, чем эконометристы, поскольку процессы роста организмов хорошо представлены некоторыми математическими функциями. Кроме того, дифференциально-интегральное соотношение, из которого выведены проективные уравнения (95)—(97), включает некоторые ограничения параметров внутри уравнения и между уравнениями, что способствует идентификации модели. В общем лесные модельеры могут построить системы моделей роста и прироста, базирующиеся на относительно стабильной основополагающей теории роста. По крайней мере, имеется большое число эмпирических и теоретических работ, пригодных для использования при разработке систем моделей роста.

Как уже отмечалось, метод 3МНК отличается от метода 2МНК тем, что объясняет одномоментные корреляции между составляющими стохастической ошибки уравнений системы. Это осуществляется путем использования процедуры генерализованного (обобщенного) метода наименьших квадратов, который включает в себя три шага:

- шаг 1 — применение 2МНК для освобождения переменных в правой части уравнения от их эндогенности;
- шаг 2 — дается устойчивая оценка матрицы одномоментной ковариации с использованием остатков 2МНК;
- шаг 3 — получение одновременных оценок параметров генерализованным методом наименьших квадратов с использованием оценки матрицы одномоментной ковариации, полученной на шаге 2.

Уравнения (89), (90), (95)—(97) рассчитаны вначале отдельно, по генерализованному методу наименьших квадратов. Затем те же модели рассчитаны в виде системы по неограниченному трехшаговому методу наименьших квадратов (НЗМНК) с использованием процедуры SYSREG программы SAS (система статистического анализа). Термин “неограниченный” означает, что в структурную модель введены только нулевые ограничения. Оценки параметров по методам НЗМНК и ОМНК оказались близкими (табл. 10—12) и дали биологически обусловленные тренды.

В данном случае не выявлены различия между ОМНК и НЗМНК. Однако это не всегда имеет место. Если коэффициенты R^2 в регрессиях шага 1 высокие, то предсказанные значения обычно близки к фактическим. Это означает, что фактические значения не имеют высокой корреляции со стохастическими ошибками в исходных структурных уравнениях, поскольку они хорошо предсказываются predetermined переменными (Gujarati, 1978). При наличии сверхидентифицируемой системы взаимозависимых линейных уравнений можно использовать 2МНК, поскольку в случае, если структурная форма специфицирована корректно, этот метод даст устойчивые и эффективные оценки для выборки большого объема. Кроме того, если модель специфицирована корректно, то при наличии одномоментных корреляций в структуре ошибок вместо 2МНК нужно использовать НЗМНК, который при этом имеет те же преимущества перед ОМНК, что и 2МНК, и кроме того, будет давать более эффективные оценки параметров в сравнении с 2МНК.

Электронный архив УГЛТУ

Таблица 10
Оценки параметров уравнения Ф. Шумахера для проекции высоты древостоя (97) с использованием ОМНК, НЗМНК и ОЗМНК

Метод	Параметр c_1 (оценка и стандартное отклонение)
ОМНК	-4,682 (0,0303)
НЗМНК	-4,681 (0,0299)
ОЗМНК	-5,021 (0,0268)

Таблица 11
Оценки параметров для уравнений прогноза (89) и проекции (95) запаса древостоев с использованием методов ОМНК, НЗМНК и ОЗМНК

№ уравнения	Метод	Оценки параметров и их стандартные отклонения		
		b_0	b_1	b_2
(89)	ОМНК	-0,0748(0,0139)	0,762(0,00788)	1,056(0,00422)
	НЗМНК	-0,185(0,0115)	0,838(0,00525)	1,012(0,00264)
	ОЗМНК	-0,0994(0,00999)	0,825(0,00507)	1,005(0,00250)
(95)	ОМНК	—	0,796(0,0163)	1,058(0,0100)
	НЗМНК	—	0,802(0,0141)	1,065(0,00953)
	ОЗМНК	—	0,825(0,00507)	1,005(0,00250)

Таблица 12
Оценки параметров для уравнений прогноза (90) и проекции (96) площади сечений древостоев по методам ОМНК, НЗМНК и ОЗМНК

№ уравнения	Метод	Оценки параметров и их стандартные отклонения		
		a_0	a_1	a_2
(90)	ОМНК	-6,665(0,0525)	1,654(0,00652)	0,764(0,00868)
	НЗМНК	-6,627(0,0500)	1,661(0,00682)	0,762(0,00805)
	ОЗМНК	-6,611(0,0500)	1,624(0,00668)	0,766(0,00803)
(96)	ОМНК	—	1,507(0,0111)	—
	НЗМНК	—	1,409(0,0110)	—
	ОЗМНК	—	1,624(0,00668)	—

До этого момента при анализе полной системы уравнений применялись нулевые ограничения (т. е. ограничения путем исключения) и ограничения в пределах уравнения. Однако при выводе моделей проекции из моделей прогноза вводятся некоторые ограничения параметров между уравнениями. Зависимости (89), (90), (95)—(97) включали следующие межрегрессионные ограничения: а) величины b_1 и b_2 в уравнениях (89) и (95) должны быть одни и те же; б) значение a_1 в уравнениях (90) и (96) должно быть одно и то же.

Эти ограничения обусловлены указанным дифференциально-интегральным соотношением и при их соблюдении обеспечивается совместимость модели. При расчете системы моделей на основе 2МНК и 3МНК межрегрессионные ограничения просто вводятся в исходные структурные уравнения и их параметры рассчитываются с помощью процедуры SYSREG по программе SAS. Ограничения параметров введены в систему линейных уравнений и рассчитана совместимая система моделей роста и прироста с использованием для этого всей исходной эмпирической информации. Результирующие оценки параметров близки к оценкам по ОМНК (см. табл. 10—12), однако ОЗМНК дает меньшие стандартные ошибки (т. е. более эффективные оценки). Это является прямым следствием устранения одномерных корреляций в структуре ошибок системы уравнений (табл. 13). Таким образом, путем использования теоретически корректных процедур подгонки учтены основополагающие взаимосвязи между уравнениями.

Для получения расчетных значений эндогенных переменных во взаимозависимой системе линейных уравнений необходимы оценки параметров приведенной формы. В приведенной форме все эндогенные переменные прогнозируются как функции одних только predetermined переменных. Так, при наличии устойчивой оценки Ω в (99) скажем, Ω , можно получить прогнозируемые точечные оценки всех эндогенных переменных на основе predetermined переменных. Однако возникает вопрос, как оценить коэффициенты приведенной формы уравнения? Их можно получить непосредственной подгонкой по всем predetermined переменным и на основе ОМНК вывести Ω . Однако при непосредственном выводе коэффициентов приведенной формы путем последовательной подстановки на параметры приведенной формы налагаются некоторые ограничения, если сис-

Одномоментные корреляции в структуре ошибок системы уравнений роста и прироста сосны Эллиота

№ уравнения	№ уравнения				
	(89)	(90)	(95)	(96)	(97)
(89)	1,0	0,20	-0,64	-0,20	-0,24
(90)		1,0	0,03	-0,92	0,08
(95)			1,0	0,02	0,49
(96)				1,0	-0,13
(97)					1,0

тема уравнений является сверхидентифицируемой. Рассмотрим снова общую приведенную форму модели (99)

$$Y = \Omega X + V.$$

Более эффективная (чем $\hat{\Omega}$) оценка, скажем, $\tilde{\Omega}$, относится к приведенной форме, полученной методом ЗМНК, и может быть записана

$$\tilde{\Omega} = \hat{b}^{-1} \hat{\Gamma},$$

где \hat{b} — устойчивая ЗМНК-оценка параметров эндогенных переменных; $\hat{\Gamma}$ — устойчивая ЗМНК-оценка параметров predetermined переменных. Математическое доказательство и интуитивное объяснение, почему $\tilde{\Omega}$ более эффективна, чем $\hat{\Omega}$ приводятся в работе Т. Фомби с соавторами (Fomby et al., 1984).

Если представляет интерес прогноз эндогенных переменных на какой-то период времени t

$$Y_t = (Y_{t1}, Y_{t2} \dots Y_{tk})$$

по задаваемым значениям predetermined переменных на момент времени t

$$X_t = (X_{t1}, X_{t2} \dots X_{tm}),$$

то можно просто подставить X_t в модель приведенной формы и получить

$$\hat{Y}_t = X_t \tilde{\Omega}, \tag{100}$$

где \hat{Y}_i — $1 \times k$ вектор-строка предсказанных эндогенных переменных. Ошибка прогноза определяется выражением

$$E_i = Y_i - \hat{Y}_i.$$

Устойчивая оценка матрицы асимптотической ковариации для ошибок прогноза определяется (Fomby et al., 1984):

$$\hat{T} = F' \hat{A} \hat{\Psi} \hat{A}' F + \hat{\Theta}, \quad (101)$$

где

$$\hat{A} = (\hat{b}^{-1})' \otimes (\tilde{\Omega}, I_N),$$

где \otimes означает прямое произведение, или произведение Кронекера; \hat{b} — 3МНК-оценки коэффициентов эндогенных переменных; $F' = I_G \otimes X_i$; Ψ — оцененная дисперсионно-ковариационная матрица 3МНК-оценок, упорядоченная согласно:

$$\sqrt{n} \text{vec} \begin{bmatrix} \hat{b} - b \\ \hat{\Gamma} - \Gamma \end{bmatrix} \stackrel{asy}{\sim} N(0, \Psi),$$

где n — объем выборки; $N(0, \Psi)$ — многомерное нормальное распределение со средним вектором 0 и дисперсионно-ковариационной матрицей Ψ ; $\hat{\Theta} = (\hat{b}^{-1})' \hat{\Sigma} (\hat{b}^{-1})$, где $\hat{\Sigma}$ — 3МНК-оценка дисперсионно-ковариационной матрицы одномоментно коррелированных возмущений, которая может быть получена по остаткам 2МНК-подгонки; I_N — матрица тождества N -го порядка. Как было показано Т. Фомби с соавторами (Fomby et al., 1984), первую часть выражения для \hat{T}

$$F' \hat{A} \hat{\Psi} \hat{A}' F$$

можно считать дисперсией прогнозируемой величины \hat{Y}_i относительно ее среднего значения $(X_i \Omega)$, а вторую часть — $\hat{\Theta}$ — дисперсией истинного будущего значения Y_i относительно его среднего. Квадратные корни диагональных элементов матрицы \hat{T} являются оцененными стандартными ошибками вектор-строки \hat{Y}_i и, таким образом, могут быть использованы при построении

доверительных интервалов для прогнозируемых эндогенных переменных.

Процедуру можно проиллюстрировать на примере прогнозирования и построения доверительных интервалов для совместимой системы моделей запаса и прироста древостоев сосны Эллиота:

$$\ln B_1 = a_0 + a_1 \ln H_1 + a_2 \ln N_0,$$

$$\ln V_1 = b_0 + b_1 \ln H_1 + b_2 \ln B_1,$$

$$\ln H_2 = \ln H_1 + c_1(1/A_2 - 1/A_1),$$

$$\ln B_2 = \ln B_1 + a_1(\ln H_2 - \ln H_1),$$

$$\ln V_2 = \ln V_1 + b_1(\ln H_2 - \ln H_1) + b_2(\ln B_2 - \ln B_1).$$

Для этой системы моделей имеются $k = 5$ эндогенных переменных и $m = 5$ предопределенных переменных (включая свободный член). Матрица b коэффициентов эндогенных переменных для

$$Y = (\ln B_1, \ln V_1, \ln H_2, \ln B_2, \ln V_2)$$

представлена

$$\begin{bmatrix} 1 & -b_2 & 0 & -1 & b_2 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & -a_1 & -b_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -b_2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

и матрица Γ для

$$X = (1, H_1, \ln N_0, 1/A_2, 1/A_1)$$

представлена

Электронный архив УГЛТУ

$$\begin{bmatrix} -a_0 & -b_2 & 0 & 0 & 0 \\ -a_1 & -b_1 & -1 & a_1 & b_1 \\ -a_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -c_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & c_1 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

где $b_0, b_1, b_2, a_0, a_1, a_2, c_1$ — ЗМНК-оценки параметров совокупности, приведенные в табл. 10—12.

Если нужно рассчитать запас и площадь сечений древостоя в возрасте 15 и 20 лет и верхнюю высоту в возрасте 20 лет по известным верхней высоте в возрасте 15 лет, равной 45 футов, и начальной густоте посадки 450 деревьев на акр, тогда X_i вектор-строка будет равна

$$X_i = [1, \ln(45), \ln(450), 1/20, 1/15].$$

Вектор предсказанных эндогенных переменных рассчитан по уравнению (97), где использованы выведенные коэффициенты приведенной формы:

$$\tilde{\Omega} = \begin{bmatrix} -6,611 & -6,744 & 0 & -6,611 & -6,744 \\ 1,624 & 2,457 & 1,0 & 1,624 & 2,457 \\ 0,766 & 0,770 & 0 & 0,766 & 0,770 \\ 0 & 0 & -5,021 & -8,152 & -12,335 \\ 0 & 0 & 5,021 & 8,152 & 12,335 \end{bmatrix},$$

чтобы получить

$$\hat{Y}_i = (4,252; 7,314; 3,890; 4,388; 7,520).$$

После экспонирования имеем: $B_1 = 70,23$ кв. футов на акр; $V_1 = 1501,1$ куб. футов на акр; $H_2 = 48,93$ футов; $B_2 = 80,46$ кв. футов на акр; $V_2 = 1843,7$ куб. футов на акр.

Более детальный анализ матрицы $\tilde{\Omega}$ выявил некоторые примечательные взаимосвязи. Первая из пяти колонок представляет оценки параметров приведенной формы по

$$X_i = (1, \ln H_1, \ln N_0, 1/A_2, 1/A_1)$$

для эндогенных переменных соответственно B_1 , V_1 , H_2 , B_2 и V_2 . Приведенные формы уравнений для прогнозирования площади сечений B_1 и проекции высоты древостоя H_2 тождественны структурным формам. Это прямой результат того, что упомянутые две эндогенные переменные являются функциями только предопределенных переменных. Сравнение колонок первой и четвертой в матрице $\tilde{\Omega}$ показывает, что эти коэффициенты приведенной формы образуют совместимую модель прироста и роста площади сечений. Колонки вторая и пятая образуют совместимое уравнение прироста и роста общего запаса. Таким образом, спецификация совместимой системы моделей прироста и роста в структурной форме определяет также совместимую систему моделей в приведенной форме, с помощью которых выполняются прогнозы.

Асимптотическая оценка дисперсионно-ковариационной матрицы ошибок прогноза рассчитана с использованием уравнения (101). Получено

$$\hat{T} = \begin{bmatrix} 0,175 & 0,194 & -0,0216 & 0,0336 & 0,0152 \\ & 0,254 & -0,0182 & 0,0592 & 0,0444 \\ & & 0,0478 & 0,0983 & 0,136 \\ & & & 0,313 & 0,395 \\ & & & & 0,513 \end{bmatrix}$$

После извлечения квадратного корня и экспонирования диагональных элементов матрицы \hat{T} определены стандартные ошибки (SE) для Y_i :

SE для $B_1 = 1,52$ кв. футов на акр,

SE для $V_1 = 1,65$ куб. футов на акр,

SE для $H_2 = 1,24$ фута,

SE для $B_2 = 1,75$ кв. футов на акр,

SE для $V_2 = 2,05$ куб. футов на акр.

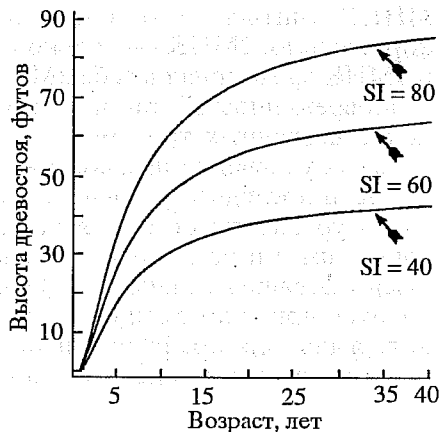
Эти значения использованы далее при расчете доверительных интервалов для получения соответствующих предельных значений с учетом нормального распределения. Все расчеты выполнены с помощью процедуры MATRIX программы SAS.

Качество подгонки этой системы оценивалось путем прогнозирования данных, по которым рассчитывались коэффициенты. Хотя очевидно, что подобный тест не является независимым, он использован для сопоставления моделей, рассчитанных методами ОМНК и ОЗМНК. Выполнены две проверки качества подгонки.

Вначале предполагалось, что имеющаяся для прогнозов и проекций информация минимальна. Это соответствует данным о начальной густоте посадки, о текущих возрасте и верхней высоте, а также о возрасте проекции. Когда имеются данные только по этим предопределенным переменным, прогнозы с использованием коэффициентов приведенной формы выполняются путем подгонки по методу ОЗМНК. Если каждая модель рассчитывается отдельно по методу ОМНК, то полученная информация применяется для прогнозирования площади сечений в исходном возрасте и верхней высоты — в возрасте проекции. Затем эти предсказанные показатели используются в качестве регрессоров в уравнениях для проекции площади сечений, прогноза запаса и проекции запаса. По существу экспериментальные данные прогнозировались по методу как ОМНК с предсказанными регрессорами, так и ОЗМНК для приведенной формы. Для всех эндогенных переменных оценки приведенной формы по ОЗМНК дали результаты, сопоставимые с оценками по ОМНК.

Далее предполагалось, что все регрессоры заранее известны. Так, каждая эндогенная переменная левой части уравнений предсказывалась с использованием фактических данных о всех предопределенных переменных и эндогенных переменных правой части уравнений. В этом случае корректно сравнение оценок уравнений, рассчитанных методом ОМНК с использованием фактических регрессоров, с оценками структурной формы уравнений, рассчитанных методом ОЗМНК с использованием факти-

Рис. 8. Бонитетные кривые согласно модели Ф. Шумахера (97) для классов бонитета $SI = 40, 60$ и 80 футов (Borders, Bailey, 1986)



ческих регрессоров. Все пять эндогенных переменных левой части уравнений предсказаны одинаково хорошо по обеим системам.

Оказалось, что модель проекции верхней высоты (расчитанная методом как ОМНК, так и ОЗМНК по приведенной форме) занижает предсказанные значения относительно фактических на 3—4 фута и объясняет лишь около 85 % изменчивости экспериментальных данных. Поскольку верхняя высота “ведет” всю систему моделей прироста, прогноз и проекция площади сечений, а также прогноз и проекция запасов занижают предсказанные значения относительно фактических по методу как ОМНК с использованием предсказанных регрессоров, так и ОЗМНК с приведенной формой. Бонитетные кривые высота — возраст Ф. Шумахера слишком “плоские”, и большая часть предсказанных значений прироста высоты приходится на возраст, меньший 15 лет (рис. 8). Это можно отнести и к природе функциональной формы модели, и к самому массиву данных. Большинство данных, использованных для расчета этой модели, варьируют в возрасте от 2 до 17 лет с двумя-тремя повторными переучетами и не обеспечивают адекватной оценки асимптотических параметров. Однако модель была принята Б. Бордерсом и Р. Бейли (Borders, Bailey, 1986) не столько для оперативного использования, сколько для разработки и иллюстрации метода расчета уравнений.

2.3.4. ПРОДВИНУТЫЕ ВАРИАНТЫ ЛИНЕЙНОГО МЕТОДА ЗМНК ДЛЯ РАСЧЕТА ОДНОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМ УРАВНЕНИЙ

В предыдущих разделах рассмотрены три метода расчета системы связанных уравнений — метод псевдонесвязанных регрессий (МПНР) (Zellner, 1962; Gallant, 1975), 2МНК и 3МНК. Из них

МПНР учитывает только одновременную (одномоментную) корреляцию, 2МНК — только смещение на “одновременность” и 3МНК (объединяя в себе 2МНК и МПНР) — как смещение на “одновременность”, так и одномоментную корреляцию. Применение названных трех методов предполагает, что ошибки отдельных уравнений независимы и идентично распределены.

Если последнее условие не выполняется, оценки коэффициентов уравнений остаются статистически состоятельными (устойчивыми) и по мере увеличения объема выборки приближаются к истинным значениям. Однако оценки дисперсий коэффициентов при этом смещены и несостоятельны и доверительные интервалы для коэффициентов и для среднего предсказанного значения зависимой переменной неточны (LeMay, 1990).

2.3.4.1. Метод минимальной функции потерь

В качестве одной из альтернатив названных трех методов применена оценка параметров системы связанных уравнений сбег и объема ствола с минимизацией функции потерь (Reed, 1982; Reed, Green, 1984; Byrne, Reed, 1986). Г. Буркхарт и П. Спринц (Burkhart, Sprinz, 1984) рассчитали систему уравнений (65) и (66) А. Салливана и Дж. Клаттера (Sullivan, Clutter, 1972) с помощью процедуры, которая учитывала ограничение

$$a_1 = b_4/b_3; a_2 = b_5/b_3$$

и минимизировала следующую функцию потерь

$$F = \frac{\sum (V_i - \hat{V}_i)^2}{\hat{\sigma}_V^2} + \frac{\sum (B_i - \hat{B}_i)^2}{\hat{\sigma}_B^2},$$

где V_i и \hat{V}_i — фактические и предсказанные запасы древостоя в момент времени i ; B_i и \hat{B}_i — фактические и предсказанные площади сечений в момент времени i ; $\hat{\sigma}_V^2$ — средняя квадратическая ошибка при расчете параметров модели (66) методом ОМНК; $\hat{\sigma}_B^2$ — средняя квадратическая ошибка при расчете параметров модели (65) методом ОМНК. Однако результирующие оценки не были устойчивыми и эффективными и зависели от произвольно выбранной функции потерь квадратической ошибки.

П. Ван-Дейзен (Van Deusen, 1988) проанализировал метод минимальной функции потерь в связи с методом МПНР, однако при этом не учитывал смещение на “одновременность”; а для минимизации функции потерь необходим нелинейный подход.

2.3.4.2. Метод вспомогательной переменной

Б. Бордерс (Borders, 1989) предложил модифицированный метод ЗМНК, при котором на первом шаге используются вспомогательные (или “инструментальные”) переменные, а на третьем шаге — генерализованный метод наименьших квадратов (линейный или нелинейный) с учетом преимуществ последовательного характера системы уравнений роста и прироста. В качестве исходной он взял модифицированную систему уравнений Дж. Клаттера (Clutter, 1963):

$$\left. \begin{aligned} \ln V_1 &= b_0 + b_1 S + b_2/A_1 + b_3 \ln B_1 \\ \ln B_2 &= A_1/A_2 \ln B_1 + a_0 (1 - A_1/A_2) + a_1 S (1 - A_1/A_2) \\ \ln V_2 &= \ln V_1 + b_2 (1/A_2 - 1/A_1) + b_3 (\ln B_2 - \ln B_1) \end{aligned} \right\}, \quad (102)$$

где обозначения те же, что в уравнениях (63)—(65).

На первый взгляд, это простая рекурсивная система, для оценки параметров которой можно применить ОМНК. Однако, если последующий анализ показывает, что между компонентами ошибки имеются межрегрессионные корреляции, то ни метод ОМНК, ни модификация его А. Цельнером не дадут самых эффективных оценок параметров. Это происходит потому, что эндогенные переменные правой части уравнений могут коррелировать с компонентами ошибки эндогенных переменных левой части, и, таким образом, эта система не является рекурсивной по определению. Чтобы исключить смещение наименьших квадратов и учесть межрегрессионные корреляции, можно использовать ЗМНК. Однако метод 2МНК (как составная часть метода ЗМНК) использует все предопределенные переменные в регрессиях первого шага, чтобы устранить “эндогенность” эндогенных переменных правой части и тем самым устранить смещение наименьших квадратов (Pindyck, Rubenfeld, 1981; Dutta, 1975). Поэтому, даже если форма каждого уравнения известна, регресси-

ей первого шага она игнорируется и тем самым допускается возможность существенных смещений на этом первом шаге за счет спецификации модели.

Лесные биометристы обычно работают с моделями, по своей природе рекурсивными, подобными, например, (102) (наличие последовательных взаимосвязей между некоторыми уравнениями), но тем не менее обнаруживающими межрегрессионные корреляции компонентов ошибки, хотя имеются и исключения из этого правила (см. раздел 2.4). Для такого типа рекурсивных регрессионных систем Б. Бордерс (Borders, 1989) предложил трехшаговую процедуру оценки параметров:

- шаг 1 — оценить коэффициенты каждого уравнения с использованием двушагового метода вспомогательной переменной (но не традиционного 2МНК);
- шаг 2 — рассчитывать матрицу межрегрессионной ковариации с использованием остатков по шагу 1;
- шаг 3 — применять генерализованный метод наименьших квадратов с учетом коррелированных компонентов ошибки.

Шаг 1 выполняется с использованием преимуществ последовательных взаимосвязей внутри системы, т. е. уравнения, не имеющие эндогенных переменных в первой части, рассчитываются в первую очередь с использованием ОМНК. Далее, уравнения с эндогенными переменными в правой части рассчитываются по ОМНК с использованием предсказанных значений эндогенных переменных правой части взамен их фактических значений. Это так называемый **метод вспомогательной переменной**, служащий той же цели, что и метод 2МНК: устранению “эндогенности” эндогенных переменных правой части (Fox, 1968). Шаги 2 и 3 представляют собой прямое применение стандартного приема, использованного А. Цельнером (Zellner, 1962). Такой метод подгонки обладает тем преимуществом, что в регрессиях шага 1 применяются формы модели, основанные на нашем понимании основополагающих теоретических положений, а также учитываются межрегрессионные корреляции. В итоге получаем оценки, которые являются теоретически предпочтительными.

Очевидно, поскольку шаг 1 этой трехшаговой процедуры подгонки представляет собой просто метод вспомогательной пе-

ременной, результирующие оценки параметров устойчивы (Fomby et al., 1984). Цель, которую преследовал Б. Бордерс (Borders, 1989) при использовании метода вспомогательной переменной, — заменить переменные правой части, которые могут коррелировать с компонентами ошибки, вспомогательными переменными (“инструментами”), которые тесно коррелируют с фактическими переменными правой части, но не коррелируют с компонентами ошибки.

Понимая, что метод 2МНК, определяющий регрессии шага 1 включением всех predetermined переменных системы, является сам по себе просто методом вспомогательной переменной, можно полагать, что “инструменты”, использованные на шаге 1 изложенной процедуры подгонки, будут иметь преимущество перед “инструментами” 2МНК, если они более тесно коррелированы с исходными переменными правой части. Предсказанные эндогенные переменные правой части, полученные методом, описанным на шаге 1, должны быть более тесно коррелированы с их фактическими значениями, поскольку смещение за счет спецификации модели должно быть меньше, чем в выше изложенной процедуре 2МНК. Суть в том, что поскольку лесные моделиеры обычно уверены в правильной спецификации формы модели и системы уравнений часто последовательны во времени, то для получения “инструментов” следует использовать эти модельные формы.

Для оценки коэффициентов в системе (102) Б. Бордерсом (Borders, 1989) использованы данные повторных перечетов непрореженных плантаций сосны Эллиота в Южной Африке, о которых ранее упоминали Л. Пиенар и Б. Шивер (Pienaar, Shiver, 1986). Подгонка осуществлена с использованием процедуры SYSNLIN программы SAS (SAS..., 1984). Оценки параметров системы (102) согласуются с имеющимися данными о ростовых взаимосвязях в плантациях сосны и обеспечивают совместимость между уравнениями прогноза и проекции запаса и уравнением проекции площади сечений (табл. 14). В этой системе имела место довольно высокая межрегрессионная корреляция между компонентами ошибки (табл. 15).

Изложенную процедуру подгонки Б. Бордерс (Borders, 1989) применил далее к большой системе, включающей в себя как линейные, так и нелинейные уравнения:

Таблица 14

Оценки параметров для системы (102), полученные методом вспомогательной переменной

Параметр	Оценка	Стандартная ошибка
b_0	3,562	0,363
b_1	0,007	0,004
b_2	-9,939	0,293
b_3	0,921	0,027
a_0	6,433	1,062
a_1	-0,010	0,014*

* a_1 не значима в этом массиве данных вследствие ограниченного диапазона классов бонитета.

Таблица 15

Матрица межрегрессионной корреляции остатков системы (102)

	$\ln V_1$	$\ln V_2$	$\ln B_2$
$\ln V_1$	1	0,760	-0,035
$\ln V_2$		1	0,449
$\ln B_2$			1

Таблица 16

Оценки параметров для системы уравнений (103), полученные методом вспомогательной переменной

Параметр	Оценка	Стандартная ошибка	Параметр	Оценка	Стандартная ошибка
γ_1	0,062	0,001	b_4	3,066	0,120
γ_2	1,113	0,016	b_5	0,864	0,231
c_1	-2,029	0,081	b_6	-0,138	0,007
c_2	0,00002	$1,14 \cdot 10^{-5}$	b_7	2,296	0,197
c_3	3,235	0,089	a_0	-1,233	0,063
b_0	-0,651	0,143	a_1	0,019	0,008
b_1	-25,09	1,105	a_2	1,190	0,022
b_2	0,225	0,010	a_3	0,865	0,016
b_3	0,979	0,035			

$$\left. \begin{aligned}
 H_2 &= H_1 \left[\frac{(1 - e^{\gamma_1 A_2})}{(1 - e^{\gamma_1 A_1})} \right]^{\gamma_2}, \\
 N_2 &= \left\{ N_1^{c_1} + c_2 \left[(A_2/100)^{c_3} - (A_1/100)^{c_3} \right] \right\}^{1/c_1}, \\
 \ln B_1 &= b_0 + b_1 (1/A_1) + b_2 \ln N_1 + b_3 \ln H_1 + b_4 \ln N_1/A_1 + \\
 &\quad + b_5 \ln H_1/A_1 + b_6 (N_1/N_A) (A_1/A_1), \\
 \ln V_1 &= a_0 + a_1 \ln N_1 + a_2 \ln H_1 + a_3 \ln B_1, \\
 \ln B_2 &= \ln B_1 + b_1 (1/A_2 - 1/A_1) + b_2 (\ln N_2 - \ln N_1) + \\
 &\quad + b_3 (\ln H_2 - \ln H_1) + b_4 (\ln N_2/A_2 - \ln N_1/A_1) + \\
 &\quad + b_5 (\ln H_2/A_2 - \ln H_1/A_1) + b_6 (N_1/N_A) \left[(A_1/A_2) - (A_1/A_1) \right], \\
 \ln V_2 &= \ln V_1 + a_1 (\ln N_2 - \ln N_1) + a_2 (\ln H_2 - \ln H_1) + a_3 (\ln B_2 - \ln B_1),
 \end{aligned} \right\} (103)$$

где H_i — верхняя высота древостоя в момент времени i , м; N_i — число деревьев на 1 га в момент i ; N_1 — число деревьев на 1 га, удаленных при прореживании в возрасте A_1 ; N_A — число деревьев на 1 га, оставшихся после прореживании в возрасте A_1 ; A_1 — возраст последнего прореживания, лет.

Когда система уравнений нелинейна по параметрам, для получения их оценок применяются методы итерационного поиска. Пока нет полной теории подгонки нелинейных систем связанных уравнений. Тем не менее подход А. Цельнера (Zellner, 1962), модифицированный применительно к таким системам А. Галлантом (Gallant, 1975), показал, что он дает строго устойчивые оценки, которые при наличии межрегрессионных корреляций являются асимптотически эффективными.

Система (103) рассчитана по большому массиву данных из 604 перечетов в прореженных и непрореженных древостоях сосны Эллиота с использованием изложенной выше процедуры. Как видно из табл. 16, все оценки параметров логически приемлемы и обеспечивают совместимость уравнений. Как и система (102), расширенная система (103) также обнаружила сравнительно тесные корреляции между компонентами ошибки (табл. 17). Интуитивно это имеет следующий смысл: если, например, для данного древостоя завышается прогноз площади сечений, то следует ожидать и завышения запаса. Оценки параметров сошлись после трех итераций на шаге 1 (ОМНК) процедуры подгонки и после семнадцати — на шаге 3 (модификация А. Галланта, 1975).

Таблица 17

Матрица межрегрессионной корреляции остатков системы (103)

	lnB ₁	lnB ₂	lnV ₁	lnV ₂	H ₂	N ₂
lnB ₁	1	0,66	0,90	0,59	0,19*	-0,10*
lnB ₂		1	0,61	0,91	0,43	0,38
lnV ₁			1	0,67	0,21*	-0,10*
lnV ₂				1	0,54	0,35
H ₂					1	0,27
N ₂						1

* Все корреляции достоверно отличаются от нуля на уровне 0,01, за исключением отмеченных звездочкой.

Б. Бордерс (Borders, 1989) полагает, что оценки параметров, полученные по описанной выше процедуре, устойчивы и асимптотически эффективны для нелинейных систем уравнений. Это происходит потому, что на шаге 1 использованы “инструменты”, тесно коррелированные с фактическими эндогенными переменными правой части уравнений, после чего применена нелинейная модификация А. Галланта, которая (как уже отмечалось) дает строго устойчивые и асимптотически эффективные оценки при наличии межрегрессионных корреляций. Для оценки параметров таких нелинейных систем можно использовать нелинейные двух- или трехшаговые методы наименьших квадратов. Однако правильный выбор “инструментов” является решающим при получении эффективных оценок. Известно, что такой выбор сделать очень трудно и он зависит от характера нелинейности системы. Следовательно, представленная Б. Бордерсом (Borders, 1989) процедура подгонки является теоретически обоснованной альтернативой нелинейным методам 2МНК и 3МНК для выборок большого объема.

В целом Б. Бордерсом рассмотрены смещения на “одновременность” и одномоментная корреляция, однако статистические особенности метода подгонки (устойчивость, эффективность, несмещенность оценок) им не обсуждались. Как при методе минимальной функции потерь ошибки, так и при методе вспомогательной переменной, предполагалось, что ошибки отдельных уравнений независимы и одинаково распределены.

2.3.4.3. Многошаговый метод наименьших квадратов (ММНК)

При построении моделей роста и прироста древостоев по данным переучетов на постоянных пробных площадях не было выявлено гетеросцедастичной структуры ошибок, т. е. структуры ошибок, имеющей дисперсию, которая существенно зависит от другой случайной величины. Предыдущие работы показали, что автокорреляция как результат повторяющихся измерений на одной и той же единице выборочного учета (пробной площади) с течением времени не влияет отрицательно на оценки параметров методом наименьших квадратов во всех практических приложениях (Elston, Grizzle, 1962; Swindel, 1968; Sullivan, 1969; Sullivan, Clutter, 1972; Borders, Bailey, 1986).

Тем не менее в эконометрической литературе представлены альтернативные МПНР, 2МНК и 3МНК методы подгонки коэффициентов систем уравнений, в которых элементы ошибок отдельных уравнений сериально (последовательно) коррелированы. Р. Парксом (Parks, 1967) описан линейный метод наименьших квадратов для подгонки уравнений системы, которая была одновременно коррелированной, но не одновременной (псевдонесвязанная регрессия) и в которой элементы ошибок отдельных уравнений сериально коррелированы. Он ограничил структуру ошибок автокорреляцией первого порядка в пределах уравнения и предложил подход для автокорреляции второго порядка. При этом сериальная корреляция элементов ошибок между уравнениями не учитывалась.

Г. Гилки и П. Шмидт (Guilkey, Schmidt, 1973) разработали метод подгонки, подобный методу Р. Паркса, но в их модель включена сериальная корреляция элементов ошибки между уравнениями. Для одновременных систем уравнений, в которых элементы ошибок отдельных уравнений сериально коррелированы, Р. Фэйр (Fair, 1984) описал нелинейную процедуру наименьших квадратов для отдельных уравнений, которая дает устойчивые оценки коэффициентов и их дисперсий. Но расширение методики на одновременную подгонку всех уравнений для учета одновременной корреляции (системная подгонка) им не дано.

Обсуждение нескольких определителей (отдельных уравнений и их системы) для одновременных уравнений с сериально коррелированными элементами ошибок приведено в работе М. Уикенса (Wickens, 1969). Он также установил, что метод

ЗМНК можно модифицировать для серийно коррелированных элементов ошибок так, чтобы он давал устойчивые и эффективные оценки коэффициентов в случае, если можно получить устойчивую оценку ковариационной матрицы ошибок системы. Однако он не дал метода получения этой устойчивой оценки ковариационной матрицы ошибок.

Для системы уравнений с гетеросцедастичными элементами ошибок в отдельных уравнениях разработано несколько методов подгонки. Для систем псевдонесвязанных регрессий с гетеросцедастичными элементами ошибок в отдельных уравнениях В. Сривастава и Д. Гайлс (Srivastava, Giles, 1987) описали линейный метод наименьших квадратов для случаев, когда выборочные данные можно сгруппировать так, чтобы каждая выборка отдельной группы имела одну и ту же дисперсию. Видимо, методы, предназначенные для отдельного уравнения, такие как взвешенный метод наименьших квадратов или метод Х. Уайта (White, 1980), могут быть применены и к системам уравнений. Дж. Крэг (Cragg, 1983) описал метод для отдельных уравнений с гетеросцедастичностью неизвестного вида. Он показал, что его процедуру можно применить к одновременным, одномоментно коррелированным системам уравнений, однако не привел примеров такого применения.

Р. Ингл (Engle, 1982) и Дж. Крэг (Cragg, 1982) разработали метод оценки коэффициентов отдельных уравнений с серийной корреляцией и гетеросцедастичностью. В качестве альтернативы Т. Грегуар (Gregoire, 1987) предложил исходное преобразование для исключения и автокорреляции, и гетеросцедастичности. Тем не менее методов для одновременных, одномоментно коррелированных систем уравнений с серийно коррелированными и гетеросцедастичными элементами ошибок не разработано.

В. Лемэй (LeMay, 1988, 1990) предложил **многошаговый метод наименьших квадратов** (ММНК) для подгонки одновременной, одномоментно коррелированной системы линейных уравнений с обобщенной структурой ошибок, в которой элементы ошибок отдельных уравнений не являются независимыми и одинаково распределенными. ММНК представляет собой линейный метод подгонки системы уравнений, разработанный на основе метода Р. Паркса (Parks, 1967) для серийно коррелированной системы псевдонесвязанных регрессий и генерализованного метода наименьших квадратов, предложенного А. Цельнером

(Zellner, 1962). Метод дает устойчивые оценки ковариационной матрицы ошибок для системы уравнений в виде произведения матриц преобразования для каждого уравнения и оценки матрицы одномоментной ковариации — для системы. Поэтому метод гибок в том смысле, что может быть применен к системам с гетеросцедастичными элементами ошибок или с сериально коррелированными элементами ошибок (или с теми и другими) для нахождения устойчивых оценок коэффициентов и их дисперсий при условии описания структуры ошибок. Оценки коэффициентов являются асимптотически нормально распределенными. Использован линейный подход, так что получаемое решение — единственное. При нелинейном подходе (например при оценке по максимальному правдоподобию) результирующее решение может давать скорее локальный минимум, чем глобальный. Кроме того, ММНК является линейным методом, который менее чувствителен к спецификации ошибки и к наличию мультиколлинеарности (взаимной корреляции независимых переменных), чем метод максимального правдоподобия (Summers, 1965). Ограничения ММНК: уравнения системы должны быть линейными и объемы выборок — равными для всех уравнений. Кроме того, для расчета доверительных интервалов и проверки гипотез требуются выборки большого объема, поскольку оценки коэффициентов и их дисперсий устойчивы, но смещены.

В. Лемэй (LeMay, 1988, 1990) дает описание применения ММНК для специфицированных структур ошибок, включающих в себя гетеросцедастичность элементов ошибок каждого уравнения системы, автокорреляцию первого порядка этих элементов и автокорреляцию первого порядка вместе с гетеросцедастичностью. Предусмотрено тестирование на гетеросцедастичность и сериальную корреляцию. С математическими основами применения ММНК можно ознакомиться в работах В. Лемэя (LeMay, 1988, 1990). Здесь же мы ограничимся показом метода на конкретном примере — системе уравнений для оценки объема ствола дерева (LeMay, 1990).

Для оценки общего объема ствола разработано множество методов и моделей. Обычно используется традиционная зависимость объема ствола от диаметра на высоте груди в коре и высоты дерева. Однако измерение высоты дерева — процедура трудоемкая и нетехнологичная. В качестве альтернативы высо-

та может быть оценена по ее связи с диаметром, тогда получаем систему двух связанных уравнений:

$$h = a_{11} + a_{12}d + a_{13}d^2 + e_1, \quad (104)$$

$$\downarrow$$

$$v = a_{21} + a_{22}(d^2h) + e_2, \quad (105)$$

где h — высота дерева, м; d — диаметр на высоте груди, см; v — объем ствола в коре, м³. Данные секционного обмера ста стволов сосны скрученной получены Лесной службой Альберты (Канада).

На шаге 1 процедуры устраняется смещение на “одновременность” как следствие того, что переменная высоты дерева имеется и в правой, и в левой части системы. Поскольку объема ствола нет в правой части обоих уравнений, расчет высоты дерева выполнен по уравнению только шага 1:

$$h_{1s} = 0,584579 + 1,071239d - 0,009644d^2. \quad (106)$$

Все экзогенные переменные системы находятся в уравнении высот, поэтому рассчитанное уравнение шага 1 (106) представляет собой обыкновенную линейную множественную регрессию. В правой части уравнения высот нет эндогенных переменных, поэтому уравнение высот шага 2 то же самое, что уравнение шага 1 (106). Для объема ствола рассчитано уравнение шага 2

$$v_{2s} = 0,010012 + 3,57027 \cdot 10^{-5} d^2 h_{1s}, \quad (107)$$

где h_{1s} — значение высоты, полученное расчетом уравнения шага 1 (106) по задаваемой величине d . Для выбора матриц преобразования по каждому уравнению выполнен анализ остатков уравнения шага 2 (107). Поскольку данные не повторяются во времени, остатки на сериальную корреляцию в уравнениях не анализировались. Для проверки на гетеросцедастичность элементов ошибок построены графики остатков в зависимости от расчетных значений эндогенных переменных. Для уравнения высот какой-либо взаимосвязи между названными показателями на графике не выявлено, тогда как для уравнения объемов некоторая связь была.

Далее определен статистический критерий на гетеросцедастичность (СКГ) (Goldfeld, Quandt, 1965) в следующей последова-

тельности. Вначале выполнена сортировка модельных деревьев в возрастающем порядке по величине объема, рассчитанного по (107). Затем установлены отдельные регрессии для первых 40 и последних 40 модельных деревьев и определена величина СКГ по соотношению

$$\text{СКГ} = \text{MSE}_2 / \text{MSE}_1, \quad (108)$$

где MSE_2 — среднеквадратическая ошибка регрессии, рассчитанной по последним 40 деревьям; MSE_1 — то же, по первым 40 деревьям. При нулевой гипотезе на однородность дисперсий СКГ представлен как F -распределение с 38 степенями свободы и для числителя, и для знаменателя. Для уравнивания объемов шага 2 СКГ составил 20,8507 и был значим на уровне 0,05. Поэтому элементы ошибок уравнения объемов являются гетеросцедастичными.

Элементы ошибок уравнения высот независимы и одинаково распределены, поэтому матрица преобразования представляла собой просто единичную матрицу (матрицу тождеств). Для уравнения объемов матрица преобразования получена путем оценки дисперсий каждого элемента ошибки ($\hat{\sigma}_{2m}^2$) уравнения объемов по следующей зависимости:

$$\hat{\sigma}_{2m}^2 = \exp(-5,302447 + 1,832138 \ln v_{2r}), \quad (109)$$

где $\hat{\sigma}_{2m}^2$ — дисперсия ошибки для m -й выборки и для второго уравнения системы; v_{2r} — расчетный объем ствола по уравнению (107). Проверено несколько моделей для оценки дисперсий элементов ошибки и выбрана модель (109), поскольку квадраты остатков связаны с расчетным значением объема и график остатков от подгонки преобразованного уравнения объемов шага 2 не выявил их гетеросцедастичности. Кроме того, величина СКГ для преобразованного уравнения близка в величине СКГ, означающей гомосцедастичные дисперсии элементов ошибки.

Преобразованные уравнения шага 2 имели вид

$$h_{2r} = 0,584579 + 1,071239d - 0,009644d^2, \quad (110)$$

$$v_{2r}(wt) = 0,001838(wt) + 3,68969 \cdot 10^{-5} d^2 h_{1s}(wt), \quad (111)$$

где (wt) — обратная величина расчетного стандартного отклонения элемента ошибки $(wt) = 1/\hat{\sigma}_{2m}$; $v_{2r}(wt)$ — общий объем ствола,

умноженный на (wt) ; $d^2h_{1s}(wt)$ — квадрат диаметра, умноженный на расчетную высоту по уравнению шага 1, умноженную на (wt) . Затем оценены одномоментные ковариации по остаткам преобразованных уравнений шага 2. Результирующая оценка матрицы одномоментных ковариаций имела вид

$$\hat{\Sigma} = \begin{bmatrix} 6,6046 & 4,2958 \\ 4,2958 & 3,9005 \end{bmatrix}, \quad (112)$$

где диагональные элементы — это дисперсии для уравнений соответственно высот и взвешенных объемов и ковариация между элементами ошибки уравнения высот и уравнения взвешенных объемов представлена внедиагональными элементами. Ковариационная матрица расчетных ошибок для системы уравнений равнялась произведению матрицы одномоментных ковариаций и матриц взвешивания:

$$\hat{\Omega} = \begin{bmatrix} 6,6046 W_1 W_1' & 4,2958 W_1 W_2' \\ 4,2958 W_2 W_1' & 3,9005 W_2 W_2' \end{bmatrix}. \quad (113)$$

Поскольку уравнение высот имело независимые и одинаково распределенные элементы ошибок, W_1 равно единичной матрице размера $n \times n$. Матрица W_2 — это $n \times n$ -матрица с диагональными элементами, равными корню квадратному из расчетных дисперсий элементов ошибки для уравнения объемов шага 2 ($\hat{\sigma}_{2m}$), и внедиагональными элементами, равными нулю. Отсюда упрощенная ковариационная матрица ошибок имела вид:

$$\hat{\Omega} = \begin{bmatrix} 6,6046 I_n & 4,2958 W_2 \\ 4,2958 W_2 & 3,9005 W_2 W_2' \end{bmatrix}. \quad (114)$$

Окончательный вид уравнений, рассчитанных по ММНК,

$$h_{\text{ММНК}} = -0,387283 + 1,105945d - 0,009356d^2, \quad (115)$$

$$v_{\text{ММНК}} = 0,000102 + 3,718304 \cdot 10^{-5} d^2 h_{1s}. \quad (116)$$

Система уравнений (104) и (105) также рассчитана по ЗМНК. В табл. 18 приведены расчетные коэффициенты и соответствую-

Таблица 18
Сопоставление оценок коэффициентов и их дисперсий уравнений (104)
и (105) по методам ЗМНК и ММНК

Коэффициент	ЗМНК		ММНК	
	Оценка	Дисперсия	Оценка	Дисперсия
a_{11}	-0,032804	1,742595	-0,387283	1,871902
a_{12}	1,123254	0,011856	1,105945	0,011313
a_{13}	-0,010619	$4,947844 \cdot 10^{-6}$	-0,009356	$3,683143 \cdot 10^{-6}$
a_{21}	0,009934	$1,335041 \cdot 10^{-4}$	0,000102	$3,724693 \cdot 10^{-6}$
a_{22}	$3,570422 \cdot 10^{-4}$	$4,455235 \cdot 10^{-13}$	$3,718304 \cdot 10^{-5}$	$3,942582 \cdot 10^{-13}$

ющие дисперсии в сопоставлении по ЗМНК и ММНК. Коэффициенты, рассчитанные по этим методам, аналогичны, за исключением свободных членов уравнений a_{11} и a_{21} . Это вполне естественно, поскольку ЗМНК дает устойчивые оценки коэффициентов, даже если элементы ошибок отдельных уравнений не являются независимыми и одинаково распределенными. Дисперсии коэффициентов уравнения высот, подогнанных по двум методам, также аналогичны. Этого тоже следовало ожидать, поскольку элементы ошибок уравнения высот были независимы и одинаково распределены. Дисперсии коэффициентов уравнения объемов, рассчитанные по ЗМНК, выше дисперсий, рассчитанных по ММНК.

Метод ММНК представляет модификацию ЗМНК для более обобщенной структуры ошибок. Преимущество ММНК перед ЗМНК состоит в том, что оценки коэффициентов и соответствующих дисперсий устойчивы и асимптотически нормально распределены. Для выборок большого объема рассчитываются доверительные интервалы и проверяются гипотезы.

Поскольку ЗМНК является расширением методов 2МНК и МПНР, то и ММНК можно рассматривать как расширение тех же двух методов. Если система уравнений не одновременна, то шаг 1 ММНК можно исключить и рассматривать ММНК как расширение метода МПНР при обобщенной структуре ошибки. При сериально коррелированных элементах ошибки ММНК эквивалентен методу Р. Паркса (Parks, 1967). Если одномоментная корреляция незначительна, то последний шаг ММНК можно исключить и рассматривать ММНК как расширение метода 2МНК при обобщенной структуре ошибки. В этом случае при сериаль-

но коррелированных элементах ошибки метод подгонки ММНК является линейным, аналогичным нелинейному методу подгонки отдельного уравнения, использованному Р. Фэйром (Fair, 1984). Подобная интерпретация метода ММНК как расширения метода 2МНК полезна, когда лесоводственная проблема моделируется несколькими уравнениями или когда имеется большой массив экспериментальных данных.

Преимущество метода ММНК перед 3МНК (с точки зрения устойчивости оценок дисперсий) зависит от степени, в которой элементы ошибок отдельных уравнений не являются независимыми и одинаково распределенными. Дж. Крэг (Cragg, 1983) установил, что если гетеросцедастичность явно выражена, то возможны эффективные оценки даже при очень малых выборках. Отсюда следует, что для одновременных уравнений использование ММНК наиболее эффективно в случаях, когда элементы ошибок не являются независимыми и одинаково распределенными (LeMay, 1990).

2.4. ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ СВЯЗАННЫХ УРАВНЕНИЙ ПРИ ОТСУТСТВИИ МЕЖРЕГРЕССИОННОЙ КОРРЕЛЯЦИИ ОШИБОК

Излагаемый ниже пример практического приложения системы связанных уравнений относится скорее к лесозаготовительной, нежели лесоводственной сфере исследований. В этой связи он обладает некоторыми специфическими особенностями, одним из проявлений которых, возможно, является отсутствие межрегрессионной корреляции ошибок, чего не было в изложенных выше лесоводственных приложениях. Хотя вследствие этого процедура оценки уравнений упрощается, в нашем примере важно было показать не столько методическую новизну самой оценки, сколько оригинальность приложения системы связанных уравнений к специфичной области, выполненного Р. Аматейсом с соавторами (Amateis et al., 1984).

Взвешивание автомобильной пачки хлыстов, практикуемое на лесозаготовительных и деревообрабатывающих предприятиях, более объективно, точно и дешевле в сравнении с другими способами учета. Когда деревья стали заготавливать хлыстами, появилась потребность определять объемы различных сортиментов по данным взвешивания пачки хлыстов и оценивать их стоимость.

Соотношения между объемом и массой древесины исследуются давно. Ф. Шумахер (Schumacher, 1946) рассчитывал значения переводного коэффициента как отношения плотного и складочного объемов, а также объема в досковых футах к их массе. Он установил, что переводной коэффициент изменяется обратно пропорционально количеству бревен в весовой единице. К. Роу и С. Гуттенберг (Row, Guttenberg, 1966) вывели стереометрическую формулу зависимости объема пиловочного бревна от его массы и применили ее при определении объема автомобильной пачки бревен, включив в формулу количество бревен в этой пачке. Позднее С. Гуттенберг и К. Фейсик (Guttenberg, Fasick, 1973) и К. Фейсик с соавторами (Fasick et al., 1974) ввели метод регрессионных уравнений для прогнозирования общего запаса в досковых футах, в единицах объема фанерного кряжа и маломмерных пиловочных бревен по числу деревьев в пачке и ее нетто-массе. Они отмечали налпчие проблемы аддитивности оценок, когда общий объем замеренной древесины в пачке не равен суммарной величине объемов сортиментов, полученных по уравнениям.

Р. Аматейс с соавторами (Amateis et al., 1984) предложили альтернативный подход с использованием систем связанных регрессионных уравнений. Для проверки эффективности рекурсивной и взаимозависимой систем уравнений при оценке объемов сортиментов по данным общего взвешивания для каждой рассчитывались уравнения и сопоставлялись с результатами К. Фейсика с соавторами (Fasick et al., 1974). В рекурсивной системе объем каждого отдельного сортимента оценивался по одному — последовательно, начиная с сортимента более высокого качества. Во взаимозависимой системе объемы отдельных сортиментов рассматривались как имеющие случайную встречаемость, без определенного иерархического порядка. Р. Аматейс с соавторами (Amateis et al., 1984) оценивали три сортимента: фанерный кряж, балансы и сортимент для рубки на щепу и распиловки. Объединенные запасы, такие как общий пиловочник (фанерный кряж + сортимент для рубки и пиления) и общий запас (фанерный кряж + сортимент для рубки и пиления + балансы) получали сложением запасов соответствующих отдельных сортиментов. К. Фейсик с соавторами (Fasick et al., 1974) непосредственно оценивали два объединенных запаса и запас фанерного

кряжа, а запасы сортиментов для рубки и пиления и балансов получали путем вычитания.

Экспериментальные данные для моделирования получены по 113 случайно отобраным пачкам хлыстов, поступающих на склад одной из компаний в Ньюберри, Южная Каролина (США). Для каждой пробной пачки хлыстов записывали нетто-массу и число хлыстов. Замеряли диаметры в коре у торца и вершины каждого хлыста, а также через каждые 4,3 фута по его длине. Диаметры без коры рассчитывали регрессионным способом. Каждый отрезок длиной 8,6 фута по стандарту размеров и качества относили к тому или иному сортименту. По формуле Смалиана рассчитан для каждого 4,3-футового отрезка объем без коры в кубических футах. Затем объемы отдельных сортиментов каждой пачки суммировали.

В качестве переменных в регрессионные уравнения вводили показатели, наиболее технологичные для замера в условиях лесосклада и наиболее коррелированные с общими объемами пачки (TOT), пиловочника (STV) и объемом фанерного кряжа (VEN). К. Фейсик с соавторами (Fasick et al., 1974) для оценки TOT, STV и VEN вывели следующие "наилучшие" уравнения (отобранные по наибольшему значению R^2 и наименьшим значениям статистик PRESS и CP):

$$\text{TOT} = b_1 + b_2W, \quad (117)$$

$$\text{STV} = b_3 + b_4W + b_5N^2, \quad (118)$$

$$\text{VEN} = b_6 + b_7W + b_8N + b_9(W/N) + b_{10}(NW)^{1/2}, \quad (119)$$

где W — нетто-масса пачки; N — число хлыстов в пачке. Объем сортимента для рубки и пиления (CNS) получен вычитанием уравнения (119) из (118), а объем балансов (PULP) — вычитанием уравнения (118) из (117).

Аналогичным образом была сформирована "наилучшая" система рекурсивных уравнений из тех же экзогенных переменных (W , N , N^2 , W/N и $(NW)^{1/2}$), только в этом случае зависимая переменная предыдущего уравнения включена в последующее в качестве независимой переменной. Уравнения имели следующий окончательный вид:

Электронный архив УГЛТУ

$$\text{VEN} = b_6 + b_7W + b_8N + b_9(W/N) + b_{10}(NW)^{1/2}, \quad (120)$$

$$\text{CNS} = c_1 + c_2(\text{VEN}) + c_3W + c_4N^2 + c_5(W/N) + c_6(NW)^{1/2}, \quad (121)$$

$$\text{PULP} = c_7 + c_8(\text{VEN}) + c_9(\text{CNS}) + c_{10}W + c_{11}N^2. \quad (122)$$

В уравнение (121) введена эндогенная переменная VEN; а в уравнение (122) — VEN и CNS. Объединенные запасы STV (VEN + CNS) и TOT (VEN + CNS + PULP) получены соответствующим сложением.

Подобным образом специфицирована взаимозависимая система уравнений из экзогенных переменных W , N , N^2 , W/N , $(NW)^{1/2}$ и $(W^2N)^{1/3}$ и эндогенных переменных VEN, CNS и PULP. Получены структурные уравнения:

$$\begin{aligned} \text{VEN} = & d_1 + d_2(\text{CNS}) + d_3(\text{PULP}) + d_4W + d_5N + \\ & + d_6(W/N) + d_7(NW)^{1/2}, \end{aligned} \quad (123)$$

$$\begin{aligned} \text{CNS} = & d_8 + d_9(\text{VEN}) + d_{10}(\text{PULP}) + d_{11}W + d_{12}N^2 + \\ & + d_{13}(W/N) + d_{14}(NW)^{1/2}, \end{aligned} \quad (124)$$

$$\begin{aligned} \text{PULP} = & d_{15} + d_{16}(\text{VEN}) + d_{17}(\text{CNS}) + d_{18}W + \\ & + d_{19}N^2 + d_{20}(W^2N)^{1/3}. \end{aligned} \quad (125)$$

Таким образом, уравнения (123) и (124) имели те же экзогенные переменные, которые вошли в уравнения (120) и (121), а уравнение (125) имело те же экзогенные переменные, что вошли в уравнение (122), за исключением переменной $(W^2N)^{1/3}$, которая введена в (125) для выполнения порядковых и ранговых условий идентифицируемости системы.

Система уравнений (120)—(122) является рекурсивной, только исходя из предварительно обсуждавшихся статистических критериев. Подобное применение рекурсивных уравнений к проблеме оценки объемов сортиментов не предполагает выявления причинных взаимосвязей, как это принято в эконометрическом анализе. Аналогичным образом, (в противоположность эконо-

метрическому анализу) ввод дополнительной переменной во взаимозависимую систему для поддержания ее идентифицируемости допустим, так как цель по существу — прогноз, а не структурный анализ.

Поскольку уравнения (117)—(119), (120)—(122) и (123)—(125) специфицированы, их относительные преимущества по статистическим соображениям оценивались с использованием статистических нормативов надежности. Массив экспериментальных данных в количестве 113 наблюдений случайным отбором разделен на две совокупности и по одним и тем же 57 наблюдениям рассчитаны три прогностические системы: (117)—(119) и (120)—(122) — с использованием ОМНК, а (123)—(125) — на основе ЗМНК. Затем были рассчитаны аналитически выведенные уравнения приведенной формы для (123)—(125), чтобы выразить эндогенные переменные как функцию только экзогенных переменных. Остальные 56 наблюдений использованы для верификации трех наборов уравнений. Приведем критерии сопоставления результатов.

1. **Средний остаток.** Это среднее отклонение прогнозируемых значений от фактических, обеспечивающее оценку смещения модели.
2. **Средний квадратический остаток.** Эта статистика предусматривает оценку среднего квадратического расхождения между прогнозируемыми и фактическими значениями.
3. **Сумма рангов.** Ранжировались прогнозируемые значения по каждой модели. Модели, имеющей предсказанное значение, наиболее близкое к фактическому, присваивался ранг “единицы” по каждому наблюдению. Остальные две модели получали по этому наблюдению нулевой ранг. Затем ранги суммировались. Наилучшей считалась модель с большей суммой рангов.

Сопоставление результатов (табл. 19) показало, что в среднем все три системы лишь незначительно различаются по своим прогностическим возможностям. Однако проверка по сумме рангов свидетельствует, что при оценке всех сортиментов взаимозависимая система дала лучшие результаты в сравнении с двумя другими. Видимо, мало что потеряно в точности при оценке общего пиловочника и общего запаса путем сложения запасов сортиментов в системе (123)—(125) в сравнении с их прямой оценкой по системе уравнений (117)—(119).

Таблица 19
Сравнение систем уравнений (117)—(119), (120)—(122)
и (123)—(125) по трем статистическим критериям

Критерий сопоставления и сортимент	Система уравнений		
	(117)—(119)	(120)—(122)	(123)—(125)
Средний остаток			
Фанерный кряж*	6,27	6,27	5,62
Сортимент для рубки и пиления	-5,26	-6,12	-5,59
Балансы	-8,06	-9,13	-10,56
Общий пиловочник	1,01	0,13	0,03
Общий запас	-7,05	-8,98	-10,53
Среднеквадратический остаток			
Фанерный кряж*	2603,0	2603,0	2646,3
Сортимент для рубки и пиления	2081,7	1765,6	1832,9
Балансы	1674,7	1606,5	1683,3
Общий пиловочник	2502,7	2411,5	2405,2
Общий запас	2035,5	2141,2	2199,0
Сумма рангов предсказанных значений			
Фанерный кряж*	26	26	30
Сортимент для рубки и пиления	22	12	22
Балансы	20	14	22
Общий пиловочник	23	10	23
Общий запас	24	15	17

* Уравнения для объема фанерного кряжа в системах (117)—(119) и (120)—(122) одни и те же, что выразилось в идентичных значениях критериев. Проверка нулевой гипотезы на отдельных коэффициентах каждого уравнения показала, что все они достоверны на уровне значимости 0,05.

Примечание. Остаток рассчитан как предсказанное значение минус фактическое и выражен в куб. футах.

Пересчитана рекурсивная система уравнений по объединенному массиву данных и проверена дисперсионно-ковариационная матрица остатков, чтобы определить, достоверно ли отличаются от нуля недиагональные элементы матрицы, по адаптированному критерию Т. Андерсона (Anderson, 1958):

$$\left[n - \left(\frac{2p+11}{6} \right) \right] \ln \omega \approx \chi_{f, \alpha}^2,$$

где ω — определитель корреляционной матрицы возмущений; n — число наблюдений; p — число эндогенных переменных в си-

стеме; $\chi^2_{f,\alpha}$ — значение критерия “хи-квадрат” при числе степеней свободы $f = \frac{p(p-1)}{2}$ и критерии значимости $\alpha = 0,05$.

$$\left[113 - \left(\frac{2(3) + 11}{6} \right) \right] \ln(0,9982) \sim \chi^2_{3;0,05},$$

$$(113 - 2,833) \ln(0,9982) \sim 7,8147,$$

$$0,1984 < 7,8147.$$

Результаты показали, что предположение о независимости уравнений (120)—(122) в рекурсивной системе справедливо.

В целом Р. Аматейс с соавторами (Amateis et al., 1984) установили, что между тремя подходами практически нет различий, но взаимозависимая система дает несколько лучший результат как для отдельных сортиментов, так и для объединенных запасов. Рекурсивная и взаимозависимая системы теоретически более обоснованные, и имеет смысл предполагать, что запас любого отдельного сортимента, полученный по общей массе пачки хлыстов, зависит от запасов других сортиментов в этой пачке. Рекурсивная и взаимозависимая системы объединяют такую информацию в виде прогностических уравнений. Кроме того, рекурсивные и взаимозависимые уравнения могут быть устойчивее при большем разнообразии исходных данных, особенно когда в систему вводятся дополнительные сортименты.

2.5. ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМ РЕКУРСИВНЫХ УРАВНЕНИЙ ПРИ ТАКСАЦИИ ФИТОМАССЫ ДРЕВОСТОЕВ

Известно, что получение экспериментальных данных о фитомассе лесов несравненно более трудоемко в сравнении с традиционными стереометрическими методами оценки запасов стволовой древесины. Сегодня экологический мониторинг и реализация экологических программ различного уровня определяют необходимость создания баз данных о фитомассе лесов (Усольцев и др., 1995б), для чего нужна нормативная основа в ви-

де многофакторных регрессионных моделей и соответствующих таксационных таблиц.

В предыдущих разделах основное внимание уделено методам оценки параметров связанных уравнений в различных лесоводственных приложениях. Ниже рассмотрены некоторые аспекты применения многовариантных систем рекурсивных (рекуррентных) уравнений при разработке нормативной базы для таксации фитомассы лесов.

2.5.1. РЕКУРСИВНЫЕ ВЗАИМОСВЯЗИ ПРИ АНАЛИЗЕ РЕГИОНАЛЬНОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ФИТОМАССЫ ДРЕВОСТОЕВ

При исследованиях в области таксации фитомассы древостоев до сих пор практикуется публикация результатов той или иной обработки фактических данных в виде уравнений и таблиц, а исходные экспериментальные данные со временем безвозвратно уходят вместе с их обладателями. Тем не менее после разработки того или иного норматива возникает проблема его экстраполяции на прилегающие регионы или регионы, близкие по природным условиям, т. е. проблема, связанная с исследованием географических закономерностей распределения фитомассы лесов в условиях отсутствия исходной базы данных.

В настоящее время для всей территории России разработаны и изданы региональные лесотаксационные нормативы, касающиеся главным образом запасов стволовой древесины. При исследовании географических закономерностей динамики и структуры запасов как стволовой древесины, так и всей фитомассы, приходится иметь дело с огромным региональным разнообразием исходных шкал разрядов высот и классов бонитета, вследствие чего опубликованные данные о фитомассе древостоев разных регионов становятся несопоставимыми. Во многих случаях привести их в сопоставимый вид можно с помощью систем рекурсивных взаимосвязей.

Например, систему уравнений (104) и (105) можно записать в виде

$$\left. \begin{aligned} h &= a_0 + a_1 \ln d \\ \downarrow \\ \ln p_i &= b_0 + b_1 \ln d + b_2 \ln h \end{aligned} \right\}, \quad (126)$$

где p_i — фитомасса i -й фракции дерева (ствола, хвои, ветвей, корней), кг. Первое уравнение системы (126) можно представить как зависимость $h \sim d$ для одного разряда высот. Тогда вся шкала разрядов высот запишется уравнением

$$h = a_0 + a_1 \ln d + a_2 E, \quad (127)$$

где E — порядковый номер разряда высот, и тогда система (126) приводится к виду

$$h = a_0 + a_1 \ln d + a_2 E, \quad (128)$$

$$\downarrow$$

$$\ln p_i = b_0 + b_1 \ln d + b_2 \ln h. \quad (129)$$

Уравнение (129) можно рассматривать как основное, отражающее зависимость фитомассы дерева от определяющих факторов, а уравнение (128) — как вспомогательное, служащее в данном случае для приведения таблиц фитомассы деревьев в сопоставимый вид. Если уравнение (129) действительно для всего аппроксимированного диапазона высот и диаметров независимо от соотношения последних, то (128) — лишь для одного соотношения высот и диаметров, соответствующего данной шкале разрядов высот, и таких шкал может быть несколько. Иными словами, уравнение (129) имеет более общий характер по сравнению с (128), а поскольку одному уравнению (129) может соответствовать несколько уравнений (128), то очевиден **многовариантный** характер рекурсивной системы уравнений (128) и (129) (Усольцев, 1988а). Это ее свойство имеет важный практический смысл: возможность привязки уравнения (129) к любой шкале разрядов высот. Например, протабулировав уравнение (129), выведенное для березы уральского региона, по данным шкалы разрядов высот березовых древостоев Ленинградской области, приводим показатели фитомассы березы Урала и северо-запада России в сопоставимый вид.

Обеспечение **сопоставимости** показателей фитомассы с помощью рекурсивной системы уравнений можно проиллюстрировать и на уровне древостоев, когда сравниваются таблицы хода роста фитомассы древостоев, составленные по разным бонитетным шкалам. Для островных боров Северного Казахстана по данным 64 пробных площадей было выведено уравнение (Усольцев и др., 1995б):

$$\ln P_b = -9,7299 + 4,5818 \ln A - 1,2626 \ln A \ln H_{100} + \\ + 1,9109 \ln H_{100} \ln B - 0,9235 (\ln B)^2; R^2 = 0,706, \quad (130)$$

где P_b — масса ветвей (скелета кроны) сосны в абсолютно сухом состоянии, т/га; H_{100} — класс бонитета, выраженный средней высотой древостоя (м) в базовом возрасте 100 лет по бонитетной шкале М. М. Орлова. Путем подстановки в (130) значения $H_{100} = 21,5$ м модель (130) приведена к частному виду для III класса бонитета, графически представленному поверхностью 1 (рис. 9):

$$\ln P_b = -9,7299 + 0,7081 \ln A + 5,8626 \ln B - 0,9235 (\ln B)^2. \quad (131)$$

В ТХР каждому возрасту древостоя данного класса бонитета соответствует определенное значение площади сечений B , м²/га. В частности, для сомкнутых сосняков островных боров Северного Казахстана (Тургайский прогиб) в III классе бонитета возрастам 20, 40, 60, 80 и 100 лет соответствуют значения B , равные 13,8; 25,1; 31,1; 35,0; 37,7 м²/га (см. рис. 9, кривая 2), что в общем случае описывается зависимостью

$$B = f(A, H_{100}). \quad (132)$$

Путем подстановки перечисленных значений A и B в уравнение (131) получили зависимость массы ветвей на 1 га от возраста для сосняков III класса бонитета, совмещенную с ТХР сосняков островных боров (см. рис. 9, кривая 4). Чтобы сопоставить полученную закономерность возрастного изменения массы ветвей с аналогичными показателями сосняков другого региона (например для ленточных боров Прииртышья) уравнение (130) совмещается с ТХР сосны этих боров, где возрастам 20, 40, 60, 80 и 100 лет в III классе бонитета соответствуют значения B , равные 20,4; 32,1; 35,6; 37,4 и 38,3 м²/га (см. рис. 9, кривая 3). Это уже иная, отличная от ТХР сосны островных боров зависимость (132). Подстановкой ее в (131) получили другую линию роста массы ветвей (см. рис. 9, кривая 5), отличную от кривой 4, которую теперь можно сопоставлять с аналогичной закономерностью, полученной по экспериментальным данным фитомассы в ленточных борах.

Для березняков Северного Казахстана зависимость массы листы P_f (т/га) описана уравнением, в котором переменная B

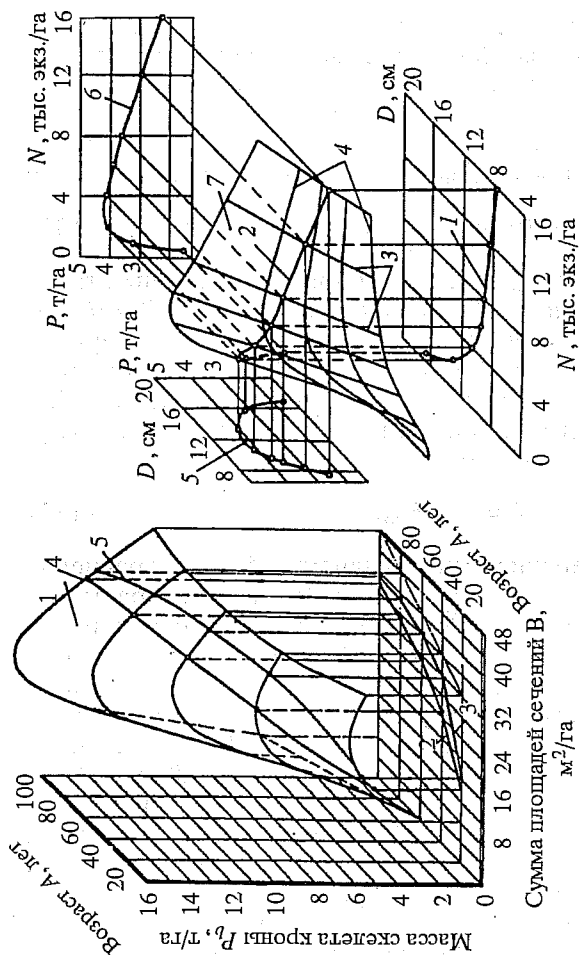


Рис. 9. Геометрическая интерпретация уравнения (130) для III класса бонитета. 1 — поверхность, описываемая уравнением (131). Зависимости $V = f(A)$, замещенные из ТХР сосняков островных (линия 2) и ленточных (линия 3) боров Казахстана, спроецированные на поверхность 1, дают линии соответственно 4 и 5, описывающие возрастные тренды массы скелета кроны при заданных значениях N_{100} и V (Усольцев и др., 1995б)

Рис. 10. Геометрическая интерпретация рекурсивной системы уравнений (133) (поверхность 7) и (134) (линия 1) для массы листьев березовых древостоев III класса бонитета в возрасте 50 лет. 1 — кривая зависимости $D = f(N)$, 2 — проекция линии 1 на поверхность 7, описываемую уравнением $P_f = f(D, N)$, 3 — линии равной густоты, 4 — линии диаметра D , 5 — кривая зависимости $P_f = f(D)$, 6 — кривая зависимости $P_f = f(N)$ (Усольцев, 1988а)

расчленена на две составляющие — средний диаметр D (см) и число стволов на 1 га (N), имеющим общий вид (Усольцев, 1988а)

$$P_f = \varphi(A, H_{50}, D, N), \quad (133)$$

где H_{50} — класс бонитета, выраженный высотой древостоя (м) в базовом возрасте 50 лет по бонитетной шкале М. М. Орлова. Путем подстановки в (133) значения $H_{50} = 16$ м для III класса бонитета уравнение (133) приведено к частному виду, представленному поверхностью 7 (рис. 10). Морфологическая специфика онтоценогенеза конкретного древостоя определяется зависимостью его среднего диаметра D в данном классе бонитета H_{50} от возраста A и текущей густоты N

$$D = \varphi(A, H_{50}, N). \quad (134)$$

Зависимость (134) посредством подстановки в нее значения $A = 50$ лет и $H_{50} = 16$ м приведена к частной зависимости $D \sim N$, представленной кривой 1 (см. рис. 10), проецированием которой на поверхность 7 получены зависимости $P_f = f(D)$ и $P_f = f(N)$. Для разных регионов зависимости (134), как и ТХР, будут специфичными. Путем подстановки их в (133) обеспечивается сопоставимость показателей массы листвы березы разных регионов.

2.5.2. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕКУРСИВНОЙ СИСТЕМЫ УРАВНЕНИЙ ДЛЯ КОРРЕКТНОЙ СПЕЦИФИКАЦИИ МОДЕЛИ

Свойство многовариантности можно показать также на примере рекурсивной системы, использованной при составлении таблицы объемов ветвей березы Северного Казахстана (Усольцев, 1988а). В этом случае основное уравнение для объема ветви v (без учета ответвлений более высоких порядков) имеет всеобщий характер, поскольку представляет функциональную стереометрическую зависимость

$$v = (\pi/4)L \cdot f_n \cdot d_{0,1}^2, \quad (135)$$

где L — длина ветви, м; f_n — нормальное видовое число; $d_{0,1}$ — диаметр на 1/10 длины ветви, см.

Вспомогательные уравнения, аппроксимирующие экспериментальные данные

$$f_n = 0,505 - 0,048/L; R^2 = 0,910, \quad (136)$$

$$d_{0,1} = 0,218 + 0,852d_0, R^2 = 0,994 \quad (137)$$

(где d_0 — диаметр у основания ветви, см), имеют стохастическую природу и действительны только для диапазона значений f_n , L , $d_{0,1}$ и d_0 , характеризующих исследуемую совокупность ветвей. По существу система уравнений (135)—(137) в данном случае служит цели **спецификации** модели объема ветвей, т. е. корректного формирования ее структуры с учетом основополагающих зависимостей. Подставив (136) и (137) в функциональную зависимость (135), получим уравнение

$$v = (0,505L - 0,0377)(0,218 + 0,852d_0)^2, \quad (138)$$

на основе которого составлена таблица объемов ветвей (типа баварской для стволов) по двум легко измеряемым показателям — длине ветви и диаметру у ее основания (Усольцев, 1985а).

2.5.3. СИСТЕМЫ РЕКУРСИВНЫХ УРАВНЕНИЙ ПРИ МНОГОЦЕЛЕВОМ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ОЦЕНОЧНОЙ МОДЕЛИ ФИТОМАССЫ

Иногда свойство многовариантности рекурсивной модели обеспечивает ее **многоцелевое** назначение. Как и всякие модели, многомерные регрессии обладают той особенностью, что отражают субъективные представления их автора о природе исследуемого явления. Эта субъективность при подборе структуры регрессионной модели проявляется в ранжировании приоритетов независимых переменных, или определяющих факторов, включаемых в модель. Часто в модели прикладного характера отбор этих факторов определяется не столько субъективным видением исследователя, сколько целевой постановкой задачи. В любом случае в лесоводственных исследованиях постоянно возникают ситуации, когда регрессия, рассчитанная по такому набору факторов, не может быть использована на практике (например при составлении нормативов таксации) только потому, что на новом объекте (или в другое время) регистрировались иные определяющие факторы, как правило, в той или иной мере коррелирующие с независимыми переменными упомянутой модели. В таком случае необходим расчет дополнительных уравнений, в которых независимые переменные упомянутой модели выступа-

ют в качестве зависимых переменных как функций определяющих факторов на новом объекте или на том же объекте, но в изменившейся ситуации.

Так, для саксаульников юга Казахстана, произрастающих на площади около 12 млн га, получена регрессионная модель вида (Усольцев, 1985а)

$$\ln p_0 = a_0 + a_1 \ln d_0 + a_2 \ln d_{cr} + a_3 \ln h, \quad (139)$$

где p_0 — общая масса дерева; d_0 — диаметр корневой шейки; d_{cr} — диаметр кроны; h — общая высота дерева. С использованием шкалы разрядов высот в качестве вспомогательной зависимости

$$h = f(d_0, E) \quad (140)$$

составлена трехходовая (d_{cr} , h , d_0) таблица общей фитомассы деревьев по разрядам высот.

С переходом от наземных методов лесоинвентаризации к дистанционным регрессионная модель (139) и соответствующий ей норматив оказались непригодными, поскольку содержали “лишний” фактор — диаметр корневой шейки, не дешифрируемый при таксации с использованием аэрокосмической съемки. Поэтому было выведено вспомогательное уравнение

$$\ln d_0 = a_0 + a_1 \ln d_{cr} \quad (141)$$

и получена рекурсивная система уравнений

$$\left. \begin{array}{l} d_0 = f(d_{cr}) \\ \downarrow \\ h = f(d_0, E) \\ \downarrow \\ p_0 = f(d_0, d_{cr}, h) \end{array} \right\}, \quad (142)$$

последовательным табулированием которой по задаваемым ступеням диаметра кроны в направлении, указанном стрелками, составлена двухходовая (d_{cr} и h) таблица фитомассы деревьев по разрядам высот.

Таким образом, одна и та же модель для оценки фитомассы саксаула (139) стала основой двух таблиц, из которых одна слу-

жит для наземной, а вторая — для дешифровочной таксации. Проверка тех и других Казахским лесоустроительным предприятием не выявила существенных расхождений результатов, полученных наземным и дешифровочным способами таксации (Усольцев, 1988а).

2.5.4. РЕКУРСИВНАЯ СИСТЕМА УРАВНЕНИЙ КАК СПОСОБ СОГЛАСОВАНИЯ ОЦЕНОК ФИТОМАССЫ ДРЕВОСТОЕВ ПО СОСТАВЛЯЮЩИМ ФРАКЦИЯМ

При оценке фитомассы деревьев и древостоев по уравнениям ее связи с массообразующими показателями не все фракции находятся в равном положении с точки зрения точности оценки. Если масса ствола — интегральный показатель за весь ростовой цикл, то масса листвы представляет итоговый результат ее роста за один год (у листопадных) или 3—5 лет (у хвойных), а масса ветвей занимает между ними промежуточное положение. Иными словами, отдельные фракции фитомассы аккумулируют реакцию дерева или древостоя на среду обитания за периоды различной длительности, а массообразующие показатели отражают конечный результат за весь ростовой цикл, и, как следствие, точность оценки массы надземных фракций снижается в последовательности: ствол, ветви, листва. Если масса ствола удовлетворительно описывается зависимостью лишь от его высоты и диаметра, то масса ветвей связана не только с этими показателями, но и с массой ствола. Масса листвы в свою очередь определяется не только высотой и диаметром ствола, но также массой ствола и ветвей. Похожая ситуация описана в разделе 2.4, когда запас отдельного сортимента в пачке хлыстов определялся (помимо общей массы пачки и числа хлыстов в ней) и запасом других сортиментов.

Регрессионная модель (139) объясняла 90 % изменчивости общей массы отдельного дерева саксаула. Но кроме общей массы необходимо оценить запас кормовой массы p_k , или веточного корма (ассимилирующие побеги последних двух лет толщиной 2-3 мм), причем не всего, а лишь доступного для поедания овцами, т. е. находящегося на высоте до 1,2 м от земли. Естественно, такой показатель не мог быть оценен адекватно тремя массообразующими регрессорами, входящими в (139). Поэтому в дополне-

ние к ним в качестве эндогенной переменной включен показатель общей массы p_0 и рассчитано уравнение

$$p_k = f(p_0, d_0, d_{cr}, h), \quad (143)$$

объясняющее 70 % изменчивости кормовой массы, и вклад каждого из четырех регрессоров был статистически значим (Усольцев, 1988а).

Оценка фитомассы древостоев на больших территориях с помощью лазерного зондирования с борта авианосителя выполняется практически по одному регистрируемому лазером массообразующему показателю — высоте древостоя H , м. По данным 60 пробных площадей, заложенных в березниках Урало-Казахстанского региона, рассчитано уравнение для массы стволов древостоя P_s в абсолютно сухом состоянии, т/га (Усольцев, 1996):

$$\ln P_s = 0,2230 + 1,5111 \ln H, \quad (144)$$

объясняющее 87 % ее общей изменчивости. Таким же уровнем объясненной изменчивости характеризовались уравнения вида (144) для массы стволов сосны, ели и осины. Зависимость (144) есть отражение так называемого закона Эйхгорна, согласно которому одной определенной высоте для всех классов бонитета и возраста соответствует один и тот же общий запас древостоя. Однако расчет уравнений, аналогичных (144), для массы листы дал неприемлемо низкие значения объясненной изменчивости — в пределах от 0,4 до 4,2 % для разных пород. Поэтому рассчитаны уравнения для массы скелета кроны (т. е. ветвей без листы) березы P_b , т/га

$$\ln P_b = -0,1584 + 0,2660 \ln P_s + 0,5590 \ln H; R^2 = 0,724, \quad (145)$$

и для массы листы P_f

$$\ln P_f = 5,1468 + \ln P_s + 0,1453 \ln P_b \ln H - 1,7611 \ln H; R^2 = 0,821. \quad (146)$$

Показатели объясненной изменчивости для уравнений (145) и (146), рассчитанных для остальных трех пород, такие же. Итак, применение рекурсивной системы уравнений (144)—(146) дало возможность получить состоятельные оценки фитомассы древостоев, используемые при лазерном зондировании лесных площа-

дей. Оценочные рекурсивные уравнения для фитомассы деревьев и древостоев позволяют иметь согласованные ее оценки для различных фракций. При этом исключается ситуация, когда отдельные фракции фитомассы, описываемые изолированно, получают несостоятельные оценки.

2.5.5. СИСТЕМА РЕКУРСИВНЫХ ВЗАИМОСВЯЗЕЙ КАК СПОСОБ СОВМЕЩЕНИЯ ОЦЕНОЧНОЙ МОДЕЛИ ФИТОМАССЫ С ТРАДИЦИОННЫМИ ТАКСАЦИОННЫМИ НОРМАТИВАМИ И БАНКАМИ ДАННЫХ ГОСУДАРСТВЕННОГО УЧЕТА ЛЕСНОГО ФОНДА (ГУЛФ)

В разделе 2.5.1 по существу показан принцип совмещения многофакторной модели фитомассы ветвей с ТХР по трем определяющим показателям — возрасту, классу бонитета и сумме площадей сечения древостоев. Однако в уравнении (130) не был непосредственно учтен запас стволовой древесины V . Более корректное совмещение, по крайней мере, для массы крон обеспечивают уравнения, выведенные не для абсолютных, а для относительных показателей фитомассы, называемых переводными коэффициентами (детально их применение будет рассмотрено в главе 3). В этом случае уравнение (130) может быть модифицировано к общему виду

$$P_i/V = f(A, B, H_{100}). \quad (147)$$

Уравнения (147) можно совместить как с ТХР по имеющимся в последних значениям A , B и H_{100} , так и с лесоустроительными по выдельными банками данных (см. главы 3 и 4).

Сумма площадей сечения B может быть разложена на два составляющих показателя — D и N и тогда уравнение (147) для P_i/V будет иметь общий вид, аналогичный уравнению (133) для массы ветвей. Традиционные ТХР включают в себя закономерности возрастной динамики по классам бонитета следующих показателей:

$$\left. \begin{aligned} V &= f(A, H_{100}) \\ N &= f(A, H_{100}) \\ D &= f(A, H_{100}) \end{aligned} \right\} \quad (148)$$

В настоящее время для основных лесообразующих пород Северного Казахстана получены регрессионные модели оценки фитомассы древостоев вида

$$P_i/V = f(A, H_{100}, N, D), \quad (149)$$

табулированием которых по данным соответствующих ТХР, описываемым зависимостями (148), составлены эскизы ТХР фитомассы древостоев по фракциям (Усольцев, 1985б, 1988а,б).

При составлении таблиц запасов фитомассы важное значение имеет установление эталона полноты, принимаемого за 1,0. Если для древостоев лесной зоны это не представляет проблемы, то для лесных экосистем пустынной зоны Средней Азии, представляющих сообщества открытой структуры (саксауловые редколесья), вопрос эталона полноты долгое время оставался открытым. После длительной проверки в лесоустроительной практике за эталон полноты принята площадь проекций крон G'' (тыс. м²/га), реально существующая при оптимальных условиях роста как функция средней высоты древостоя H (м), по В. М. Жирину (Усольцев, 1988а):

$$G'' = 0,267 + 1,293H. \quad (150)$$

Таблицы для оценки фитомассы саксаульников составлены на основе апробированного практикой эталона полноты (150) и бонитетной шкалы Казахского лесоустроительного предприятия. С учетом последней по экспериментальным данным рассчитаны уравнения

для высоты древостоя

$$\lg H = 0,1369 + 0,7498 \lg D_{cr} - 0,1982 \lg E, \quad (151)$$

где D_{cr} — средний диаметр крон, м; E — порядковый номер класса бонитета (1, 2 и 3),

и для оценки общей фитомассы

$$\lg P_0 = 0,1850 + 0,8750 \lg H + \lg G, \quad (152)$$

где G — фактическая площадь проекций крон древостоя, тыс. м²/га. Уравнения (150)—(152) составили рекурсивную систему

$$\left. \begin{array}{l} H = f(D_{cr}, E) \\ \downarrow \\ G^H = f(H) \\ \downarrow \\ P_0 = f(H, G) \end{array} \right\} \quad (153)$$

последовательным табулированием которой по задаваемым значениям D_{cr} в пределах каждого класса бонитета составлены таблицы общей фитомассы саксаула на 1 га нормальных древостоев.

2.5.6. СИСТЕМА РЕКУРСИВНЫХ УРАВНЕНИЙ ПРИ ОЦЕНКЕ ПРЕДЕЛЬНЫХ ЗАПАСОВ ФИТОМАССЫ ДРЕВОСТОЕВ

Как уже отмечалось в разделе 1.3, при расхождении в оценках запасов углерода, депонируемого в лесной фитомассе, на порядок и более какое-либо прогнозирование экологической ситуации на основе таких оценок практически невозможно. Прежде всего, необходимо иметь придержки о предельно возможных запасах фитомассы на единице площади.

Экспериментальный материал для данного исследования на уровне биогрупп как микромоделей древостоев различной густоты получен в березняках разнотравных Тургайского прогиба. В возрасте от 5 до 50 лет заложены 21 пробная площадь в порослевых и 13 — в семенных березняках. Обмерено и закартировано 5300 деревьев в порослевых и 3050 — в семенных березняках и выделено соответственно 360 и 280 биогрупп с учетом территориальной сближенности деревьев (рис. 11).

Запас стволовой древесины биогруппы на единице ее площади при заданном возрасте в предельном ценотическом состоянии (т. е. при максимально возможной густоте) определяется двумя основными массообразующими показателями — средним диаметром и средней высотой. Поэтому вначале необходимо рассчитать траектории изменения среднего диаметра, максимального для каждого класса возраста, и в пределах одного возраста — для каждой градации густоты. Для получения исходных данных к расчету таких траекторий все экспериментальные данные средних диаметров биогрупп были распределены в двухходо-

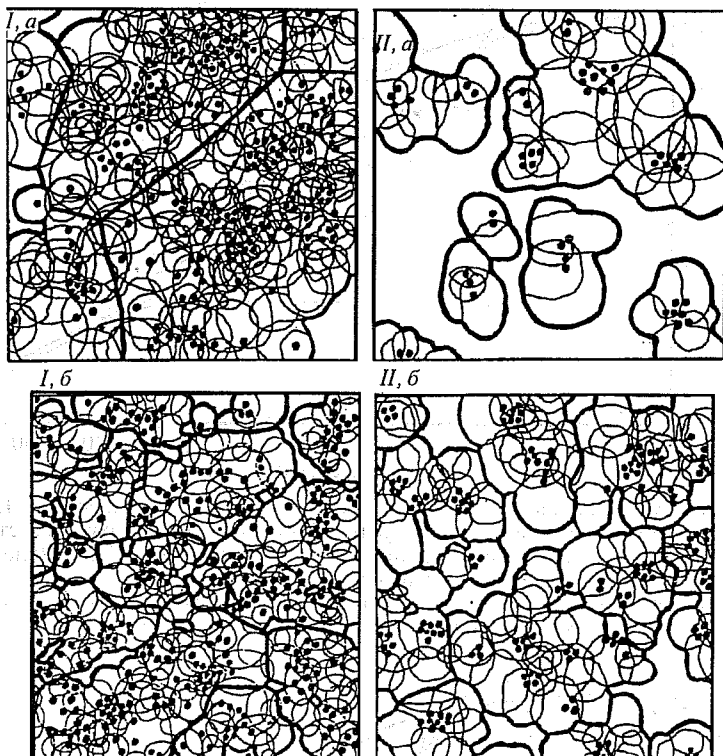


Рис. 11. Результаты картирования и выделения биогрупп (жирная линия) в березняках семенного (I) и порослевого (II) происхождения в возрасте 10 лет (а) и спустя 7 лет на тех же участках (б) (масштаб участков (б) мельче, чем (а), масштаб участков I и II одинаков)

вые (по возрасту и густоте) матрицы и из каждой ячейки матрицы отобраны максимальные значения среднего диаметра. Последние аппроксимированы зависимостями для семенных и порослевых березняков отдельно (рис. 12)

$$D_{\text{бр}}^{\text{max}} = f(A, N_{\text{бр}}); R^2 = 0,962 - 0,988, \quad (154)$$

где $D_{\text{бр}}^{\text{max}}$ — максимальное значение среднего диаметра стволов биогруппы; $N_{\text{бр}}$ — число стволов, приходящееся на единицу площади биогруппы, в данном случае на 1 условный ее гектар. По-

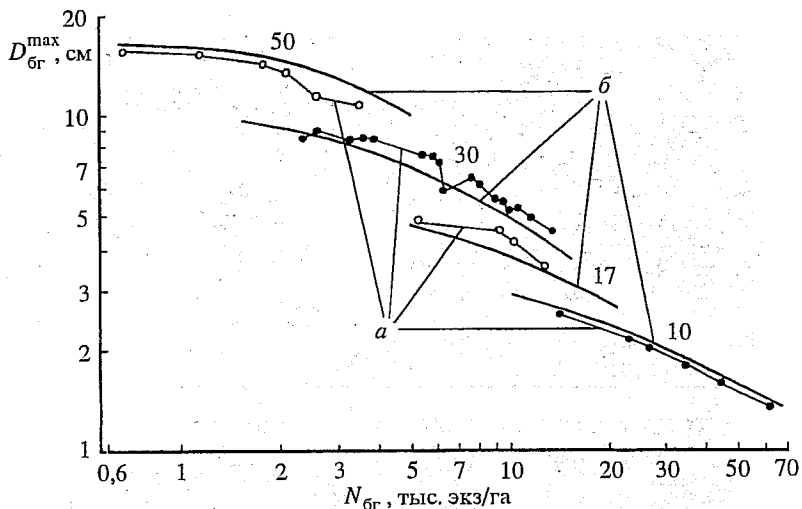


Рис. 12. Фактические (а) и теоретические (б), согласно уравнению (154), траектории изменения максимальных значений среднего диаметра стволов биогрупп семенных березняков разного возраста (10, 17, 30, 50 лет) в связи с плотностью деревьев в биогруппах.

Здесь и на рис. 13—15: $N_{бр}$ — число стволов, приходящееся на единицу площади биогруппы ($бр$), $D_{бр}^{max}$ — максимальное значение среднего диаметра стволов биогруппы

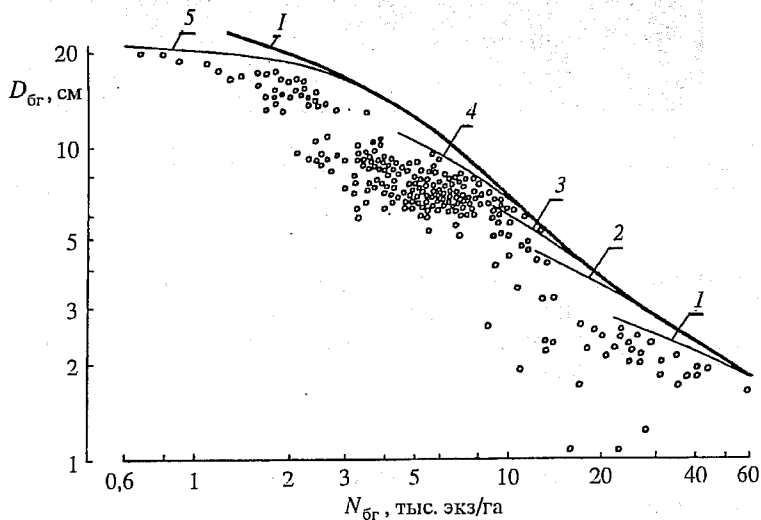


Рис. 13. Кривые $D_{бр}^{max} = f(N_{бр})$ для семенных биогрупп в возрасте 10, 20, 30, 40 и 50 лет (линии соответственно 1, 2, 3, 4 и 5), полученные табулированием уравнения (154) по задаваемым значениям плотности биогрупп; I — оггибающая

ложение предельных траекторий максимального диаметра $D_{\text{бр}}^{\text{max}}$ и их огибающей относительно экспериментальных значений средних диаметров всех семенных биогрупп показано на рис. 13.

Средняя высота биогруппы изменяется не только в связи с возрастом и густотой, но также в связи со средним диаметром стволов. Поэтому для получения исходных данных к расчету траекторий изменения максимальных значений средних высот биогрупп $H_{\text{бр}}^{\text{max}}$ все экспериментальные данные средних высот распределены в трехходовые (по возрасту A , густоте $N_{\text{бр}}$ и среднему диаметру $D_{\text{бр}}$) матрицы и из каждой ячейки матрицы отобраны максимальные значения средних высот. Последние аппроксимированы трехфакторной зависимостью

$$H_{\text{бр}}^{\text{max}} = f(A, N_{\text{бр}}, D_{\text{бр}}); R^2 = 0,974. \quad (155)$$

Предельные траектории изменения $H_{\text{бр}}^{\text{max}}$ по возрасту и густоте биогрупп рассчитаны путем подстановки уравнения (154) в уравнение (155) (рис. 14).

Запас стволовой древесины биогрупп описан зависимостью от четырех показателей — возраста A , густоты $N_{\text{бр}}$, среднего диаметра $D_{\text{бр}}$ и средней высоты биогрупп $H_{\text{бр}}$:

$$V_{\text{бр}} = f(A, N_{\text{бр}}, D_{\text{бр}}, H_{\text{бр}}); R^2 = 0,930—0,972. \quad (156)$$

Положение предельных траекторий изменения запасов биогрупп $V_{\text{бр}}$ и их огибающей относительно всех экспериментальных значений запаса $V_{\text{бр}}$ показано на рис. 15. Эти траектории получены путем последовательного табулирования рекурсивной системы уравнений (157)

$$\left. \begin{array}{l} D_{\text{бр}}^{\text{max}} = f(A, N_{\text{бр}}) \\ \downarrow \\ H_{\text{бр}}^{\text{max}} = f(A, N_{\text{бр}}, D_{\text{бр}}) \\ \downarrow \\ V_{\text{бр}} = f(A, N_{\text{бр}}, D_{\text{бр}}, H_{\text{бр}}) \end{array} \right\} \quad (157)$$

Вначале табулируется уравнение (154) по заданным A и $N_{\text{бр}}$, затем по тем же A и $N_{\text{бр}}$ и полученным $D_{\text{бр}}^{\text{max}}$ табулируется уравне-

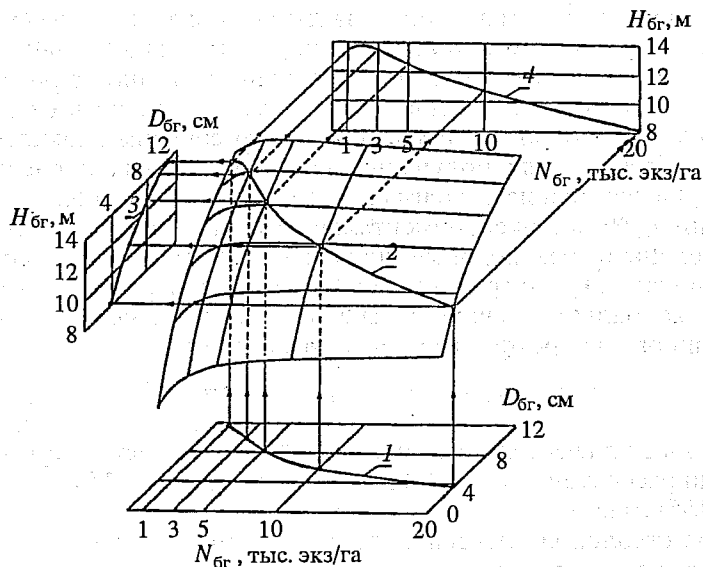


Рис. 14. Геометрическая интерпретация рекурсивной системы уравнений (154) и (155) для максимальных значений средних высот семенных биогрупп в возрасте 30 лет. 1 — кривая зависимости $D_{бр}^{max} = f(N_{бр})$ по уравнению (154), 2 — проекция линии 1 на поверхность, описываемую уравнением (155) при $A = 30$ лет, 3 — кривая зависимости $H_{бр}^{max} = f(D_{бр})$, 4 — кривая зависимости $H_{бр}^{max} = f(N_{бр})$

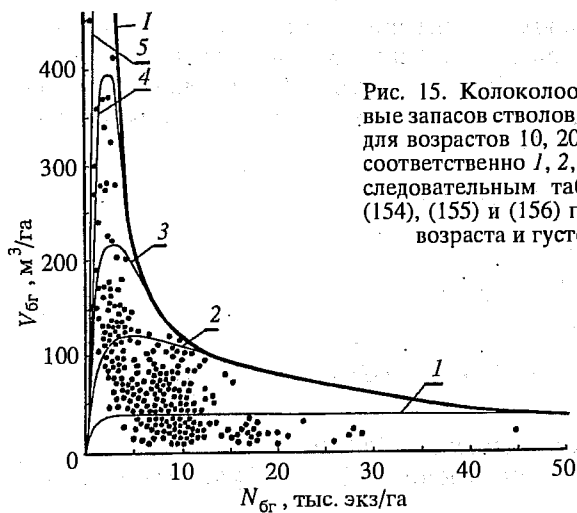


Рис. 15. Колоколообразные густотные кривые запасов стволов в порослевых биогруппах для возрастов 10, 20, 30, 40 и 50 лет (кривые соответственно 1, 2, 3, 4 и 5), полученные последовательным табулированием уравнений (154), (155) и (156) по задаваемым значениям возраста и густоты; 1 — огибающая

Расчет предельных показателей фитомассы семенных и порослевых березняков

А, лет	К	$N_{бр}^{max}$, тыс. экз/га		$D_{бр}^{max}$, см	$H_{бр}^{max}$, м	Предельный V , м ³ /га		Предельная фитомасса (сухая), т/га			
		био-группы	дресно-стоя			био-группы	дресно-стоя	стволов	ветвей	листьев	Итого
Семенные березняки											
20	0,97	20	19	3,5	7,4	123	119	108	6	3	117
30	0,91	17	15	4,2	9,2	128	116	106	4	1	111
40	0,84	12	10	5,7	11,8	172	144	134	3	1	138
50	0,78	6	5	10,6	16,5	416	324	306	17	4	327
Порослевые березняки											
20	0,79	14	11	4,0	6,1	97	77	68	6	3	77
30	0,80	5	4	8,1	10,2	192	154	144	20	3	167
40	0,78	4	3	9,8	12,1	258	201	192	28	3	223
50	0,72	3	2	12,6	14,4	364	262	254	43	3	300

ние (155) и, наконец, по тем же A и $N_{бр}$ и полученным $D_{бр}^{max}$ и $H_{бр}^{max}$ табулируется уравнение (156).

В табл. 20 для задаваемого возраста и предельной для этого возраста густоты $N_{бр}^{max}$ (см. рис. 15, точка пересечения колоколообразной кривой с огибающей) приведены соответствующие значения предельного запаса $V_{бр}$. Подстановкой величин $N_{бр}^{max}$ для каждого возраста в уравнение (154) получены значения $D_{бр}^{max}$ и подстановкой этих значений в (155) получены величины $H_{бр}^{max}$. Для пересчета показателей с уровня био группы на уровень дровостоя использован корректировочный коэффициент $K = C_{уд}/C_{уб}$, где $C_{уд}$ и $C_{уб}$ — соответственно сомкнутости полога дровостоя и био группы (Усольцев, 1985а, 1987б). Умножением коэффициента K на значения $N_{бр}^{max}$ и предельного V био группы получены соответствующие показатели для дровостоя (В. Усольцев, А. Усольцев, 1996а).

После расчета для заданных возрастов предельных значений $N_{бр}^{max}$ и $V_{бр}$ (см. табл. 20), скорректированных через коэффициент K на дровостой (соответственно колонки 4 и 8), а также значений $D_{бр}^{max}$ и $H_{бр}^{max}$ (колонки 5 и 6), получены предельные показатели надземной фитомассы березняков по фракциям путем подстановки названных значений в следующее рекурсивное уравнение общего вида:

$$P_i/V = f(A, N, D, H), \quad (158)$$

которое рассчитано по тем же экспериментальным данным, что и уравнение (149); R^2 для массы стволов составил 0,638, ветвей — 0,886 и для листвы — 0,975.

Таким образом, рекурсивная система уравнений (154), (155), (156) и (158) дала возможность установить предельно возможные запасы надземной фитомассы в березняках разнотравных семенного и порослевого происхождения степной зоны. Использование биогрупп как микромоделей древостоев различной густоты позволяет получить для любой древесной породы достоверные показатели предельных запасов фитомассы при минимальных трудозатратах.

2.5.7. РЕКУРСИВНАЯ СИСТЕМА ЗАВИСИМОСТЕЙ КАК ОСНОВА ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ

В рекурсивной системе зависимостей (148) и (149) уравнение (149) является основным, действительным для всего диапазона условий, охваченных экспериментальным материалом, а зависимость (148) имеет локальный характер и действительна лишь для данной ТХР. Таким образом, система зависимостей (148) и (149) многовариантна по отношению к имеющимся ТХР.

Уравнение (149) нельзя считать динамическим, так как оно не способно дать прогноз возрастной динамики фитомассы. Поскольку, как уже отмечалось, ТХР тоже не дает возрастной динамики запасов, а лишь характеризует балансовый итог прироста и отпада на тот или иной момент, то система зависимостей пригодна лишь для оценки фитомассы древостоев в статике. Если же уравнение (149) связать с изложенными в разделе 2.2 совместимыми моделями роста и прироста древостоев, то полученная система связанных уравнений будет динамической и многовариантной по отношению к имеющимся моделям роста и прироста древостоев.

В последнее время в зарубежном лесоводстве получили широкое распространение имитационные модели, описывающие возрастную динамику массообразующих показателей и запаса древостоев, исходя из начальных условий (густоты и характера размещения деревьев), индекса конкурентных отношений, режимов хозяйственного вмешательства и т. д. (Усольцев, 1985а). Ес-

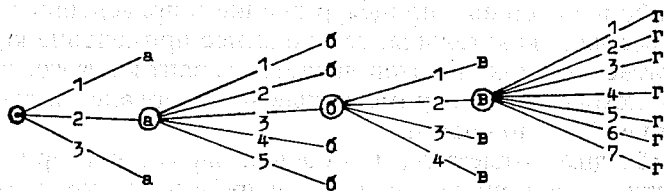


Рис. 16. Схема последовательных этапов (а, б, в, г) параметрического прогнозирования (1—7 — варианты)

ли уравнение (149) связать с такой имитационной моделью, то полученная система зависимостей будет по существу имитационной и многовариантной по отношению не к имеющимся ТХР или совместимым моделям роста и прироста древостоев, а к конкретным исследуемым насаждениям.

Изложенные три варианта представляют частные случаи общего принципа **параметрического прогнозирования** (Лица, 1980), когда сначала предсказываются массообразующие показатели и запас древостоя, а по ним с использованием статической зависимости (149) — его фитомасса. Этот принцип составляет основу имитационного моделирования, когда на каждом очередном шаге имитации модель отвечает на вопрос типа “Что будет, если...?”, и тем самым на каждом шаге реализуется принцип многовариантности (рис. 16). По такой же схеме осуществляется проекция запаса и площади сечений на задаваемые возрастные периоды, когда на каждом возрастном этапе модель корректируется по принципу “Что будет, если...?”. Такая же схема лежит и в основе цепочки рекурсивных уравнений.

* * *

Использование систем связанных регрессионных уравнений при исследовании лесных экосистем предполагает наличие четких представлений исследователя об основополагающих процессах, протекающих в изучаемом объекте. Только при этом условии возможна корректная спецификация каждого уравнения системы. Одновременный расчет нескольких связанных стохастических зависимостей порождает проблему состоятельности и смещенности оценок коэффициентов, и этой проблеме было уделено значительное внимание. Хотя необходимость и преиму-

щества более сложных процедур оценки в приведенных примерах не всегда доказательны, тем не менее применение корректных статистических методов является гарантией того, что при любом исходном экспериментальном материале получаемые оценки не будут ложными.

Необходимо отметить, что оценка параметров при всей ее важности — заключительный этап в процессе построения модели. До него необходимо затратить немало времени и усилий на получение экспериментальных данных и разработку или анализ теоретических положений, на которых основываются математические модели. Фактически любой практический выигрыш в обеспечении корректности модели достигается прежде всего благодаря адекватной базе данных и надежной основополагающей теории, а не статистически обоснованной процедуре оценки параметров. Как полагает Л. Клейн (Klein, 1960), необходимо учитывать все возможности повышения адекватности модели и ценен любой выигрыш, даже самый малый. Выбор же более мощных средств математической статистики не является панацеей. И хотя Л. Клейн имел в виду эконометрическую ситуацию, его предпосылка действительна и при моделировании лесоводственных закономерностей. В теоретическом аспекте важна не только практически реализуемая точность оценки, но и логическая обоснованность модели, фундаментальность основополагающей парадигмы и, наконец, корректность методов расчета.

В последнем разделе дан краткий обзор различных вариантов и приемов использования рекурсивных уравнений при таксации фитомассы древостоев. Приведенные при этом регрессионные оценочные модели следует рассматривать как предварительные. Во-первых, не всегда обеспечивалась репрезентативность экспериментального материала. Например, при расчете модели (149) для оценки фитомассы сосняков недостаточно представлены высокополнотные молодняки и низкополнотные спелые древостои (Усольцев, 1988а, табл. 4.4) и во избежание смещений от экстраполяции действие модели на эти периферийные участки поля распределения экспериментальных данных распространять нельзя. Во-вторых, в расчет моделей не включена коррекция смещений на логарифмирование, которое обычно применялось для приведения модели к линейному виду. И хотя при высоких коэффициентах детерминации, которые характеризовали большинство моделей, смещение не выходит обычно

Электронный архив УГЛТУ

за пределы 1 %, тем не менее в случае низкой их детерминированности систематическая ошибка может быть существенной. В-третьих, регрессионные модели не верифицированы на независимых выборках, что также снижает их надежность. И, в-четвертых, все рекурсивные модели рассчитаны методом ОМНК. Хотя было показано, что он вполне приемлем для оценки коэффициентов рекурсивных уравнений, это имеет место лишь при отсутствии межрегрессионной корреляции остатков, а такие тесты не были выполнены.

Упомянутые четыре фактора недостаточной корректности регрессионных моделей для оценки фитомассы деревьев и древостоев по существу определяют направления дальнейших исследований в этой области. Предстоит также выявить возможности применения здесь систем взаимозависимых уравнений, нашедших наиболее широкое применение в эконометрии. Они могут обеспечить большую гибкость и универсальность регрессионных систем, имитирующих динамику роста и прироста древостоев в увязке с их фитопродуктивностью. Успешное применение описанных в работе методов будет означать, что лесоводы имеют возможность развивать целые системы совместимых моделей роста и прироста фитомассы древостоев, построенных на теоретически обоснованных статистических процедурах.

ГЛАВА 3

РЕГРЕССИОННЫЕ МОДЕЛИ ПЕРЕВОДНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ ФИТОМАССЫ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ ПРИ СОСТАВЛЕНИИ ЭСКИЗОВ ТАБЛИЦ БИОПРОДУКТИВНОСТИ ДРЕВОСТОЕВ

При первых оценках общей фитомассы лесов, ее прироста и депонирования углерода, выполненных на уровне природных зон и подзон (Лавренко и др., 1955; Базилевич, Родин, 1967; Olson et al., 1983; Kolchugina, Vinson, 1993a), использовался экспериментальный материал небольшого числа пробных площадей. Их репрезентативность была неизвестна, критерий воспроизводимости (т. е. точности) оценки фитомассы и связываемого ею углерода отсутствовал. Невоспроизводимые же схемы выборочного учета хуже, чем бесполезные, поскольку они создают ауру ложной точности, которая может ввести в большое заблуждение (Cottam et al., 1953). Очевидно, что правомерность распространения данных фитомассы небольших выборок на обширные площади без учета породного, возрастного и структурного разнообразия лесов весьма сомнительна, и оценки фитомассы лесов, как региональные, так и глобальные, должны выполняться на математико-статистической основе.

3.1. ПЕРЕВОДНОЙ КОЭФФИЦИЕНТ

В условиях оптимума среды обитания древесные породы обладают генетически закрепленными тенденциями в изменении характерных соотношений фитомассы, например надземной и подземной (Лир и др., 1974). Эти закономерности во многом определяются также некоторыми особенностями относительных показателей (в сравнении с абсолютными), к которым можно отнести "...уменьшение числа переменных, подлежащих изучению, более четкое выражение внутренних связей процессов, получение для некоторого множества случаев обобщенных харак-

теристик, позволяющих выяснить общие закономерности для этого множества и представить их в конечном счете в количественной форме” (Т. Детлаф, А. Детлаф, 1982, с. 27).

Возможно, именно поэтому изменения относительных показателей массы фракций (стволов, хвой, ветвей, корней) дерева (древостоя), выраженных в долях от общей массы (Семечкина, 1978) или от объема (запаса) стволовой древесины (Поздняков и др., 1969; Протопопов, Зюбина, 1977; Онучин, Борисов, 1984), в связи с основными таксационными показателями дерева (древостоя) прослеживаются более четко, чем изменения абсолютных показателей. Справедливость этого предположения подтверждается не для всех фракций фитомассы, а лишь для тех, доля которых в общей массе относительно невелика. Специальным исследованием установлено, что чем ниже парная связь между показателями массы фракций, тем в большей мере отношение этих показателей определяется эколого-ценотическими, онтогенетическими и другими характеристиками деревьев и древостоев. Менее всего названные характеристики объясняют изменчивость отношения массы ствола к его объему, представляющего показатель базисной плотности древесины ствола (Усольцев, 1985а).

Однако относительный показатель фитомассы, или переводной коэффициент, имеющий в знаменателе величину объема (запаса) стволовой древесины, заслуживает внимания главным образом по другой причине. Оценка фитомассы древостоев по составляющим фракциям по трудоемкости не сопоставима с традиционной оценкой запасов стволовой древесины. За 150-летнюю историю лесотаксационной науки накоплены огромные банки данных о запасах стволовой древесины в системе государственного учета лесов, имеются многочисленные сведения перечислительной таксации временных и постоянных пробных площадей и составлено большое количество региональных таблиц хода роста (ТХР) древостоев разных пород. Данные же о запасах и продуктивности фитомассы настолько отрывочны и малочисленны, что создание приемлемой нормативной базы для оценки фитомассы традиционными таксационными методами, причем в кратчайшие сроки, практически невозможно. Единственно приемлемый путь для заполнения информационных белых пятен по фитомассе — использование переводных коэффициентов, а именно — сопряжение традиционных нормативов и банков лесо-

устройственных данных по запасам стволовой древесины с данными о фитомассе лесов на основе переводных коэффициентов.

Переводной коэффициент впервые был предложен в прошлом веке Ф. Флури (Flury, 1892) как отношение объема ветвей к объему ликвидной древесины. К настоящему времени его применение при оценке фитомассы лесов претерпело ряд методических модификаций. В частности, используются отношения: массы фракций к объему стволовой древесины (Поздняков и др., 1969; Протопопов, Зюбина, 1977; Hitchcock, 1979; Adams, 1982; Опритова и др., 1982; Онучин, Борисов, 1984; Усольцев, 1985б, 1988а,б; Макаревский, 1991; Исаев и др., 1993; Алексеев, Бердси, 1994), массы фракций к общей фитомассе (надземной и подземной) или к массе ствола (Smith, 1976; Семечкина, 1978), общей фитомассы к массе ликвидной древесины (Sharp et al., 1975; Johnson, Sharpe, 1983; Brown, 1997).

На рис. 17 нанесены экспериментальные данные автора для переводного коэффициента, представляющего отношение массы хвой в абсолютно сухом состоянии к запасу стволовой древесины на 1 га для чистых одновозрастных сосняков островных боров степной зоны Казахстана (естественные древостои и культуры, классы бонитета с Ia по Va, полнота с 0,4 до 1,0) в зависимости от возраста древостоев. Их анализ показывает, что в возрасте 10, 20, 40 и 100 лет перепад значений переводного коэффициента, т. е. разность между максимальным и минимальным значениями, составляет соответственно 200, 90, 20 и 10 кг/м³.

Отмеченная закономерность типична, она характерна для связи переводного коэффициента не только с возрастом, но и с другими массоопределяющими показателями в случаях, когда возраст определить невозможно, например во влажных тропических лесах с породным составом до 400 наименований (Brown et al., 1989). Отношение общей (надземной и подземной) фитомассы к массе стволовой древесины, нанесенное на график в зависимости от среднего диаметра ствола, в низших ступенях толщины (15—20 см) имеет максимальный разброс, при этом превышение общей фитомассы древостоев относительно массы их стволов варьирует от 1,5-кратного до 6-кратного (рис. 18).

Показанные на рис. 17 и 18 зависимости могут быть аппроксимированы уравнением гиперболы с высоким коэффициентом детерминации, и тем не менее в левой части полей распределения экспериментальных данных это уравнение будет давать вы-

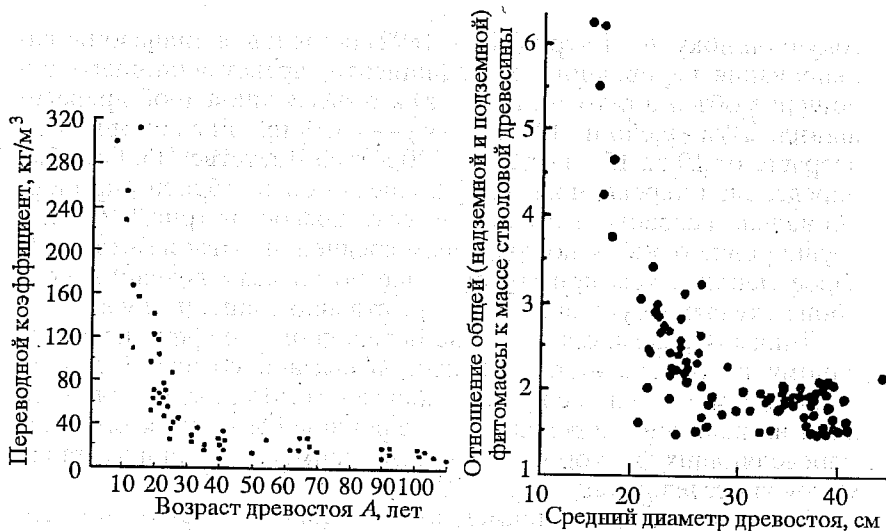


Рис. 17. Зависимость переводного коэффициента (отношения массы хвои в абсолютно сухом состоянии к запасу стволов) от возраста естественных древостоев и культур сосны островных боров Тургайского прогиба

Рис. 18. Зависимость переводного коэффициента (отношения общей фитомассы к массе стволов) от среднего диаметра древостоев влажных тропических лесов (Камерун, Французская Гвиана, Малайзия и Шри Ланка) с составом, включающим до 400 видов (Brown et al., 1989)

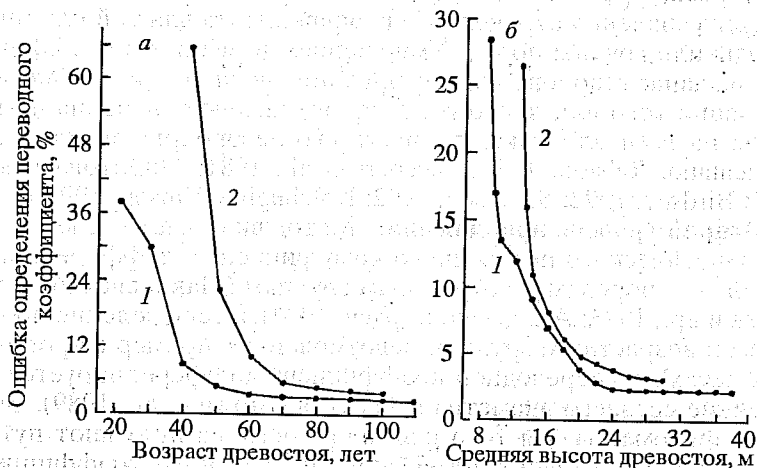


Рис. 19. Зависимость ошибки определения переводного коэффициента (отношения объема ветвей к объему ликвидной древесины) от возраста (а) и средней высоты (б) еловых (1) и буковых (2) древостоев, по данным Ф. Флури (Flury, 1892)

сокую ошибку. Ф. Флури (Flury, 1892) исследовал диапазоны варьирования переводного коэффициента, представляющего отношение объема ветвей (пл. м³/га) к объему ликвидной древесины (пл. м³/га), у ели на 124 и у бука — на 89 пробных площадях в возрасте от 19 до 154 и от 20 до 220 лет соответственно. Ошибка определения переводного коэффициента была обратно пропорциональна возрасту и средней высоте древостоя (рис. 19). При группировке ошибок по грациям средней высоты их величина вдвое меньше, чем при группировке по классам возраста, но в обоих случаях у бука она была существенно выше, чем у ели.

Таким образом, определение переводного коэффициента по одному из определяющих факторов связано со значительной ошибкой при малых величинах последнего. Для выявления влияния на величину переводного коэффициента всего комплекса определяющих факторов необходимо применение многомерных методов исследования.

В настоящее время применяются различные варианты оценки переводных коэффициентов по массоопределяющим показателям и соответственно различные способы совмещения переводных коэффициентов с данными инвентаризации запасов стволовой древесины и с лесотаксационными нормативами (ТХР). При этом можно выделить несколько уровней приближения к реальности.

Первый уровень приближения. Метод основан на расчете среднего значения переводного коэффициента для той или иной породы или группы пород. Умножением названного коэффициента на запас стволовой древесины, полученный при лесоинвентаризации того или иного региона, определяют значения фитомассы на всей или какой-то части его лесопокрытой площади (Argentano, Ralston, 1980; Delcourt et al., 1981; Опритова и др., 1982; Birdsey, 1992; Sampson, 1992; Kolchugina, Vinson, 1993б).

Второй уровень приближения. Метод включает расчет среднестатистического переводного коэффициента, дифференцированного по породам и возрастным группам (Макаревский, 1991; Исаев и др., 1993; Алексеев, Бердси, 1994), а если деление по породам и возрастным группам невозможно (например в тропических лесах), то переводной коэффициент дифференцируется по величине среднего диаметра древостоя (Brown et al., 1989). Значения фитомассы для того или иного региона получают путем взвешивания среднестатистического переводного коэффициен-

та по породам, лесопокрытым площадям и запасам стволовой древесины в соответствии с распределением последних по возрастным группам или ступеням среднего диаметра.

Третий уровень приближения. По этому методу в настоящее время проводится вторая инвентаризация фитомассы лесов Канады (методику и результаты первой инвентаризации см.: Вонног, 1985). Итогом первой фазы проекта являются матрицы переводных коэффициентов, рассчитываемых как отношение надземной фитомассы к запасу стволовой древесины. С помощью этих коэффициентов значения запасов стволовой древесины, распределенных по провинциям, породам, классам возраста и бонитета, переводятся на показатели надземной фитомассы (Penner, 1997).

П. И. Лакида с соавторами (Lakida et al., 1995) для совмещения экспериментальных данных о фитомассе хвойных и лиственных лесов европейской части бывшего СССР с данными лесоустройства о запасах стволовой древесины предлагают серию уравнений как второго уровня приближения

$$P_i/V = a_0 A^{a_1}, \quad (159)$$

так и третьего

$$P_i/V = a_0 A^{a_1} n^{a_2}, \quad (160)$$

где n — порядковый номер класса бонитета. Уравнение (160) характеризуется повышенным коэффициентом детерминации по сравнению с (159), по-видимому, в тех случаях, когда экспериментальный материал взят в широком диапазоне классов бонитета. Если же диапазон лесорастительных условий невелик, тогда уравнения (159) и (160) по точности оценки не различались.

В целом третий уровень приближения предполагает более точную оценку общей фитомассы по сравнению с двумя предыдущими, поскольку переводной коэффициент взвешивается по удельной площади и запасам стволовой древесины, распределенным не по одному, а по двум определяющим факторам одновременно — возрасту и классу бонитета.

Четвертый уровень приближения. Поскольку вклад непокрытой лесом и нелесной площадей в общее депонирование углерода составляет всего 10 % (Исаев и др., 1993), то совершенствование методики оценки углеродного пула по этим площадям

практически не изменяет конечного результата. И напротив, дальнейшие усилия по совершенствованию названной методики на покрытых лесом площадях могут быть вполне оправданными. В частности, во всех изложенных выше подходах не учитывается третий массообразующий показатель древостоев — их плотность, или полнота. Использование всего набора массообразующих показателей при экстраполяции экспериментальных данных фитомассы на площадь лесхоза или региона позволяет выйти на четвертый (базовый) уровень приближения.

Исследовав зависимость переводного коэффициента от основных определяющих факторов по данным фитомассы сосняков Сибири на 88 пробных площадях, А. А. Онучин и А. Н. Борисов (1984) вывели уравнения

$$P_i/V = f(A, V, n), \quad (161)$$

где P_i — масса крон, хвои или корней в абсолютно сухом состоянии (т/га), а запас стволовой древесины V (м³/га) является при прочих равных условиях характеристикой плотности древостоя. Коэффициенты детерминации составили по фракциям соответственно 0,920; 0,960 и 0,865. По задаваемым грациям каждого их трех определяющих факторов авторами составлены трехходовые таблицы для каждой из названных фракций. Поскольку запас стволовой древесины V включен в обе части уравнений, показатели их адекватности искусственно завышены и оценки несостоятельны. Поэтому в более позднем варианте (Monserud et al., 1996) авторы модифицировали свой подход и предложили для массы крон в целом и хвои уравнения вида

$$P_i = f(A, V, n); R^2 = 0,57—0,70, \quad (162)$$

для массы корней

$$P_r = f(V); R^2 = 0,77 \quad (163)$$

и для массы стволов

$$P_s = f(A, V); R^2 = 0,96. \quad (164)$$

Несколько иная форма уравнений для переводных коэффициентов фитомассы основных лесообразующих пород бывшего СССР (2040 пробных площадей и полуэмпирических обобще-

ний) принята при расчете приходной части углеродного баланса в рамках упомянутого выше Сибирского проекта Международного института прикладного системного анализа (Швиденко, Нильссон, 1997; Lakida et al., 1997; Shepashenko et al., 1997). Уравнение (161) было модифицировано

$$P_i/V = f(A, n, B_{rel}), \quad (165)$$

где B_{rel} — относительная полнота древостоя, в долях 1,0.

Автором после серии последовательных приближений в процедуре регрессионного моделирования динамики фитомассы древостоев, описанной ранее (Усольцев, 1985а, 1988а), выбрана окончательная форма моделей переводных коэффициентов (149) (см. раздел 2.5.5), совмещенных с ТХР основных лесобразующих пород юга Западной Сибири и Северного Казахстана (Усольцев, 1985б) и с всеобщими ТХР сосновых, березовых и осиновых древостоев В. В. Загреева, Н. Я. Саликова и В. С. Чернявского (Нормативы..., 1993; табл. 3.1.3; 3.6.2 и 3.7.2).

Структура модели (149) использована далее при исследовании и объяснении изменчивости переводного коэффициента P_i/V в сосняках и ельниках Среднего Урала и составлении ТХР надземной фитомассы этих пород для региона (Усольцев и др., 1994в). Коэффициенты детерминации для хвои и ветвей у сосны равнялись 0,635 и 0,874 и у ели 0,949 и 0,898 соответственно. По экспериментальным показателям для сосны Среднего Урала рассчитаны также уравнения (161), однако структура этой модели оказалась неприменимой к нашим экспериментальным данным: определяющие факторы были статистически не значимы, а коэффициент детерминации слишком мал — от 0,06 до 0,23.

Можно указать возможную причину несостоятельности структуры моделей (161) и (165) на конкретном уравнении для массы ветвей сосны P_b Среднего Урала, рассчитанном согласно модели (149):

$$\begin{aligned} \ln(P_b/V) = & -16,7155 + 25,5357 \ln A - 2,2484 \ln H_{100} - \\ & - 3,3939 \ln N + 0,3881(\ln N)^2 + 0,4963 \ln D \ln A - 8,4956 (\ln A)^2 + \\ & + 0,7752 (\ln A)^3 + 0,1663 \ln N (\ln A)^2; R^2 = 0,874. \quad (166) \end{aligned}$$

Все константы значимы на уровне t_{05} и выше. Протабулировав уравнение (166) по заданным значениям $A = 100$ лет, $H_{100} = 17,5$ м и $V = 150$ м³, приведем его к частному виду

$$\ln P_b = -5,0060 - 0,1330 \ln N + 0,3881(\ln N)^2 + 2,2856 \ln D.$$

Приняв значение суммы площадей сечений $B = 30$ м²/га и разложив ее на составляющие: в одном случае $D = 6$ см и $N = 10,6$ тыс. экз/га, а в другом — $D = 20$ см и $N = 0,965$ тыс. экз/га, получаем значения массы скелета полога — соответственно 2,5 и 6,3 т/га, различающиеся в 2,5 раза. Таким образом, при одинаковых значениях возраста, класса бонитета, запаса стволовой древесины и полноты древостоев, но при диаметрально противоположных значениях D и N , фитомасса полога этих древостоев существенно различается и для аппроксимации переводных коэффициентов фитомассы древостоев наиболее предпочтительна структура моделей (149) или (158).

3.2. МЕТОДЫ СОСТАВЛЕНИЯ ЭСКИЗОВ ТАБЛИЦ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ПРОДУКТИВНОСТИ ДРЕВОСТОЕВ

Существует несколько методов составления эскизов таблиц биологической продуктивности древостоев. Рассмотрим основные из них.

3.2.1. ВЫРАВНИВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ФИТОМАССЫ ДРЕВОСТОЕВ ОДНОГО ВОЗРАСТНОГО РЯДА

Метод основан на закладке пробных площадей одного возрастного ряда и определении фракционного состава фитомассы на каждой из них по срубленным модельным деревьям с последующим графическим или аналитическим выравниванием экспериментальных данных. Поскольку при этом методе количество используемых пробных площадей обычно намного меньше таковых, закладываемых при составлении традиционных ТХР, то фиксированный в таких таблицах биопроductивности возрастной набор статических состояний древостоев имеет еще меньше общего с фактической возрастной динамикой запасов, чем упомянутые ТХР.

В качестве примера можно привести эскизы таблиц биопродуктивности пойменных дубрав Теллермановского лесничества в Воронежской области (Боханова, 1971), листовенничных древостоев Южной Эвенкии (Красиков, 1987), липняков лесостепи Башкирского Предуралья (Габделхаков, 1997) и др.

3.2.2. СОВМЕЩЕНИЕ МОДЕЛЕЙ ФИТОМАССЫ ДЕРЕВЬЕВ С ВОЗРАСТНОЙ ДИНАМИКОЙ ВЗЯТЫХ ИЗ ТХР ПОКАЗАТЕЛЕЙ СРЕДНЕГО ДЕРЕВА И ЧИСЛА СТВОЛОВ НА 1 ГА

Преимущество данного метода в сравнении с предыдущим — совмещение экспериментальных данных фитомассы с таксационными нормативами — ТХР. Отсюда — второе преимущество, заключающееся в том, что при таком сопряжении не требуется большого объема экспериментальных данных о фитомассе. Однако это совмещение выполняется без учета динамики распределения деревьев, по методу среднего дерева, место которого в ряду распределения, как известно, очень неустойчиво. Поэтому метод находит применение, когда имеются трудности с получением экспериментальных данных (например данных о фитомассе корневых систем деревьев). По изложенному принципу составлены таблицы возрастной динамики фитомассы корней сосны Тургайского прогиба (Усольцев и др., 1985; Usoltsev, Vanclay, 1993). По фактическим данным фитомассы 28 раскопанных и отмытых корневых систем деревьев рассчитаны уравнения

$$p_{\text{ко}} = 0,2280A^{-0,3622}d^{2,7226}h^{-0,4772}; R^2 = 0,982; \quad (167)$$

стандартная ошибка $SE = 0,095$;

$$p_{\text{кт}} = 0,2266A^{-0,4052}d^{2,8565}h^{-0,6942}; R^2 = 0,980; SE = 0,098, \quad (168)$$

где $p_{\text{ко}}$ и $p_{\text{кт}}$ — соответственно фитомасса общая и тонкой фракции (< 1 мм) корней модельного дерева в абсолютно сухом состоянии, кг. Уравнения (167) и (168) модифицированы к виду

$$p_i = P_i/N = f(A, D, H)$$

и предложена система рекурсивных взаимосвязей

$$\begin{array}{l}
 \text{I.} \\
 \downarrow \\
 \text{II.}
 \end{array}
 \left. \begin{array}{l}
 N = f(A, H_{100}) \\
 D = f(A, H_{100}) \\
 H = f(A, H_{100}) \\
 P_i/N = f(A, D, H)
 \end{array} \right\}, \quad (169)$$

зависимости (I) которой взяты в табличном выражении из соответствующих ТХР.

3.2.3. СОВМЕЩЕНИЕ МОДЕЛЕЙ ФИТОМАССЫ ДЕРЕВЬЕВ С МОДЕЛЯМИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЧИСЛА ДЕРЕВЬЕВ ПО ТОЛЩИНЕ В ВОЗРАСТНОЙ ДИНАМИКЕ ТХР

Метод также основан на применении многофакторных уравнений фитомассы на уровне дерева. Однако совмещение осуществляется не по среднему дереву, а по рядам распределения деревьев. В качестве примера можно привести эскизы таблиц биопродуктивности, составленные по данным 123 модельных деревьев, взятых в древостоях пихты белой (Италия) в возрасте от 27 до 105 лет (Santiani, 1974; Hellrigl, 1974). Вначале рассчитывались уравнения

$$p_i = f(d, h), \quad (170)$$

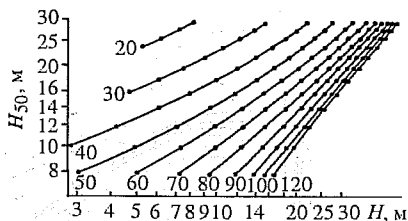
где p_i — фитомасса i -ой фракции надземной части дерева, кг. В результате совмещения уравнений (170) с зависимостью $h = f(d)$ и с рядами распределения стволов по диаметру, дифференцированными по классам возраста, составлены упомянутые эскизы таблиц биопродуктивности.

Аналогичный подход использован А. А. Макаренко и А. А. Маленко (1984) с тем отличием, что вместо (170) рассчитаны более корректные уравнения вида

$$p_i = f(d, h, D, H_{50}), \quad (171)$$

а ряды распределения стволов по диаметру дифференцированы не только по классам возраста, но и по классам бонитета. Однако экспериментальными данными охвачен небольшой возрастной диапазон и составленные эскизы таблиц биопродуктивности

Рис. 20. Зависимость класса бонитета по верхней высоте в базовом возрасте 50 лет от средней высоты древостоев ели и возраста (обозначен цифрами, лет)



предназначены фактически только для молодняков сосны ленточных боров Казахстана.

Метод применен также при составлении эскизов таблиц биопродуктивности чистых одновозрастных ельников Швейцарии (Усольцев и др., 1995а; Usoltsev, Hoffmann, 1997а). Предпосылкой для его применения послужило наличие опубликованных данных о массе хвой и ветвей 189 деревьев в возрасте древостоев от 5 до 285 лет (Burger, 1953). Поскольку данные перечета деревьев на пробных площадях не сохранились, отсутствовали и данные фитомассы на 1 га древостоев. Однако швейцарские ТХР (ЕАФV, 1983) отличаются тем, что кроме общего запаса и густоты, дифференцированных по классам возраста и бонитета, они содержат информацию о распределении числа деревьев и запасов стволовой древесины по ступеням толщины.

По экспериментальным данным Г. Бургера рассчитаны уравнения вида

$$p_i = f(A, d, H_{50}); R^2 = 0,891—0,923, \quad (172)$$

где H_{50} — класс бонитета, выраженный верхней высотой древостоя в возрасте 50 лет. Для совмещения (172) с ТХР получено вспомогательное уравнение

$$H_{50} = f(A, H); R^2 = 0,997, \quad (173)$$

аппроксимирующие соответствующие цифровые данные упомянутых ТХР (рис. 20). Результирующие таблицы массы крон, графически представленные на рис. 21, получены последовательным табулированием уравнений (173) и (172) по ступеням толщины деревьев в ТХР с перемножением полученных значений на число стволов в каждой ступени.

Недостаток метода состоит в том, что экспериментальные данные по фитомассе получают на одних пробных площадях, а

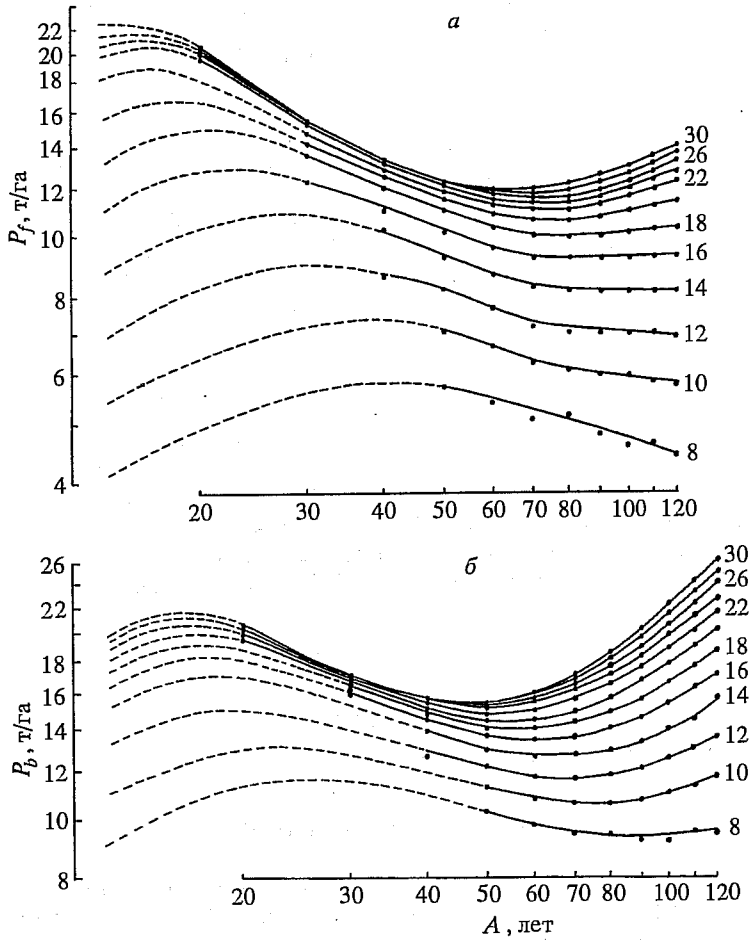


Рис. 21. Абсолютно сухая масса хвои (а) и ветвей (б) еловых древостоев в зависимости от возраста и класса бонитета по верхней высоте (обозначен цифрами, м)

ТХР составлены по данным других пробных площадей, характеризующихся в том и другом случаях специфическими закономерностями распределения числа деревьев. Сторонники этого метода предполагают, что если два древостоя имеют одно и то же распределение числа деревьев по диаметру, то они имеют одинаковые распределения деревьев по фитомассе. Однако это не соответствует действительности (Семечкина, 1978).

3.2.4. СОВМЕЩЕНИЕ МОДЕЛЕЙ ФИТОМАССЫ ДРЕВОСТОЕВ С ТХР ПО СОВОКУПНОСТИ МАССООПРЕДЕЛЯЮЩИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ

Метод по существу уже описан в разделах 2.5.5 и 3.1. Его можно представить системой рекурсивных зависимостей

$$\left. \begin{array}{l}
 \text{I. } H_{100} = f(A, H) \\
 \downarrow \\
 \text{II. } \left\{ \begin{array}{l} V = f(A, H_{100}) \\ N = f(A, H_{100}) \\ D = f(A, H_{100}) \end{array} \right. \\
 \downarrow \\
 \text{III. } P_i/V = f(A, H_{100}, D, N)
 \end{array} \right\}, \quad (174)$$

где (I) представляет собой аналитическое выражение бонитетной шкалы М. М. Орлова для семенных древостоев. Графическая интерпретация шкалы аналогична таковой, представленной на рис. 20 для ельников Швейцарии. Путем аппроксимации цифровых данных шкалы получено уравнение

$$H_{100} = 12,5 - 0,282A + 3,0 \cdot 10^{-3} \cdot A^2 - 2,0 \cdot 10^{-5} \cdot A^3 + 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot A^4 + 0,65H + 35,0(H/A); R^2 = 0,998, \quad (175)$$

необходимое в данном случае для совмещения региональных ТХР с упомянутой бонитетной шкалой. Взаимосвязи (II) заимствуются из конкретной ТХР.

Применение подхода, основу которого составляет рекурсивная система (174), зиждется на предположении, что если древостой имеют одинаковые возраст, густоту, средние высоту и диа-

метр, то скорее всего они имеют одинаковые распределения числа стволов как по диаметрам, так и по фитомассе (Усольцев, 1987; Usoltsev, Hoffmann, 1997a).

Основу разрабатываемого автором метода составляют оценочные уравнения переводных коэффициентов фитомассы древостоев — уравнения (Ш) в системе (174). Все составленные по этому методу ранее опубликованные эскизы таблиц биопродуктивности древостоев имели в основе такие уравнения, рассчитанные по массивам локальных экспериментальных данных — вначале для сосны, березы и осины Северного Казахстана (Усольцев, 1987, 1988а,б), затем для сосны и ели Среднего Урала (Усольцев и др., 1994в). В следующем разделе излагаются результаты моделирования переводных коэффициентов фитомассы древостоев по экспериментальным данным, как обобщенным по крупным регионам, так и дифференцированным по подрегионам.

3.3. ОБОБЩЕННЫЕ МОДЕЛИ ПЕРЕВОДНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ ФИТОМАССЫ И СОСТАВЛЕНИЕ РЕГИОНАЛЬНЫХ ЭСКИЗОВ ТАБЛИЦ БИОПРОДУКТИВНОСТИ ДРЕВОСТОЕВ

3.3.1. СОСНЯКИ УРАЛА И СЕВЕРНОГО КАЗАХСТАНА

Исследования структуры фитомассы сосняков (*Pinus sylvestris* L.) выполнены на территории обширного Урало-Казахстанского региона, в пределах которого можно выделить три подрегиона (рис. 22).

- Зауральская холмисто-предгорная провинция в пределах подзон средней и южной тайги (Колесников и др., 1973) (соответственно 11 и 31 пробных площадей).
- Тургайский прогиб, представленный сосняками островных боров Ара-Карагай (14 пробных площадей) и Аман-Карагай (13 пробных площадей в естественных сосняках и 23 — в культурах).
- Казахский мелкосопочник, представленный сосняками Боровского лесного оазиса (7 пробных площадей).

Зауральская холмисто-предгорная провинция — это широкая холмистая равнина, которая имеет перепады высот на границах от 380 до 180 м. Основные ее морфоструктуры — плато, увенчанные остатками древних поверхностей выветривания, расчлененные речными долинами, ложбинами, понижениями в

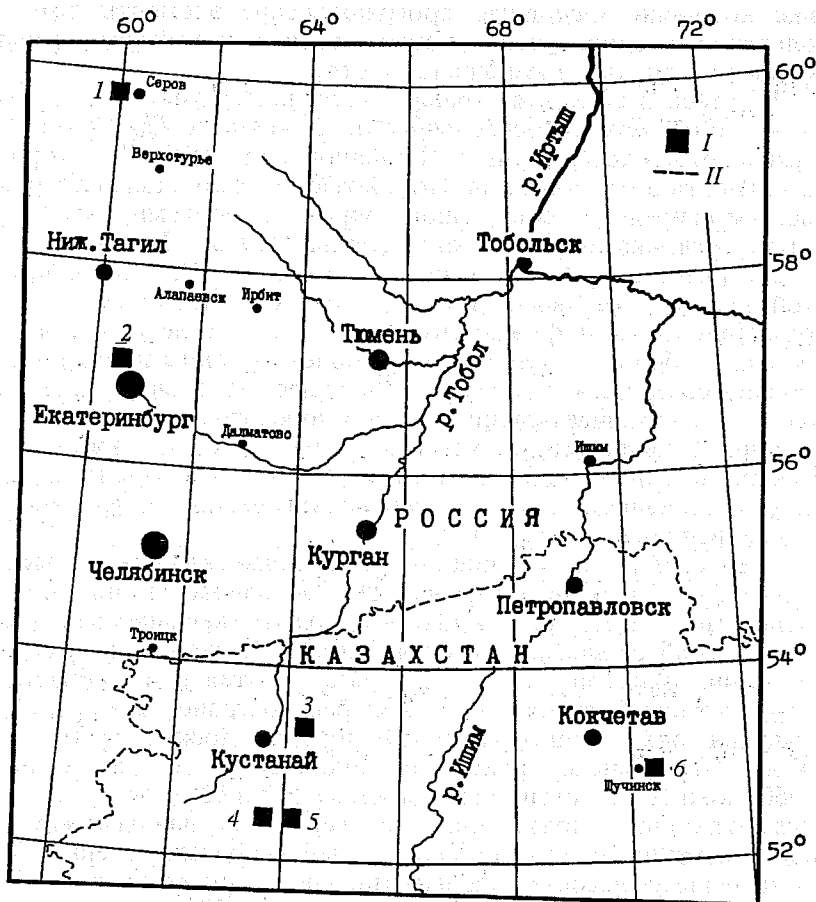


Рис. 22. География экспериментальных данных о фитомассе сосновых древостоев Урало-Казахстанского региона.

1 — расположение мест закладки пробных площадей; 1 — Карпинский лесхоз Свердловской области, средняя тайга, 2 — Учебно-опытный лесхоз Уральской лесотехнической академии, южная тайга, 3 — Аракарагайский лесхоз, островной бор Ара-Карагай, Тургайский прогнб, зона степи, 4 — Басаманский лесхоз, островной бор Аман-Карагай, там же, 5 — Смешанный лесхоз, там же, 6 — Барманшинский опытный лесхоз КазНИИЛХА, Боровской лесной оазис, Казахский мелкосопочник, II — граница между Россией и Казахстаном (I, II — здесь и на рис. 23)

виде котловин. Основные орографические элементы имеют долготное распространение, которое совпадает с общим меридиональным направлением Уральских гор.

Тургайская столовая страна в пределах Тургайского прогиба — это область относительного погружения между Уралом и Казахским мелкосопочником (Грибанов и др., 1970). Лесная растительность интразональна. Покрытые лесом площади островных боров представлены дерново-боровыми почвами, подстилаемыми суглинками и глинами (Маланьин, 1975). На северо-востоке Тургайская столовая страна примыкает к Западно-Сибирской низменности (примерно на широте западного плеса р. Тобол). Палеозойский фундамент в пределах Тургайского прогиба опущен на большую глубину с наиболее высоким положением кровли в северной части. На палеозое пластуются морские меловые и палеогеновые осадки. Кровлю морского палеогена слагает мощная толща темных чеганских глин, местами с прослоями песков. На глинах залегают толща (2—30 м) континентальных песчано-суглинистых осадков верхнеолигоценного, неогенового и четвертичного возрастов.

Казахский мелкосопочник — это древняя складчатая горная страна, сложенная дислоцированными допалеозойскими и палеозойскими, метаморфизованными породами (песчаниками, конгломератами, сланцами, известняками). Эти толщи прорваны интрузиями гранитов разного возраста. Длительный континентальный режим привел к широкому распространению кор выветривания, облекающих коренные породы (Доскач, 1960). Согласно “Природному районированию Северного Казахстана” (1960), южнее лесостепной зоны между 54° и 52° с. ш. расстилается зона степи, подразделенная (с севера на юг) на подзоны умеренно засушливых и засушливых степей. В пределах степной зоны выделяется лесостепной высотный пояс, приуроченный главным образом к Казахскому мелкосопочнику. Южнее, примерно между 48° и 41° с. ш., простирается зона пустынь (включающая Сырдарьинскую равнину), соединенная со степной зоной подзоной злаково-полынной полупустыни (Гудочкин, Чабан, 1958).

Всего заложено 99 пробных площадей (см. приложения 1 и 2), на которых по ступеням толщины взято 900 модельных деревьев. Методика их обработки и расчета показателей фитомассы изложена ранее (Усольцев, 1985а, 1988а, 1997). Масса корневых систем получена на 10 пробных площадях в аман-карагайских сосняках путем непосредственной раскопки и отмывки (Рахтеен-

Таблица 21

Характеристика обобщенных уравнений (176) для сосняков Урало-Казахстанского региона

$P_i/V, \text{ т/м}^3$	Константы (числитель) и их значимость t (знаменатель)					
	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
Для стволов	-1,4247	$\frac{0,0845}{3,6}$	$\frac{-0,0137}{3,0}$	—	—	—
Для ветвей	-0,8097	—	—	$\frac{-0,0620}{3,7}$	$\frac{0,9553}{3,7}$	$\frac{-1,1962}{4,6}$
Для хвои	-0,0122	—	—	—	$\frac{3,1481}{3,8}$	$\frac{-3,6420}{4,4}$

$P_i/V, \text{ т/м}^3$	Константы (числитель) и их значимость t (знаменатель)					R^2	SE
	a_6	a_7	a_8	a_9	a_{10}		
Для стволов	—	$\frac{0,0261}{5,2}$	—	—	$\frac{-0,0411}{3,3}$	0,366	0,081
Для ветвей	—	—	$\frac{-0,1281}{2,5}$	—	$\frac{-0,1105}{2,6}$	0,739	0,212
Для хвои	$\frac{-0,0271}{4,6}$	—	$\frac{-0,9162}{3,6}$	$\frac{0,7119}{2,9}$	—	0,921	0,153

ко, Якушев, 1968), главным образом у среднего дерева. Масса корней на 1 га определена по массе раскопанных корней дерева на площади, равной средней площади роста, путем ее умножения на эту площадь. Раскопка велась послойно на глубину проникновения корней — до 5,3 м. Корни отбирали при просеивании грунта, а тонкие корни (< 1 мм) отмывали от грунта на наборе сит с ячейками разного размера.

На основе содержательного анализа массива экспериментальных данных из 99 наблюдений (см. приложения 1 и 2) подобрана структура обобщенных для всего Урало-Казахстанского региона четырехфакторных регрессионных моделей общего вида (158) четвертого уровня приближения для переводных коэффициентов фитомассы

$$\ln(P_i/V) = a_0 + a_1(\ln A)^2 + a_2(\ln A)^3 + a_3(\ln N)^2 + a_4 \ln D + a_5 \ln H + a_6(\ln A)^2 \ln N + a_7 \ln A \ln N + a_8 \ln A \ln D + a_9 \ln A \ln H + a_{10} \ln N \ln D. \quad (176)$$

Модели рассчитаны по программе STATGRAPHICS, их характеристика дана в табл. 21. Все они имеют предварительный

характер, обусловленный ограниченным количеством экспериментальных данных для названного региона и могут применяться лишь для общих расчетов.

По мере пополнения массива новыми экспериментальными данными параметры моделей (176) будут уточняться. Кроме повышения адекватности моделей (176) в результате расширения области варьирования массоопределяющих факторов (что обычно имеет место при пополнении массива данных), названное уточнение предполагает группировку экспериментальных данных по подрегионам и расчет моделей вида (149) или (158) по каждому подрегиону отдельно.

Условия роста таежных сосняков Урала и степных сосняков Тургайского прогиба существенно различаются (например по количеству среднегодовых осадков — вдвое). Сосна Тургайского прогиба произрастает на перевейанных песчаных отложениях древней ложбины стока по существу в экстремальных лесорастительных условиях на южной границе ее ареала. Жесткость этих условий постепенно усугубляется вследствие понижения уровня грунтовых вод и общей аридизации территории. Сосна Казахского мелкосопочника (как и в Тургайском прогибе), представляющая интразональное явление, произрастает на гранитных интрузиях и древних корах выветривания (Грибанов и др., 1970) и характеризуется своей спецификой — повышенной толщиной коры, поверхностной корневой системой, а также необычной по сравнению с другими подрегионами продолжительностью жизни хвой — 7 лет (Петров, 1961), возможно, обусловленной высоким природным радиационным фоном.

Названные различия проявляются лишь на описательном уровне и не могут быть выражены количественно, а одно из ограничений математического моделирования заключается в степени формализуемости исследуемых факторов. Многие явления и признаки в лесных экосистемах нельзя пока выразить числом и мерой, но это ограничение скорее техническое, чем принципиальное, и оно со временем модифицируется. Например, метод факторного планирования экспериментов, в котором все уровни некоторого фактора комбинируются со всеми уровнями прочих факторов, предполагает использование не только количественных, но и качественных факторов, которые, как правило, можно квантифицировать и использовать алгоритмы регрессионного анализа (Клейнен, 1978).

Обычно факторы, используемые в регрессионных задачах, принимают цифровые значения из некоторого непрерывного интервала (возраст древостоя, его густота, диаметр ствола и т. д.). В том случае, если это условие не соблюдается, используют так называемые фиктивные переменные (Дрейпер, Смит, 1973), к одной из разновидностей которых можно отнести и качественные переменные, оцифрованные числами натурального ряда. Если факторы качественные, то их уровням приписываются числа просто из мнемонических соображений (Клейнен, 1978). "...Например, цвет или даже оттенок может быть выражен в числах только потому, что нам известна радуга" (Ивахненко, 1969, с. 152).

С. А. Айвазян с соавторами (1985) различают количественные (т. е. взятые в непрерывном интервале) и порядковые (т. е. оцифрованные и упорядоченные) переменные и рекомендуют для второго случая соответствующий математический аппарат. Однако Дж. Клейнен (1978), уделявший большое внимание проблеме робастности оценок при многофакторных экспериментах, не видит необходимости вводить здесь какие-то ограничения. Правда, в таких случаях приходится иметь дело с "моделью с ошибками в переменных" (Себер, 1980), которой свойственен специфичный алгоритм расчета, но все эти методы, как правило, более сложны, чем метод наименьших квадратов. По мнению Дж. Себера (1980), если значения переменных контролируются, то модель можно исследовать таким же образом, как в ситуации, когда переменные не содержат ошибок.

Ю. П. Адлер с соавторами (1976) полагают, что "... граница между понятием качественного и количественного фактора весьма условна" (с. 48). Например, цвет можно квантифицировать не путем кодирования числами натурального ряда, а через длину волны, но насколько это будет оправдано? Набор типов леса от лишайниковой до сфагновой группы представляет экологический ряд (своеобразную радугу), элементы которого нельзя произвольным образом поменять местами, а можно лишь сменить порядок на обратный. В этих случаях мы имеем дело с типичными порядковыми переменными, которые широко применяются в лесоводстве (класс Крафта, разряд высот, класс бонитета) и в том числе — в процедуре многомерного регрессионного анализа (Тябера, 1980; Онучин, Борисов, 1984; Яновский, Моисеев, 1985).

В нашу прогностическую модель послепожарного отпада лиственницы на многолетней мерзлоте включены четыре определяющих фактора — мерзлотный пояс (северный, средний, южный), группа типов леса (лишайниковая, зеленомошная, кустарничково-моховая, сфагновая), интенсивность пожара (низкая, средняя, высокая) и средний диаметр древостоя. Несмотря на то, что первые три из них представлены порядковыми переменными, модель объясняла 94 % изменчивости зависимой переменной (Матвеев, Усольцев, 1991).

Применительно к задаче выявления географических закономерностей в изменении переводных коэффициентов фитомассы сосняков можно было бы тоже использовать порядковые переменные, ранжируя пробные площади по зональному градиенту (от подзоны средней тайги до зоны степи). Однако выполнить такое упорядочение оказалось невозможно, поскольку на природный “профиль продуктивности” (Лавренко и др., 1955) накладывается антропогенный фактор — наличие существенного промышленного загрязнения лесов на Среднем Урале. Выходит из общей зональной закономерности и Казахский мелкосопочник в силу упомянутой специфичности лесорастительных условий.

Таким образом, принадлежность пробных площадей к тому или иному подрегиону в нашем случае можно закодировать числами натурального ряда, но нельзя их упорядочить. Такие переменные относятся к особому типу, С. А. Айвазян с соавторами (1985) называют их номинальными. Чтобы гармонизировать, или согласовать между собой регрессионные модели переводных коэффициентов для каждого подрегиона, их необходимо объединить в какую-то систему. Н. Дрейпер и Г. Смит (1973) для таких случаев предложили использовать блочные фиктивные переменные, квантифицированные специфичными кодированными уровнями. Если, например, разделить наши экспериментальные данные по четырем подрегионам, то кодировка может быть следующей: $X_1 = 0, X_2 = 0, X_3 = 1$ — для естественных сосняков Урала; $X_1 = 0, X_2 = 1, X_3 = 0$ — для естественных сосняков Казахского мелкосопочника; $X_1 = 1, X_2 = 0, X_3 = 0$ — для культур сосны Тургайского прогиба и $X_1 = 0, X_2 = 0, X_3 = 0$ — для естественных сосняков Тургайского прогиба. Каждый блок переменных (X_1, X_2, X_3), характеризующий подрегион, повторяется в исходной матрице экспериментальных данных столько раз, сколько заложено пробных площадей в каждом подрегионе.

Блоки (X_1, X_2, X_3) включаются в общую структуру моделей (149) или (158). Если какой-то из первых трех подрегионов (при условии идентичности массоопределяющих факторов) достоверно отличается по величине переводного коэффициента от четвертого, закодированного одними нулями, то соответствующая фиктивная переменная в блоке должна быть статистически значимой на уровне $t > 2,0$. Фактически речь идет об оценке достоверности различий многофакторных оценочных регрессий переводного коэффициента, характеризующих разные подрегионы, которые согласованы между собой в рамках одной системы. Для сравнения нескольких уравнений парной связи есть и другие алгоритмы, основанные, например, на оценке дисперсий углового коэффициента и свободного члена регрессий (Хальд, 1956; Урбах, 1964), однако для многофакторных уравнений они непригодны.

В целях гармонизации, т. е. согласования между собой двух фракций фитомассы крон (хвои и ветвей) применен рекурсивный принцип, т. е. цепочка взаимозависимых уравнений (см. раздел 2.5.4). В частности, если в уравнение переводного коэффициента для массы ветвей кроны включены только названные выше четыре массоопределяющих фактора, то в соответствующее уравнение для массы хвои кроме них введен в качестве независимой переменной переводной коэффициент массы ветвей.

Модели (149) и (158) различаются тем, что в первую входит класс бонитета H_{100} , а во второй он заменен средней высотой H . Хотя в принципе обе модели взаимозаменяемы, первая из них более удобна при совмещении с региональными банками лесоучетных данных. Для оценки различия переводных коэффициентов по подрегионам подобрана следующая структура многофакторной регрессии:

$$\begin{aligned} \ln(P_i/V) = & a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + a_3X_3 + a_4\ln A + a_5(\ln A)^2 + \\ & + a_6(\ln A)^2\ln N + a_7\ln H_{100} + a_8\ln A\ln H_{100} + a_9(\ln A)^2\ln H_{100} + \\ & + a_{10}\ln D + a_{11}(\ln D)^2 + a_{12}\ln A\ln D + a_{13}(\ln N)^2 + a_{14}\ln(P_i/V), \end{aligned} \quad (177)$$

где P_i/V — переводной коэффициент фитомассы соответственно стволов, ветвей и хвои, кг/м³. Характеристика (177) дана в табл. 22.

Различие моделей переводных коэффициентов оказалось недостоверным по массе стволов для всех подрегионов (значи-

Таблица 22

Характеристика уравнений (177) для переводных коэффициентов фитомассы сосняков трех подрегионов

$P_f/V, \text{ кг/м}^3$	Константы (числитель) и их значимость t (знаменатель)						
	a_0	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7
Для стволов	-11,891	—	—	10,7945 2,7	-1,5636 2,8	0,00639 2,1	5,3070 2,4
Для ветвей	-9,2557	0,5419 4,7	0,3396 4,6	—	—	—	—
Для хвои	28,5260	—	—	-9,7268 3,6	0,8246 3,0	—	-5,8167 3,3

$P_f/V, \text{ кг/м}^3$	Константы (числитель) и их значимость t (знаменатель)							R^2
	a_8	a_9	a_{10}	a_{11}	a_{12}	a_{13}	a_{14}	
Для стволов	-3,1030 2,5	0,4186 2,5	-0,8182 2,5	—	0,2906 2,7	—	—	0,244
Для ветвей	-0,6115 14,4	—	—	0,2795 8,4	—	-0,0388 3,2	—	0,774
Для хвои	1,3896 3,0	—	2,2919 2,6	—	-0,6643 2,6	—	0,5284 6,3	0,927

Таблица 23

Запасы надземной фитомассы естественных сосновых древостоев трех регионов, совмещенные по определяющим показателям ТХР V класса бонитета (Загрезв и др., 1992)

A, лет	N, тыс. экз/га	D, см	V, м ³ /га	Надземная фитомасса, т/га					
				Всего			В том числе хвоя		
				Тургай	Урал	Мяско-сопочник	Тургай	Урал	Мяско-сопочник
20	16,00	3,0	25	18	20	22	5,5	6,7	7,5
40	5,23	6,7	68	40	44	46	4,7	5,3	6,2
60	2,68	10,4	116	54	58	60	3,8	4,4	4,9
80	1,73	13,7	156	76	82	88	3,7	4,3	4,8
100	1,25	16,6	186	82	88	94	3,3	4,2	4,7

мость констант при X_1 , X_2 и X_3 в уравнении (177) равна соответственно 0,4; 0,2; 0,4, что меньше t_{05} , а по массе ветвей это различие недостоверно только для естественных сосняков и культур Тургайского прогиба (значимость констант при X_1 , X_2 и X_3 в уравнении (177) — соответственно 0,6; 4,7; 4,6). В уравнении для массы хвои уровень значимости констант для всех подрегионов меньше $t_{05} = 2,0$ (соответственно 1,4; 1,7; 0,2). Тем не менее, поскольку в уравнение (177) для переводного коэффициента массы хвои в качестве одной из значимых независимых переменных входит переводной коэффициент массы ветвей, то различие естественных сосняков трех подрегионов проявляется по массе хвои опосредованно, через массу ветвей. Таким образом, между регрессиями переводного коэффициента для культур и естественных сосняков Тургайского прогиба нет достоверного различия по всем фракциям фитомассы, поэтому константа a_1 не включена в табл. 22. По массе ветвей и (опосредованно) хвои различия между регрессиями для естественных сосняков Урала, Тургая и Казахского мелкосопочника достоверны.

На основе уравнений (177), приведенных в табл. 22, можно составить эскизы таблиц биопродуктивности, или таблицы хода роста фитомассы сосняков, состыковав эти уравнения с региональными ТХР. Однако для трех регионов Северного Казахстана такое совмещение было выполнено раньше (Усольцев, 1987, 1988а,б), а для Урала в настоящее время З. Я. Нагимовым подготовлены таблицы хода роста фитомассы сосняков разных классов густоты, в основе которых лежат более обширные экспериментальные данные о фитомассе сосняков, нежели представленные в приложении 2. В связи с выявленными выше региональными различиями переводных коэффициентов представляет интерес показать величину этих расхождений на базе какого-то эталона ТХР по принципу “Что будет, если...”, т. е. при условии равенства массообразующих показателей древостоев.

Сопоставление запасов надземной фитомассы сосняков трех регионов (табл. 23) выполнено путем сопряжения моделей (177) с всеобщей таблицей хода роста сосняков V класса бонитета ($H_{100} = 13$ м) (Загреев и др., 1992). Полученные показатели для Северного Казахстана соответствуют показателям для очень сухих сосняков на песчаных отложениях (Тургайский прогиб) и гранитных интрузиях (Казахский мелкосопочник), а для Среднего Урала — таковым для сосняков болотных типов. Большая

масса кроны у сосны Урала и Казахского мелкосопочника по сравнению с сосной Тургайского прогиба при одних и тех же значениях четырех массообразующих показателей и запасов стволовой древесины может быть обусловлена в первом случае — влиянием промышленных эмиссий, а во втором — наличием высокого природного радиационного фона и большей (на 3—4 года) продолжительностью жизни хвои вследствие возможного действия компенсационных механизмов (Абатуров и др., 1991). По сравнению с сосняками Тургая общая надземная фитомасса сосняков Урала выше на 7—11 %, а Казахского мелкосопочника — на 15—22 %. Поскольку по массе стволовой древесины между подрегионами различий нет, названные превышения имеют место за счет большей массы кроны в последних двух подрегионах. По массе хвои различие подрегионов более значительно — соответственно на 13—27 и 30—40 %.

3.3.2. БЕРЕЗНЯКИ УРАЛА И СЕВЕРНОГО КАЗАХСТАНА

Исследования структуры фитомассы березняков (*Betula pubescens* Ehrh., *B. pendula* Roth.) выполнены на территории Урало-Казахстанского региона, в пределах которого заложенные пробные площади можно сгруппировать по четырем подрегионам (рис. 23).

- Зауральская холмисто-предгорная провинция в подзоне южной тайги (11 пробных площадей).
- Южноуральская провинция горных южнотаежных и смешанных лесов (11 пробных площадей).
- Тургайский прогиб, представленный березняками бора Ара-Карагай (18 пробных площадей).
- Западно-Сибирская низменность в подзоне южной лесостепи (23 пробных площади).

Западно-Сибирская низменность представляет собой обширную аккумулятивную равнину, сложенную континентальными отложениями четвертичного и неогенового возрастов. Континентальный режим здесь установился после отступления палеогенового моря, что, очевидно, произошло несколько позднее, чем на окружающих более высоких равнинах (Доскач, 1960). На основании комплекса природных особенностей, в первую очередь климата, а также почвенного и растительного покровов За-

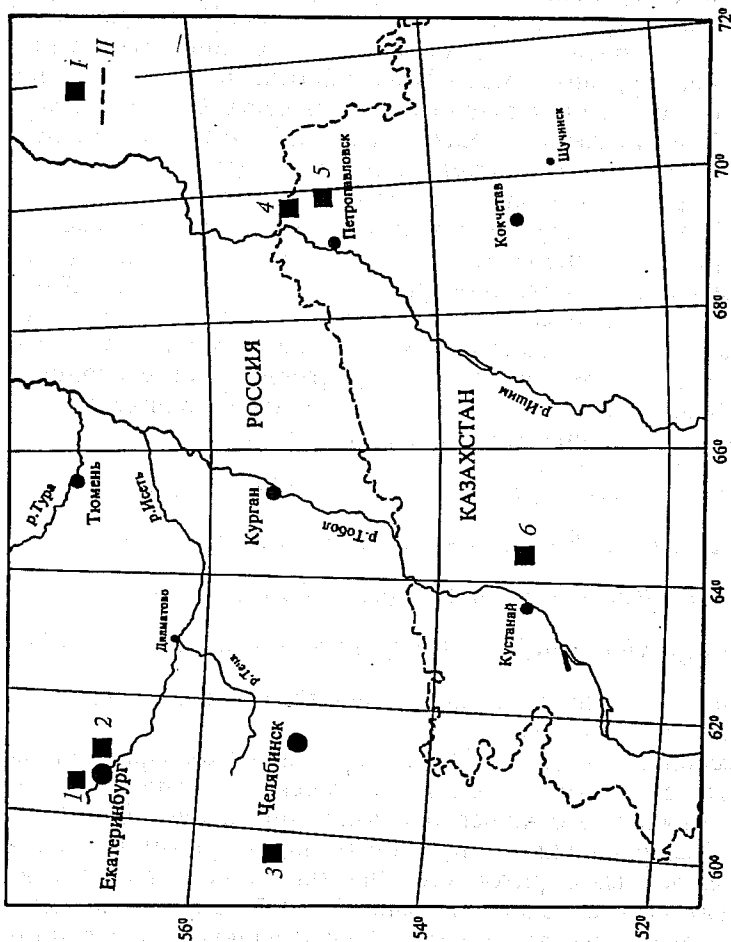


Рис. 23. География экспериментальных данных о фитомассе березовых древостоев Урало-Казхастанского региона.

1 — Учебно-опытный лесхоз УГЛТУ, южная тайга, 2 — Березовский лесхоз Свердловской области, южная тайга, 3 — Кулинский лесхоз Челябинской области, горные южнотаежные и смешанные леса, 4 — Согорский лесхоз Северо-Казхастанской области, южная лесостепь, 5 — Полуинский лесхоз, там же, 6 — Аракарагайский лесхоз Кусганайской области, Тургайский прогиб, зона степи

падно-Сибирская низменность в широтном направлении расчленена на ряд природных зон — от полярных пустынь на севере до степи на юге (Г. Крылов, А. Крылов, 1969). Зона осиново-березовых лесов, центральная часть которой проходит по линии Тюмень—Томск, к югу сменяется зоной лесостепи. Последняя подразделена на северную и южную подзоны с границей между ними по линии Курган—Омск—Новосибирск. Южная подзона включает в себя выступающую на север часть Северо-Казахстанской области Северного Казахстана. А. Г. Доскач (1960) выделяет к югу от южной лесостепи колючую (нетипичную) лесостепь, простирающуюся на юг примерно до 54° с. ш.

Всего было заложено 63 пробных площади (см. приложение 3), на которых по ступеням толщины взято 660 модельных деревьев по методике, изложенной ранее (Усольцев, 1985а, 1988а, 1997). На основе анализа массива экспериментальных данных из 63 наблюдений подобрана структура обобщенных для всего Урало-Казахстанского региона четырехфакторных регрессионных моделей общего вида (158) четвертого уровня приближения для переводных коэффициентов надземной фитомассы (т/м³):

$$\begin{aligned} \ln P_d/V = & a_0 + a_1 \ln A + a_2 (\ln A)^2 + a_3 (\ln A)^3 + a_4 \ln N + a_5 (\ln N)^2 + \\ & + a_6 \ln D + a_7 H^2 + a_8 \ln H + a_9 (\ln A)^2 \ln N + a_{10} \ln A \ln N + \\ & + a_{11} H (\ln A)^2 + a_{12} H \ln A + a_{13} \ln D \ln H + a_{14} H \ln N + \\ & + a_{15} \ln N \ln H + a_{16} \ln A \ln D + a_{17} \ln A \ln H + a_{18} \ln N \ln D. \end{aligned} \quad (178)$$

Характеристика рассчитанных уравнений и значения их констант приведены в табл. 24.

Регрессионные модели (178) для переводных коэффициентов фитомассы березняков Урало-Казахстанского региона, как и (176) для сосняков того же региона, имеют предварительный характер, обусловленный ограниченным количеством экспериментальных данных о фитомассе. Значения констант и показатели адекватности моделей, показанные в табл. 24, действительны только для массива экспериментальных данных, приведенного в приложении 3, и по мере пополнения этого массива будут уточняться.

Для предварительного выявления различий моделей переводных коэффициентов по подрегионам применены блоковые

Характеристика обобщенных уравнений (178) для березняков
Урало-Казахстанского региона

$P/V, \text{ т/м}^3$	Константы (числитель) и их значимость t (знаменатель)						
	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6
Для стволов	1,388	$\frac{-2,538}{4,3}$	—	—	—	—	$\frac{0,292}{2,6}$
Для ветвей	6,330	$\frac{10,510}{2,2}$	$\frac{-3,963}{2,5}$	$\frac{0,254}{2,2}$	$\frac{-7,456}{3,4}$	$\frac{0,876}{3,4}$	$\frac{-13,117}{2,5}$
Для листвы	-15,735	$\frac{22,101}{2,8}$	$\frac{-9,307}{3,1}$	$\frac{0,732}{2,7}$	—	—	$\frac{-5,484}{2,6}$

$P/V, \text{ т/м}^3$	Константы (числитель) и их значимость t (знаменатель)						
	a_7	a_8	a_9	a_{10}	a_{11}	a_{12}	a_{13}
Для стволов	$\frac{0,007}{2,5}$	—	$\frac{-0,080}{4,5}$	$\frac{0,877}{6,0}$	$\frac{0,017}{3,2}$	$\frac{-0,209}{3,1}$	—
Для ветвей	—	$\frac{-1,339}{3,8}$	—	—	—	—	—
Для листвы	—	—	$\frac{0,301}{2,7}$	$\frac{-1,224}{3,1}$	—	—	$\frac{-3,635}{2,9}$

$P/V, \text{ т/м}^3$	Константы (числитель) и их значимость t (знаменатель)					R^2	SE
	a_{14}	a_{15}	a_{16}	a_{17}	a_{18}		
Для стволов	$\frac{0,054}{4,1}$	$\frac{-1,080}{6,3}$	—	$\frac{1,312}{3,6}$	—	0,582	0,060
Для ветвей	—	—	$\frac{3,292}{2,5}$	—	$\frac{2,477}{3,2}$	0,707	0,281
Для листвы	—	—	$\frac{3,993}{2,9}$	$\frac{2,197}{2,6}$	—	0,807	0,355

фиктивные переменные, согласно выше приведенной предварительной группировке пробных площадей, по четырем подрегионам. Однако названные различия между двумя последними подрегионами оказались недостоверны по всем фракциям надземной фитомассы и они были объединены в один Северо-Казахстанский подрегион.

В окончательном варианте принята следующая кодировка подрегионов: $X_1 = 0$; $X_2 = 0$ — Северный Казахстан; $X_1 = 1$;

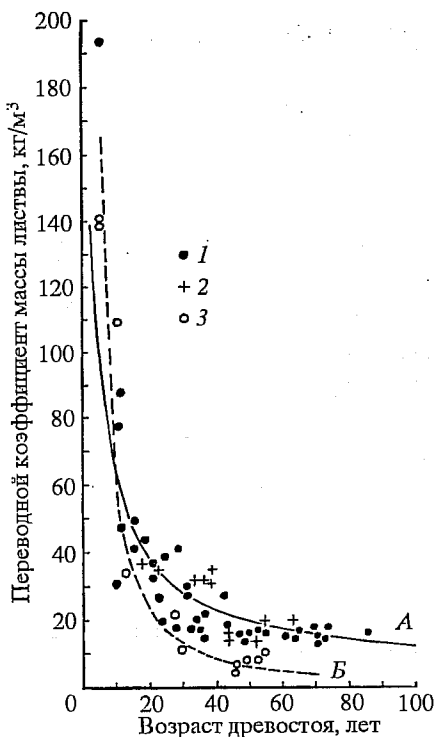


Рис. 24. Зависимость переводного коэффициента (отношения массы листы P_f в абсолютно сухом состоянии (кг/га) к запасу (V , м³/га) стволовой древесины) от возраста березняков.

1 — Северный Казахстан, 2 — Южный Урал, 3 — Средний Урал. Линии регрессии построены по уравнениям: $\ln(P_f/V) = -1,156 - 0,708 \ln A$ (линия А — для регионов 1 и 2); $\ln(P_f/V) = 0,472 - 1,421 \ln A$ (линия Б — для региона 3); $R^2 = 0,825$; $SE = 0,320$

$X_2 = 0$ — Южный Урал; $X_1 = 0$; $X_2 = 1$ — Средний Урал. Вначале исследована однофакторная зависимость переводного коэффициента только с возрастом A (см. уравнение (159) в разделе 3.1). Блоки (X_1, X_2) включены в структуру модели (159). Модели (159) различаются не по всем подрегионам, но в пределах подрегиона есть различия по фракциям. Так, для переводных коэффициентов массы листы P_f/V

(кг/м³) и ветвей P_b/V (кг/м³) получены уравнения

$$\ln(P_f/V) = -1,156 + 1,628X_2 - 0,713X_2 \ln A - 0,708 \ln A; \quad (179)$$

$$R^2 = 0,825; SE = 0,320,$$

$$\ln(P_b/V) = -1,258 - 0,285X_1 - 0,161X_2 \ln A - 0,287 \ln A; \quad (180)$$

$$R^2 = 0,389; SE = 0,390,$$

свидетельствующие о достоверности различия обеих моделей между березняками Северного Казахстана и Среднего Урала, а между березняками Северного Казахстана и Южного Урала есть различия по переводному коэффициенту P_b/V , но нет по коэффициенту P_f/V (рис. 24). Названные различия или их отсутствие

могли быть следствием того, что исследуемые подрегионы характеризовались разными уровнями продуктивности (классами бонитета H_{50}) и разными показателями плотности древостоев (совокупностью D и N).

Более корректно переводные коэффициенты можно сопоставить при условии равенства всех массообразующих показателей в подрегионах. Для этого блоки (X_1X_2) включены в структуру модели (149). В целях "гармонизации" различных фракций наземной фитомассы применен рекурсивный принцип. Так, если в уравнение (149) для переводных коэффициентов общей массы стволов P_s/V и ветвей P_b/V включены только названные четыре массообразующих фактора, то в соответствующие уравнения переводных коэффициентов массы коры ветвей и массы листвы введен в качестве независимой переменной переводной коэффициент общей массы ветвей P_b/V , а в уравнение для массы коры стволов — переводной коэффициент общей массы стволов P_s/V (табл. 25).

В результате обработки экспериментальных значений переводных коэффициентов P_i/V (т/м^3) по программе многофакторного регрессионного анализа получены уравнения вида:

$$\begin{aligned} \ln(P_i/V) = & a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + a_3\ln A + a_4\ln H_{50} + a_5(\ln H)^2 + \\ & + a_6\ln D + a_7(\ln D)^2 + a_8\ln N + a_9\ln A\ln N + a_{10}(\ln A)^2\ln N + \\ & + a_{11}\ln A(\ln D)^2 + a_{12}(\ln A)^2\ln D + a_{13}\ln A\ln D + \\ & + a_{14}\ln N(\ln D)^2 + a_{15}\ln H_{50}\ln D + a_{16}\ln H_{50}\ln A + \\ & + a_{17}\ln(P_b/V) + a_{18}\ln(P_s/V) + a_{19}\ln(P_s/V)\ln H_{50}, \end{aligned} \quad (181)$$

характеристика которых приведена в табл. 25. В уравнении (181) H_{50} — класс бонитета, выраженный средней высотой древостоя (м) в базовом возрасте 50 лет по бонитетной шкале М. М. Орлова.

Различие моделей переводного коэффициента для массы стволов в коре между подрегионами Северного Казахстана и Среднего Урала оказалось недостоверным, но березняки Южного Урала характеризуются несколько более высокими значениями этого показателя (т. е. повышенной плотностью древесины) по сравнению с другими подрегионами ($t = 3,7 > t_{0,5} = 2,0$). Напротив, модели переводного коэффициента массы ветвей между

Таблица 25

Характеристика уравнений (181) для переводных коэффициентов фитомассы березняков трех подрегионов

$P/V, \text{ т/м}^3$	Константы (числитель) и их значимость t (знаменатель)						
	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6
Для стволов	-1,6379	<u>0,071</u> 3,7	—	<u>3,973</u> 3,6	<u>9,483</u> 3,8	<u>-1,376</u> 3,8	<u>-4,505</u> 4,4
Для коры стволов	-1,173	<u>-0,367</u> 8,9	<u>-0,152</u> 3,7	—	—	—	—
Для ветвей в целом	6,551	—	<u>-0,395</u> 3,8	<u>-1,837</u> 5,5	<u>-1,351</u> 5,1	—	—
Для коры ветвей	-1,395	<u>0,062</u> 5,5	<u>0,094</u> 7,3	—	<u>0,296</u> 2,4	—	<u>0,582</u> 3,2
Для листвы	-0,184	<u>0,311</u> 2,9	<u>-0,394</u> 3,4	—	—	—	—

$P/V, \text{ т/м}^3$	Константы (числитель) и их значимость t (знаменатель)						
	a_7	a_8	a_9	a_{10}	a_{11}	a_{12}	a_{13}
Для стволов	<u>0,514</u> 7,8	—	—	<u>-0,010</u> 2,2	<u>-0,070</u> 6,0	—	—
Для коры стволов	—	—	—	—	—	<u>-0,013</u> 8,2	—
Для ветвей в целом	—	<u>-0,311</u> 2,1	—	—	—	—	<u>0,196</u> 2,2
Для коры ветвей	—	—	—	—	—	—	<u>-0,069</u> 9,6
Для листвы	—	—	<u>-0,149</u> 4,0	—	—	—	<u>-0,170</u> 3,5

$P/V, \text{ т/м}^3$	Константы (числитель) и их значимость t (знаменатель)						R^2	SE
	a_{14}	a_{15}	a_{16}	a_{17}	a_{18}	a_{19}		
Для стволов	<u>0,023</u> 2,7	<u>1,198</u> 3,5	<u>-1,299</u> 3,5	—	—	—	0,680	0,053
Для коры стволов	—	—	—	—	<u>0,010</u> 2,4	<u>0,297</u> 4,8	0,805	0,118
Для ветвей в целом	—	—	—	—	—	—	0,668	0,288
Для коры ветвей	—	<u>-0,171</u> 3,1	—	<u>0,991</u> 96,8	—	—	0,998	0,030
Для листвы	—	<u>-0,149</u> 2,4	—	<u>0,343</u> 2,7	—	—	0,912	0,214

подрегionsами Южного Урала и Северного Казахстана достоверно не различаются, а березняки Среднего Урала характеризуются несколько меньшими значениями этого показателя по сравнению с остальными подрегionsами ($t = 3,8 > t_{0,5} = 2,0$). Совершенно неожиданными оказались различия моделей переводного коэффициента массы листвы: для Северного Казахстана этот показатель ниже, чем для Южного Урала ($t = 2,9$), но выше, чем для Среднего Урала ($t = 3,4$).

Все сопоставления переводных коэффициентов на уровне моделей ведутся (как и в разделе 3.3.1 для сосны) при условии равенства массообразующих показателей, а они, как известно, имеют четко выраженную широтную зональность (Львов, Ипатов, 1973). Поэтому отмеченные различия обусловлены скорее всего локальными особенностями лесорастительных условий, не вписывающимися в широтный “профиль продуктивности”. Например, наши южноуральские объекты исследований находятся в 60 км от эпицентра радиоактивного выброса 1957 г., образовавшего зону так называемого уральского радиоактивного следа. Возможно, повышенное облиствение этих березняков по сравнению с прилегающими с юга и севера подрегionsами обусловлено в этой связи действием определенных стимулирующих или компенсационных механизмов (Абатуров и др., 1991). Совершенно не изучена в этом плане флуктуирующая асимметрия для оценки стабильности развития на популяционно-феногенетическом уровне (Кряжева и др., 1996). Из-за ограниченного экспериментального материала неизвестно также влияние высотной поясности. Наконец, подрегions различаются видовым составом — на Урале преобладает *Betula pubescens* Ehrh., а в степной зоне — *B. pendula* Roth. Последний фактор особенно трудно поддается учету: например в южной лесостепи центральную часть блюдцеобразных понижений под березовыми колками занимает первый вид, а периферийную — второй. В результате оба вида часто присутствовали даже в пределах одной пробной площади.

Несмотря на отмеченные неопределенности, совершенно очевидно, что, поскольку при условии равенства массообразующих показателей и запасов стволовой древесины между подрегionsами имеются статистически достоверные различия в пропорциях массы различных фракций, для каждого из них необходимы отдельные таблицы биопродуктивности. Такие таблицы состав-

лены путем совмещения моделей переводных коэффициентов фитомассы березняков Северного Казахстана с местными (Усольцев, 1988а) и всеобщими ТХР Н. Я. Саликова (Нормативы..., 1993; табл. 3.6.2). Для Среднего Урала составлены Л. А. Лысовым (Луганский, Лысов, 1991) местные ТХР березовых древостоев по типам леса, а таблицы биопродуктивности отсутствуют. Поэтому регрессионные модели (181) (см. табл. 25) совмещены с названными ТХР и в результате впервые для Урала получены эскизы таблиц биологической продуктивности березовых древостоев (см. приложение 4).

Регрессионные модели (181) можно совместить с любой ТХР березовых древостоев. Поскольку бонитирование березняков пробных площадей выполнено по шкале М. М. Орлова, а каждая региональная ТХР имеет в основе свою шкалу, то для их совмещения бонитетная шкала М. М. Орлова для семенных древостоев аппроксимирована уравнением:

$$\begin{aligned} \ln H_{50} = & -0,8838 + 4,0578 \ln A - 1,4648 (\ln A)^2 + \\ & + 0,1247 (\ln A)^3 - 0,2732 \ln H + 0,0582 (\ln H)^2 + \\ & + 0,2796 \ln A \ln H - 3,5812 \cdot 10^{-6} (\ln A)^2 \ln H + 8,2309 \cdot 10^{-7} \ln A (\ln H)^2; \\ R^2 = & 0,994; SE = 0,041. \end{aligned} \quad (182)$$

Необходимы отдельные таблицы биопродуктивности также для березняков Челябинской области. В настоящее время выполнить это невозможно, поскольку ТХР чистых березовых древостоев для этого подрегиона нет, а имеющихся пробных площадей, заложенных для оценки фитомассы древостоев (см. приложение 3), для составления таких таблиц недостаточно.

3.3.3. ОСИННИКИ НА ТЕРРИТОРИИ БЫВШЕГО СССР

К осине (*Populus tremula* L.) в лесоводстве сложилось неоднозначное отношение: с одной стороны, это порода-сорняк, а с другой — лесоматериал, по физико-механическим показателям стоящий в одном ряду с дубом, лиственницей, ильмом (Нестеров, 1894); с одной стороны, это серокорая форма, в сухих условиях погибающая от стволовой гнили, едва достигнув 40 лет, а с другой — исполинская (триплоидная) форма, сохраняющая здоро-

вую древесину до 120 лет и более. Благодаря способности рода *Populus* L. к быстрому росту, его наиболее перспективные гибриды, такие как *Populus* "Tristis #1", стали объектом повышенного внимания при создании "энергетических" плантаций с первоочередной оценкой продукции фитомассы (Ек, Dawson, 1976; Zavitkovski, 1983).

Исследования продуктивности фитомассы и содержания элементов питания в насаждениях рода *Populus* L. начаты в 1950—1960 гг. (Ремезов, Быкова, 1953; Ремезов и др., 1959; Satoo et al., 1956; Bray, Dudkiewicz, 1963; Ovington, 1963; Young et al., 1964, 1965; Lieth et al., 1965; Young, Guinn, 1966; Bella, Jarvis, 1967). Оценки надземной фитомассы варьируют в широких диапазонах. Для тополя осинообразного (*P. tremuloides*) они составляют в абсолютно сухом состоянии в возрасте 40—55 лет от 58 до 290 т/га (Bray, Dudkiewicz, 1963); 66—89 лет — от 35 до 176 т/га, в том числе листья 0,7—2,9 т/га (Peterson et al., 1970); 5—52 года — от 24 до 93, в том числе листья 1,5—2,6 (Pollard, 1972); 40 лет — 167, в том числе листья 3,6 (Alban et al., 1978); 49 лет — 179, в том числе листья 4,2 т/га (Perala, Alban, 1979). Для тополя крупнозубчатого (*P. grandidentata* Michx.) в возрасте 55 лет на почвах добротных, средней добротности и бедных запасы надземной фитомассы составляли соответственно 172, 129 и 39 т/га, а годовичная продукция — 11,0; 7,3 и 2,9 т/га; прирост, отнесенный к единице массы листьев, в худших почвенных условиях на 33 % ниже, чем в лучших (Koeper, Richardson, 1980).

Для гибрида тополей печального (*P. tristis* Frisch.) и бальзамического (*P. balsamifera* L.) получены показатели возрастной динамики годичной продукции надземной фитомассы по фракциям на 1 га в течение 10 лет после посадки (Zavitkovski, 1983). К возрасту 10 лет при размещении 2,4×2,4 м годовичный прирост надземной фитомассы достиг 14 т/га, в том числе листья — 4 т/га (Ек, Dawson, 1976). Исследованиями биопродуктивности белотопольевников (*P. alba* L.) в пойме р. Урал в широком диапазоне условий произрастания (классы бонитета — от Ia до Va) и возрастов (от 11 до 68 лет) получены значения надземной фитомассы от 0,74 до 225 т/га и ее годичной продукции — от 0,14 до 19 т/га (Оськина, Беспалов, 1992).

Данные о запасах фитомассы осиновых лесов (*P. tremula* L.) на территории бывшего СССР по сравнению с другими лесообразующими породами незначительны. Цифры о полном фрак-

ционном составе фитомассы осинников представлены лишь в единичных работах (Ремезов, Быкова, 1953; Ремезов и др., 1959; Поликарпов, 1962; Смирнов, Семенова, 1974; Копосов, 1975; Вакуров, Полякова, 1982). Обычно эти цифры приводятся только для надземной фитомассы (Поздняков и др., 1969; Взнуздаев и др., 1969, 1971; Габеев, 1976; Дылис, Носова, 1977; Демиденко, 1978; Тамм, Росс, 1979, 1980; Рождественский, 1979, 1982), часто по ее неполному фракционному составу (Данилов, 1949, 1953; Смирнов, 1957, 1962, 1971; Смирнов, Одинокова, 1954; Скрыбин, 1957; Козьмин, 1965; Усольцев, 1974), либо с неполной таксационной характеристикой древостоев (Протопопов, 1971; Игнатьева, 1971; Смирнов, 1971). Иногда публикуются данные о фитомассе отдельных деревьев осины по ступеням толщины (Смирнов, 1957; Иевинь, Дикельсон, 1962; Жукова, 1969; Усольцев, 1972) при отсутствии рядов распределения деревьев, что не дает сведений о фитомассе древостоев.

Исследование настоящего раздела выполнено на основе собственных, ранее не опубликованных материалов автора (см. приложение 5) и литературных данных о фитомассе осинников в различных регионах бывшего СССР (см. приложение 6) (рис. 25). Экспериментальные материалы получены автором в чистых и с примесью березы одновозрастных осинниках колочных лесов южной лесостепи, в Согровском лесхозе Северо-Казахстанской области (12 пробных площадей), Казахском мелко-сопочнике зоны степи, Бармашинском и Буландинском лесхозах Кокчетавской области (14 пробных площадей) и в островном бору Ара-Карагай Тургайского прогиба, Боровском и Аракарагайском лесхозах Кустанайской области (5 пробных площадей). Условия произрастания — от влажных до сухих (Ia—III классы бонитета), возраст — от 10 до 53 лет. Лесорастительная и таксационная характеристика объектов исследований, а также подробная методика полевых работ изложены ранее (Усольцев, 1985а, 1988а). Всего по ступеням толщины взято 320 модельных деревьев на 31 пробной площади.

Остальные экспериментальные данные о надземной фитомассе одновозрастных осинников (44 пробных площади) позаимствованы из литературы, лесотипологическая и таксационная характеристика пробных площадей дана в приложении 6. В некоторых источниках отсутствовали данные запаса стволовой древесины, и они рассчитаны с использованием показателя базисной (условной) плотности древесины — $0,389 \text{ т/м}^3$ (Полубоя-

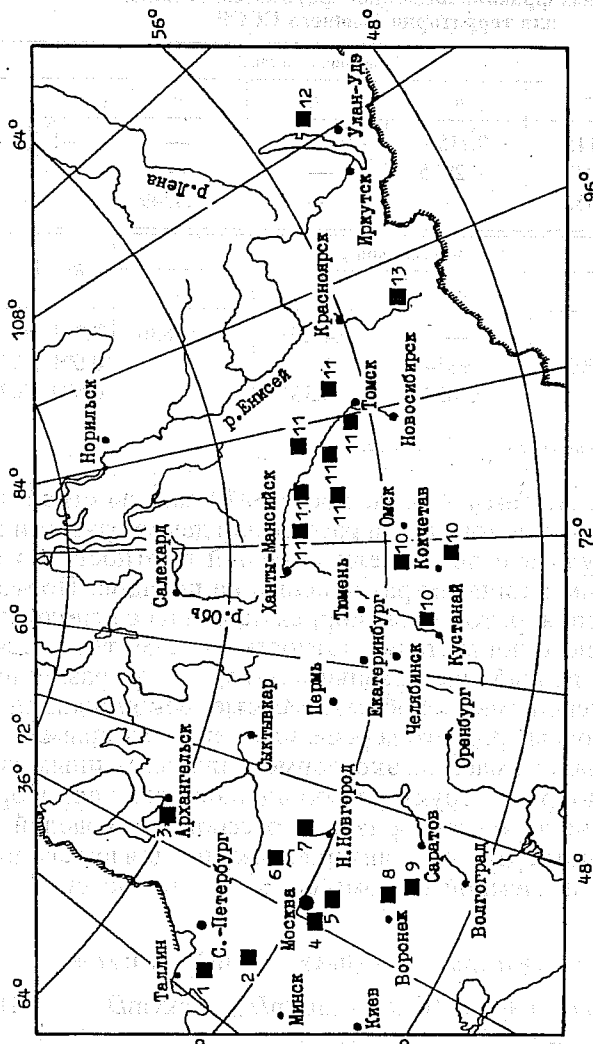


Рис. 25 География экспериментальных данных о фитомассе основных древостоев на территории бывшего СССР по литературным источникам.

1 — Тамм, Росс, 1979, 1980; 2 — Ремезов и др., 1959; 3 — Вакуров, Полякова, 1982; 4 — Дылис, Носова, 1977; 5 — Визуадава и др., 1969, 1971; 6 — Рождественский, 1979, 1982; 7 — Полицаров, 1962; 8 — Ремезов, Быкова, 1953; 9 — Смирнов, Семенова, 1974; 10 — данные автора (см. приложение 5); 11 — Габеев, 1976; Демиценко, 1978; 12 — Колосов, 1975; 13 — Поздняков и др., 1969

Таблица 26

Характеристика обобщенных уравнений (183) переводных коэффициентов различных фракций надземной фитомассы осинников для территории бывшего СССР

$P_i/V, \text{ т/м}^3$	Значения констант*				
	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4
Для стволов	-0,3115	0,2155	-0,06015	—	-1,6284
Для ветвей	-1,7047	-0,2975	—	—	—
Для листвы	-1,4352	—	—	-0,8549	—

$P_i/V, \text{ т/м}^3$	Значения констант				R^2	SE
	a_5	a_6	a_7	a_8		
Для стволов	—	—	0,4025	0,05836	0,281	0,142
Для ветвей	-0,8903	0,9854	—	—	0,601	0,343
Для листвы	—	0,2029	-0,2553	—	0,884	0,261

* Все константы значимы на уровне $t_{0,5}$ и выше.

ринов, 1976). Ю. А. Тамм и В. А. Росс (1980) запасы стволовой древесины и массу стволов на 1 га рассчитали двумя разными методами, и в результате показатели базисной плотности по отдельным пробным площадям различались на порядок. Поэтому названные значения фитомассы скорректированы с использованием одного общего показателя плотности — 0,389 т/м³. Расчет фитомассы на 1 га выполнен разными авторами по различным методикам со ссылками на общеизвестные рекомендации — обычно или методом среднего дерева, или регрессионным.

На основе анализа массива экспериментальных данных из 75 наблюдений подобрана структура обобщенных для территории бывшего СССР четырехфакторных регрессионных моделей общего вида (158) четвертого уровня приближения для переводных коэффициентов надземной фитомассы в абсолютно сухом состоянии (т/м³):

$$\ln(P_i/V) = a_0 + a_1(\ln A)^2 + a_2(\ln A)^3 + a_3 \ln D + a_4 \ln H + a_5 \ln D \ln H + a_6 \ln A \ln D + a_7 \ln A \ln H + a_8 \ln N \ln D. \quad (183)$$

Характеристика (183) дана в табл. 26. Соотношение между фактическими и расчетными значениями переводного коэффициента массы ветвей (рис. 26, а) и листвы (см рис. 26, б) свидетельствует о

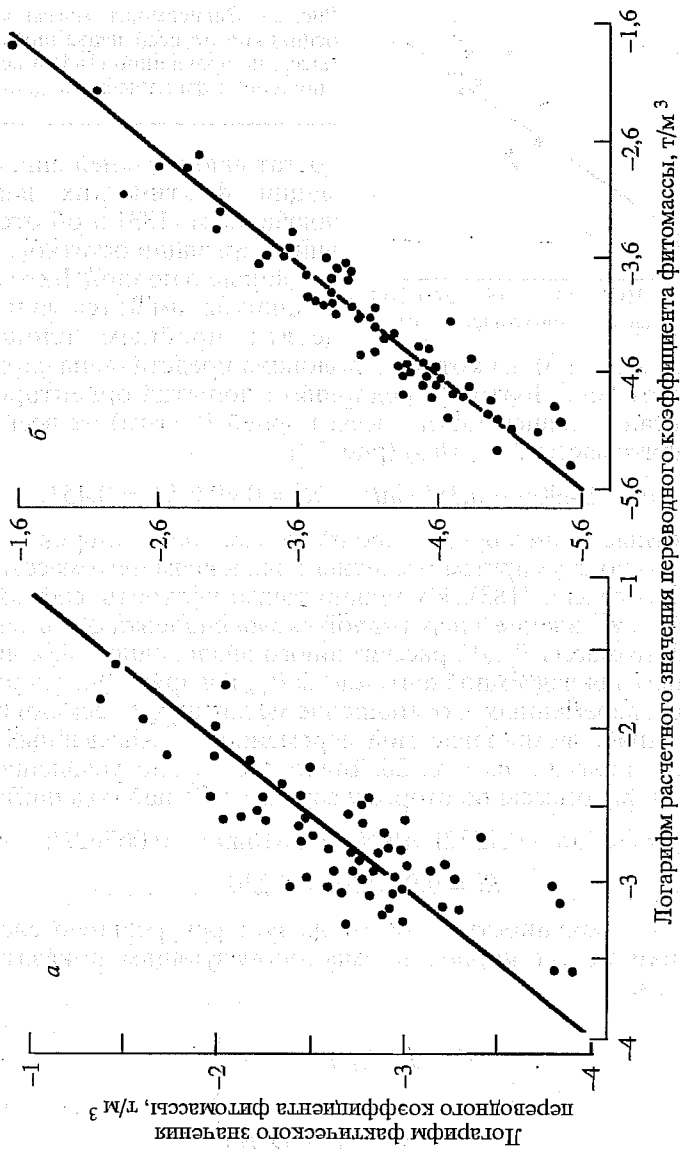


Рис. 26. Соотношение расчетных и фактических значений переводного коэффициента фитомассы ветвей (а) и листьев (б) осины по модели (183)

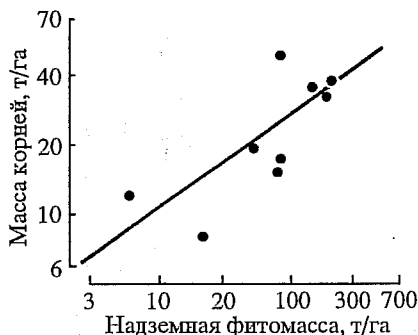


Рис. 27. Зависимость массы корней осинников от всей надземной фитомассы по уравнению (184) и ее соотношение с фактическими данными

достаточно хорошей аппроксимации фактических данных уравнением (183) и об отсутствии корреляции остатков.

Данные о полной фитомассе осинников имеются лишь по девяти пробным площадям

(см. приложение 6), из которых половина представлена сложными древостоями. Поэтому предпринята попытка ориентировочного описания зависимости массы корней P_r (т/га) от всей надземной фитомассы P_{abo} (т/га) (рис. 27):

$$\ln P_r = 1,4906 + 0,3859 \ln P_{abo}; R^2 = 0,493; SE = 0,451. \quad (184)$$

Расчетные значения P_r можно получить, протабулировав уравнение (184) по суммарным расчетным значениям фитомассы трех фракций, согласно (183). Их можно также получить, состыковав (184) либо с уравнением переводного коэффициента для всей надземной фитомассы P_{abo}/V , рассчитанного аналогично (183), либо с уравнением для надземной фитомассы P_{abo} как функции тех же независимых переменных. Соотношение между фактическими и расчетными значениями зависимой переменной для названных двух вариантов показано на рис. 28. Было рассчитано уравнение для надземной фитомассы по второму варианту (75 наблюдений):

$$\ln P_{abo} = 0,6336 + 0,1532 \ln A \ln N + 0,9816 \ln D + 0,06762 H; \quad (185)$$

$$R^2 = 0,921; SE = 0,230,$$

которое в совокупности с (184) образует рекурсивную систему для оценки массы корней по массообразующим показателям древостоев:

$$\left. \begin{array}{l} \text{I. } P_r = f(P_{abo}) \\ \uparrow \\ \text{II. } P_{abo} = f(A, N, D, H) \end{array} \right\} \quad (186)$$

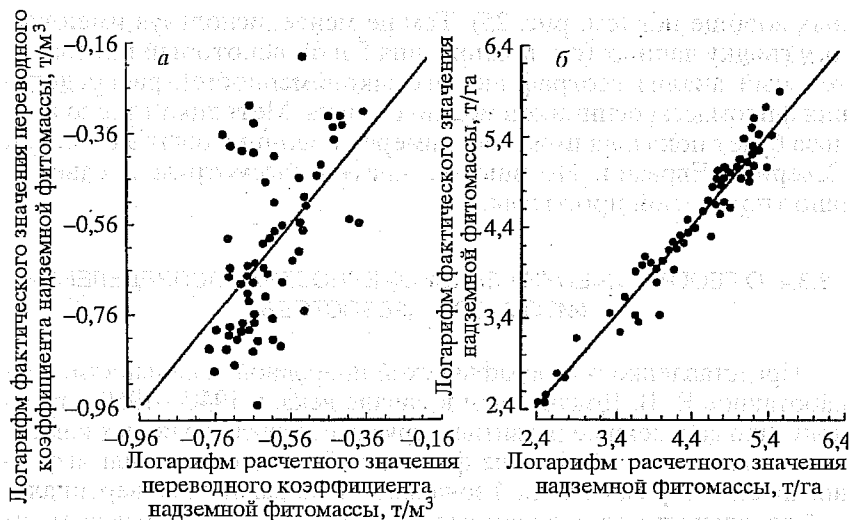


Рис. 28. Соотношение фактических и расчетных значений: а — переводного коэффициента надземной фитомассы P_{abo}/V по уравнению (183), б — надземной фитомассы P_{abo} по уравнению (185) для осиновых древостоев

Ранее составлены эскизы таблиц биопродуктивности путем совмещения моделей переводных коэффициентов фитомассы осинников Северного Казахстана с местными (Усольцев, 1988а) и всеобщими ТХР В. С. Чернявского (Нормативы..., 1993; табл. 3.7.2). Для нормальных осиновых древостоев Центрального горного района Урала составлены ТХР по типам леса (Лесотаксационный справочник..., 1991; табл. 5.48), но нет таблиц биопродуктивности. Поэтому предложен предварительный вариант таких таблиц, полученный путем стыковки с названными ТХР уравнений (183) и (186) (см. приложение 7).

Регрессионные модели (183) и (186) являются обобщенными для всей территории бывшего СССР, поскольку экспериментальные данные фитомассы распределены на ней крайне неравномерно: наибольшая их часть (41 %) приходится на Северный Казахстан, далее следуют Приобье (17 %) (Габеев, 1976; Демиденко, 1978), Подмосковье (9 %) (Дылис, Носова, 1977), Прибалтика (8 %) (Тамм, Росс, 1979, 1980) и Поволжье (6 %) (Рождественский, 1979, 1982). Остальная территория представлена единичными пробными площадями, а для уральского региона дан-

ных вообще нет (см. рис. 25). Тем не менее, используя имеющуюся сводку данных (см. приложения 5 и 6), некоторый предварительный анализ географических закономерностей распределения фитомассы осинников можно сделать. Методика такого анализа будет показана ниже на примере елово-пихтовых экосистем Северной Евразии. Но вначале кратко рассмотрим предысторию упомянутой проблемы.

3.3.4. О ГЕОГРАФИЧЕСКИХ ЗАКОНОМЕРНОСТЯХ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ФИТОМАССЫ ДРЕВОСТОЕВ

Представление о географической природной зональности, разработанное В. В. Докучаевым в начале века, в 1940—1960-е годы получило дальнейшее развитие в трудах российских ученых как основополагающее обобщение физической географии. Были изучены явления горизонтальной зональности на равнинах и вертикальной зональности по склонам гор, показано, что при определенном сочетании удаления от морского побережья и рельефа местности широтная зональность растительного покрова уступает место меридиональной (Герасимов, 1945; Григорьев, Будыко, 1956).

Е. М. Лавренко с соавторами (1955) предприняли первую попытку построения профиля продуктивности растительного покрова по природным зонам и подзонам европейской части России (рис. 29). Для доминирующих лесных экосистем северной, средней и южной тайги (ельники) и широколиственных лесов (дубравы) они приводят значения надземной фитомассы соответственно 90, 130, 220 и 260 т/га и ее годичного прироста — 1,5; 3,0; 5,0 и 5,6 т/га. Согласно картосхемам продуктивности основных типов растительности (Базилевич, Родин, 1967), общая (надземная и подземная) фитомасса лесных экосистем в названных подзонах составляет соответственно 50—150, 150—300, 300—400 и 400—500 т/га, а ее годичный прирост — 4—6, 6—8; 8—10 и 10—15 т/га.

Я. К. Палуметсом (Palumets, 1991) собрана коллекция экспериментальных данных о фитомассе еловых (*Picea excelsa* Link.) экосистем на территории от Западной Европы до Урала по 99 пробным площадям в диапазоне возрастов от 10 до 250 лет. Вся территория разделена на три климатические зоны по ФАР активного вегетационного периода, условно обозначенные как се-

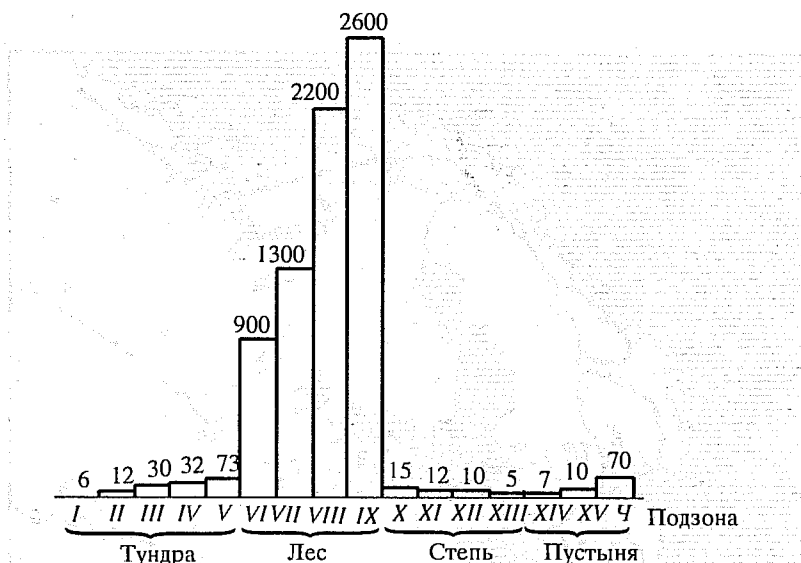


Рис. 29. Валовой запас (ц/га) надземной растительной массы плакорных сообществ европейской (подзоны I—XIII) и среднеазиатской (остальные подзоны) частей СССР (Лавренко и др., 1955)

вер, средняя полоса и запад (пределы 10,0; 22,5 и 30 ккал/см²) (рис. 30). По каждой из зон проанализирована возрастная динамика пропорций надземной фитомассы и установлена ее зональная специфичность (рис. 31).

Однако А. А. Григорьев и М. И. Будыко (1956) полагают, что расположение географических зон нельзя рассматривать только в связи с сеткой координат, и в пределах одного широтного пояса (и соответственной градации радиационного баланса) продуктивность растительного покрова определяется условиями увлажнения, для идентификации которых они предложили показатель радиационного индекса сухости R/Lr , где R — годовой радиационный баланс, L — скрытая теплота испарения, r — годовые осадки. В пределах широтного пояса максимальная продуктивность растительного покрова имеет место при значении названного индекса 0,7—0,8. При возрастании радиационного баланса по широтному градиенту от 20 до 70 ккал/см² максимальная продуктивность растительного покрова увеличивается с 5 до 35 т/га, а при увеличении индекса сухости от 0,8 до 4—5 продуктивность

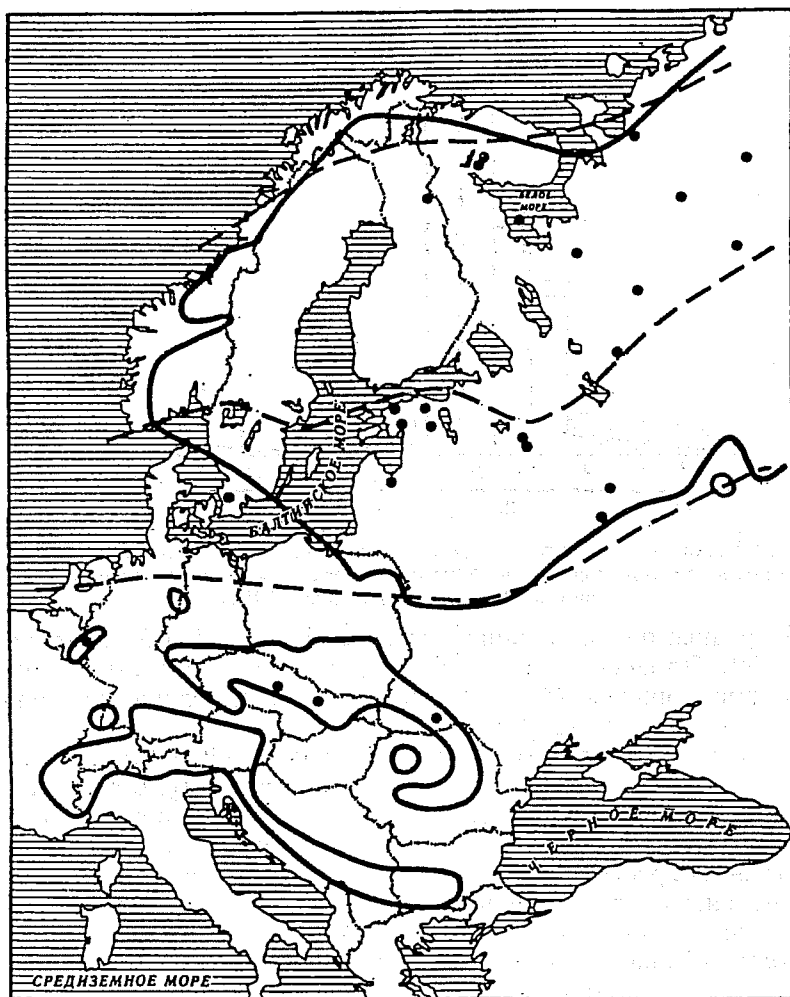


Рис. 30. География экспериментальных данных о фитомассе еловых экосистем Европы, собранных по литературным источникам Я. К. Палуметсом (Palumets, 1991). Климатические зоны по ФАР активного вегетационного периода (пределы 10,0; 22,5 и 30,0 ккал/см²) обозначены пунктиром

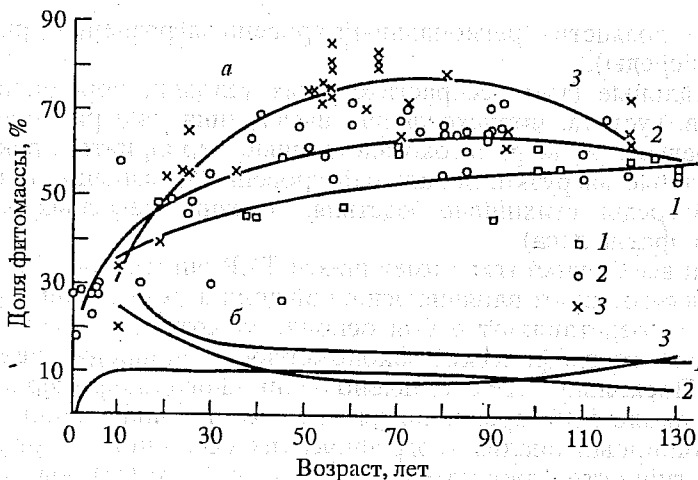


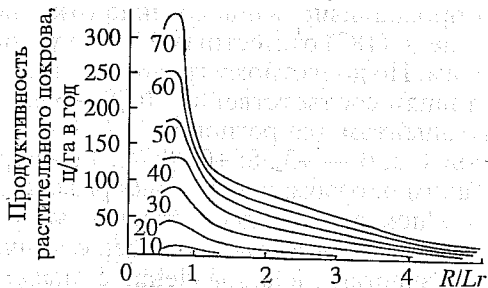
Рис. 31. Возрастная динамика относительных показателей массы стволов (а) и ветвей (б) по трем климатическим зонам (1 — север, 2 — средняя полоса, 3 — запад (Палуметс, 1988))

снижается по всем широтным поясам до минимальной — 2—3 т/га в год (рис. 32) (Будыко, Ефимова, 1968).

В лесной таксации исследования географических закономерностей продуктивности лесов имели своеобразную (характерную только для нее) специфику. А. П. Тябера (1988) все факторы продуктивности лесов делит на три группы, характеризующиеся разными уравнениями обобщения:

- глобальные (географическое положение местности, фоновый уровень загрязнения природной среды, изменчивость климатических условий);
- региональные (высота над уровнем моря, популяционные особенности леса, уровень ведения лес-

Рис. 32. Зависимость продуктивности растительного покрова от радиационного баланса (показан цифрами, ккал/см²) и радиационного индекса сухости R/Lr (Будыко, Ефимова, 1968) (пояснения в тексте)



ного хозяйства, региональный уровень загрязнения природной среды);

- локальные (тип лесорастительных условий, породный состав, густота, происхождение насаждения, тип размещения деревьев, рельеф, лесохозяйственные мероприятия, рекреационные нагрузки, локальный уровень загрязнения природной среды, стихийные бедствия, болезни древесных растений, фауна леса).

При всех недостатках имеющихся ТХР они тем не менее на сегодня суммируют влияния основной доли перечисленных факторов и представляют собой основу, на которой могут быть выявлены географические закономерности биопродуктивности лесов. Поскольку ТХР составлено очень много (например по сосне — около 500), предприняты попытки их унификации. Первый обширный анализ географических особенностей роста и продуктивности древостоев (по запасу V , м³/га) выполнен В. В. Загребевым (1978). Он установил закономерности изменения типов роста сосновых древостоев по географическим регионам и составил схему таксационного районирования сосновых лесов европейской части бывшего СССР (рис. 33).

А. П. Тябера (1988) использовал собранную В. В. Загребевым коллекцию ТХР сосновых древостоев для выявления географических закономерностей производительности древостоев в плане изменения их структуры. Весь ареал сосны обыкновенной в пределах бывшего СССР им разделен на условные географические районы (рис. 34). Затем по данным ТХР рассчитана единая модель суммы площадей сечений B :

$$B = f(A, H, N) \tag{187}$$

и проанализированы средние отклонения расчетных данных по модели (187) от местных ТХР по условным географическим районам. По долготному градиенту, т. е. по районам 2, 4, 7, 9, они составили соответственно $-0,78$; $+3,58$; $+5,09$; $+6,27$, по широтным градиентам для регионов 1, 2, 3 — $+16,1$; $-0,78$; $-5,74$; для районов 4, 5, 6 — $+3,58$; $+0,46$; $-2,30$; для районов 7, 8 — $+5,09$; $-0,37$. Таким образом, при условии равенства основных массообразующих показателей древостоев — возраста A , средней высоты H и густоты N — сумма площадей сечений B и, следовательно, запас V возрастают в направлении с запада на восток и с севера на юг.



Рис. 33. Схема таксационного районирования сосновых лесов европейской части СССР.

Границы: 1 — лесотаксационных районов, 2 — подрайонов. Районы сосновых лесов: I — быстрого роста (а и б — соответственно северный и южный подрайоны), II — хорошего, III — умеренного, IV — замедленного роста (Загресв, 1978)

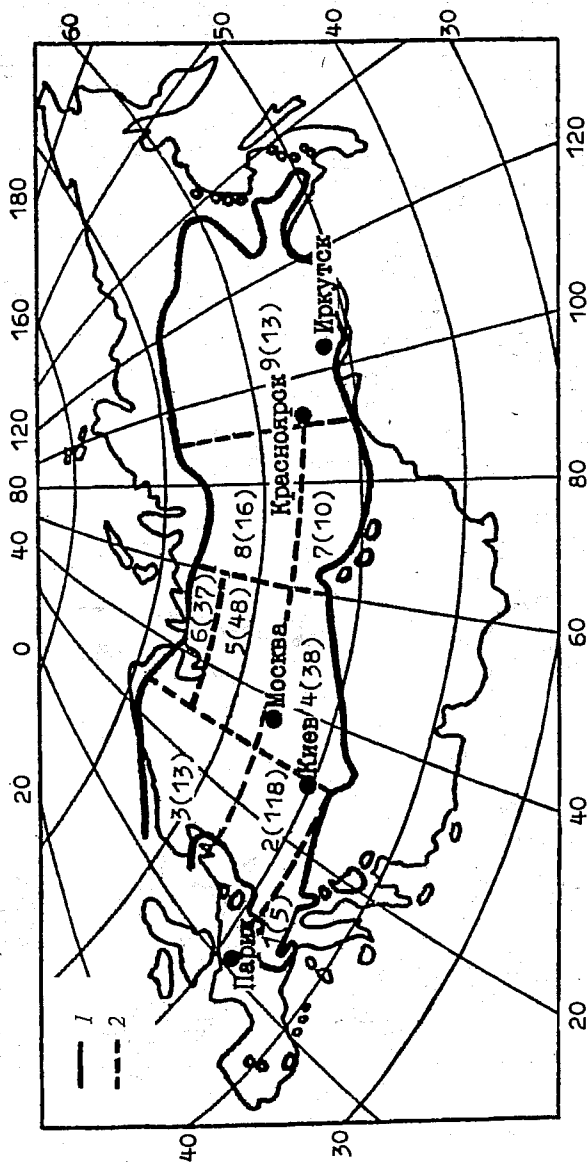


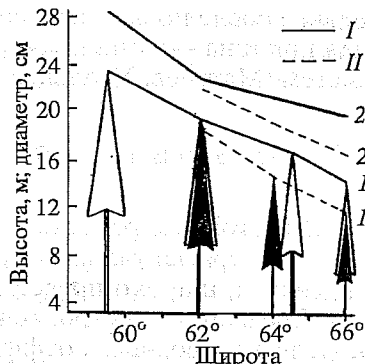
Рис. 34. Схема разделения ареала сосны обыкновенной на условные географические районы.

Границы: 1 — ареала сосны, 2 — условных географических районов. Цифрой обозначен номер района, цифрой в скобках — число анализируемых ТХР условного района (Тягера, 1988)

Рис. 35. Зональные изменения средней высоты (1) и среднего диаметра (2) древостоев ельника черничного в европейской части России на долготе 45° (I) и 55° (II) (Львов, Ипатов, 1973)

На каждую 1000 км эти изменения по сумме площадей сечений в первом случае составляют 10—12 %, а во втором — 1,3—1,5 % (Тябера, 1988).

Кроме выявления географических закономерностей изменения массообразующих показателей и запасов V , дифференцированных по темпам роста (Загреев, 1978) и морфоструктуре древостоев (Тябера, 1988), основу которого составляют данные многочисленных ТХР, такие закономерности можно также установить непосредственно по материалам государственного учета лесного фонда (ГУЛФ). П. Н. Львов и Л. Ф. Ипатов (1973) использовали для этого массовые выборки повыделных таксационных показателей древостоев ельника черничного европейской части России в количестве 429 выделов на долготе 45° (Архангельская и Вологодская области) от притундровой (66° с. ш.) до подзоны южной тайги (59° с. ш.) и в количестве 409 выделов на долготе 55° (Республика Коми) от притундровой (66° с. ш.) до подзоны средней тайги (62° с. ш.) (рис. 35). Средняя площадь выдела составляла по подзонам от 24 до 85 га. Установлено, что при продвижении к северу на 1° (около 110 км) средняя высота снижается на 1,5 м, средний диаметр — на 1,7 см и средний запас — на 26 м³/га. Снижение названных показателей в направлении с запада на восток (см. рис. 35), видимо, имеет локальный характер, иначе при сохранении долготного тренда вся территория Сибири к востоку от Оби была бы безлесной. П. Н. Львов и Л. Ф. Ипатов (1973) приходят к выводу, что каждый тип леса имеет ряд географических вариантов, отличающихся между собой не только производительностью, но и морфоструктурой. Последнее подтверждается, например, тем, что в пределах одного типа леса в лиственничниках Сибири при продвижении от южного мерзлотного пояса к северному закономерно повышается отпад де-



ревьев после пожаров низкой и средней интенсивности. Основная причина — зональное изменение архитектуры корневых систем (Матвеев, Усольцев, 1991).

3.3.5. ЕЛЬНИКИ И ПИХТАРНИКИ СЕВЕРНОЙ ЕВРАЗИИ

В настоящем разделе поставлена задача: а) собрать коллекцию экспериментальных данных о фитомассе елово-пихтовых экосистем, широко представленных по всей территории Северной Евразии; б) построить по ним оценочные многофакторные модели переводных коэффициентов фитомассы и в) сравнить продуктивность фитомассы в различных регионах одной из пород, а также установить различие продуктивности ели и пихты в пределах одного региона при прочих равных условиях, т. е. путем стыковки моделей с региональными ТХР.

При формировании сводки данных о фитомассе елово-пихтовых экосистем за основу принята концепция Н. И. Базилевич и Л. Е. Родина (1967), согласно которой биологическая продуктивность оценивается не по широтным поясам или уровням радиационного баланса, а по природным подзонам, и в пределах каждой из них зависит не только от условий увлажнения, а от всего комплекса лесорастительных условий, определяющих профиль продуктивности. Этот комплекс с позиций лесной таксации опосредуется морфологией леса, или набором его основных массообразующих показателей — густотой (Bray, Dudkiewicz, 1963), добротностью местопроизрастания (Koeper, Richardson, 1980), а также его возрастной структурой (Палуметс, 1988; Исаев и др., 1993).

Сводка включала в себя экспериментальные данные фитомассы по фракциям, запас стволовой древесины и основные массообразующие показатели (возраст, средний диаметр и высота, число стволов на 1 га), полученные на 303 пробных площадях в ельниках (*Picea Dietr.*) и на 100 — в пихтарниках (*Abies Mill.*) в пределах их ареалов (рис. 36), взятые из 105 литературных источников (см. приложение 8).

Экспериментальные данные подразделены на шесть групп по подзонам и породам (рис. 37 на вкладке) без учета вертикальной поясности местообитаний.

IP — ель (*P. obovata* Ldb., *P. excelsa* Link.) подзоны северной тайги (32 пробных площади с оценкой надземной массы, в том числе 26 — с оценкой надземной массы и корней);

IP — ель (*P. obovata* Ldb., *P. excelsa* Link.) подзон средней и южной тайги (соответственно 72 и 35 пробных площадей);

IIA — пихта (*A. sibirica* Ldb.) подзон средней и южной тайги, Урало-Сибирский регион (57 и 23 пробных площади);

III — ель (*P. excelsa* Link., *P. jezoensis* Cam.) подзоны широколиственно-темнохвойных лесов (86 и 56 пробных площадей);

IVP — ель (*P. excelsa* Link., *P. sitchensis* Cam.) подзоны широколиственных лесов (113 и 60 пробных площадей);

IVA — пихта (*A. alba* Mill., *A. Veitchii* Lindl., *A. sachalinensis* Mast., *A. firma* Sieb. et Zucc.) подзоны широколиственных лесов (43 и 13 пробных площадей).

Ввиду малочисленности данных (7 пробных площадей) ель аянская включена в группу III вместе с елью сибирской, а ель ситхинская (2 пробные площади) — в группу IVP вместе с елью европейской. По этой же причине в группе IVA объединены данные по пихтам белой, Вича, сахалинской и сильной. В имеющихся сводках (Уткин, 1970; Базилевич, 1993) обычно включены данные о фитомассе тундровых лесов в качестве характеристики нижнего предела профиля продуктивности. В нашу сводку такие данные не вошли за неимением полного набора массоопределяющих показателей обычно вследствие малых (< 1,3 м) средних высот.

В целом в сводку не попали около половины имеющихся литературных данных о фитомассе елово-пихтовых экосистем как не удовлетворяющие целевому методическому подходу исследования (из-за отсутствия одного или нескольких массоопределяющих показателей, неполного фракционного разделения или отсутствия информации об одной из фракций надземной фитомассы). Однако включены объекты, недостающие массоопределяющие показатели которых можно рассчитать по другим приводимым данным. При отсутствии показателя запаса стволов V ($\text{м}^3/\text{га}$) он определялся расчетным путем по базисной плотности, взятой на соседних объектах. Неоценимую помощь при комплектовании коллекции данных оказали имеющиеся сводки (Уткин, 1970; DeAngelis et al., 1981; Cannell, 1982; Palumets, 1991; Базилевич, 1993; Алексеев, Бердси, 1994).

К сожалению, точность определения фракций фитомассы была разной, поскольку применялись разные методики: по надземной части — методы как среднего дерева, так и ступеней тол-

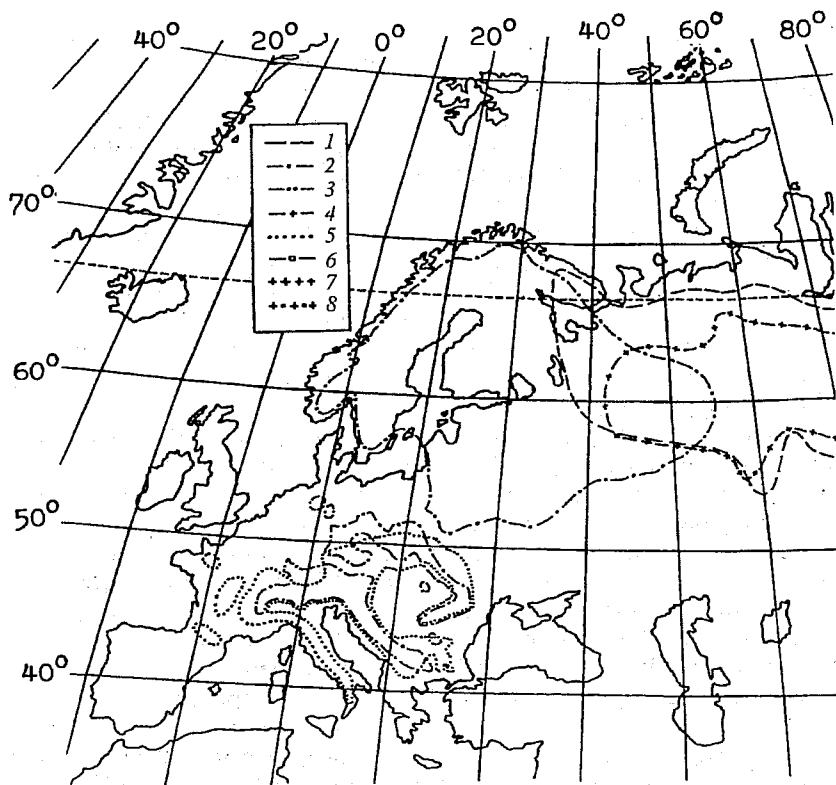
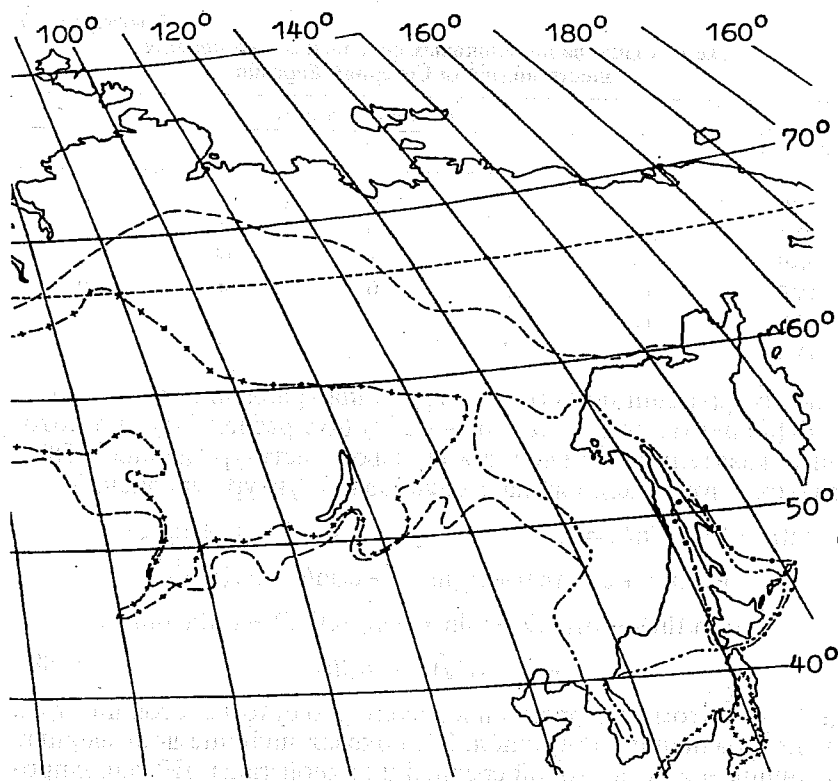


Рис. 36. Ареалы ели и пихты

1 — *P. obovata*, 2 — *P. excelsa*, 3 — *P. jezoensis*, 4 — *A. sibirica*, 5 — *A. alba*,

по подземной — методы площади питания среднего дерева, малых или больших почвенных монолитов; корни как отмывались, так и отбирались вручную, с отсеиванием или без него; мелкая фракция корней иногда не учитывалась. Тем не менее собрана обширная коллекция экспериментальных данных о фитомассе, позволившая применить математико-статистические методы анализа.

Для выявления различий моделей переводных коэффициентов по подзонам применены блочные фиктивные переменные (табл. 27), согласно приведенной выше группировке пробных площадей, которые затем включены в структуру моделей пере-



в Северной Евразии.

6 — *A. sachalinensis*, 7 — *A. Veitchii*, 8 — *A. firma* (Деревья и кустарники..., 1949)

водных коэффициентов общего вида (158). Эта структура сохранена только для массы ветвей и хвои, наименее коррелирующей с запасом стволовой древесины V . С учетом аллометрического соотношения между двумя фракциями фитомассы, определяемого тем, что масса хвои пропорциональна массе скелета кроны, который эту хвою поддерживает в пространстве полога (Attiwill, 1962), и для согласования оценок фитомассы полога по составляющим фракциям (см. раздел 2.5.4) в структуру модели (158) при оценке переводного коэффициента массы хвои P_h/V (наряду с четырьмя основными массоопределяющими показателями) введен переводной коэффициент массы ветвей P_b/V . Для ос-

Таблица 27

Схема кодирования блоковых фиктивных переменных по шести подзонам Северной Евразии

Подзона и порода	Фиктивные переменные				
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5
IP	0	0	0	1	0
IIIP	0	0	0	0	0
IIIIP	1	0	0	0	0
IVIP	0	1	0	0	0
IIA	0	0	0	0	1
IIVA	0	0	1	0	0

тальных фракций принята модификация уравнений переводного коэффициента, подобная (162)—(164) (см. раздел 3.1), и в которой показатель V переносится из левой части уравнения (158) в правую. В итоге подобрана следующая структура уравнений:

$$\begin{aligned} \ln(P_i/V) \text{ или } \ln P_i = & a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2 + a_3 X_3 + a_4 X_4 + a_5 X_5 + \\ & + a_6 \ln A + a_7 (\ln A)^2 + a_8 (\ln A)^3 + a_9 \ln N + a_{10} (\ln N)^2 + \\ & + a_{11} \ln A \ln N + a_{12} \ln D + a_{13} \ln H + a_{14} \ln A \ln D + a_{15} \ln H \ln D + \\ & + a_{16} \ln(P_i/V) + a_{17} \ln V, \end{aligned} \quad (188)$$

где P_i — фитомасса фракций в абсолютно сухом состоянии, т/га. Расчет уравнений (188) (табл. 28) показал наличие достоверных различий между подзоной средней и южной тайги IIIP, закодированной одними нулями, и другими подзонами по некоторым фракциям фитомассы. Здесь следует еще раз обратить внимание на то, что названные зональные различия имеют место при условии равенства как массоопределяющих показателей, так и запасов стволов, тогда как фактически эти показатели изменяются по общему широтному и локальным долготным градиентам (Львов, Ипатов, 1973). Однако даже при условии такого выравнивания имеет место меньшая охвоенность крон в регионах с наиболее жестким климатом: у ели — в подзоне северной тайги (IP) ($t = 3,6 > t_{0,5}$), у пихты — в подзоне средней и южной тайги (IIA) ($t = 2,4$). Максимальная относительная масса крон и корней при прочих равных условиях выявлена у ели в подзоне широколиственно-темнохвойных лесов ($t = 4,4-4,8 > t_{0,5}$), возможно, вследствие наибольшей вертикальной сомкнутости древостоев.

Характеристика уравнений (188) для переводных коэффициентов фитомассы слово-пахтовых древостоев шести подзон Северной Евразии

Зависимая переменная	Константы (числитель) и их значимость <i>t</i> (знаменатель)					
	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
Для стволов $\ln P_{\text{ст}}$, т/га	-0,9649	$\frac{-0,0719}{3,2}$	$\frac{-0,1441}{6,3}$	$\frac{-0,1065}{2,6}$	$\frac{-0,0793}{2,5}$	$\frac{-0,2924}{12,6}$
Для ветвей $\ln(P_{\text{в}}/V)$, т/м ³	-5,7193	$\frac{0,2238}{4,8}$	—	$\frac{-0,2172}{2,2}$	—	$\frac{-0,2066}{3,8}$
Для хвои $\ln(P_{\text{х}}/V)$, т/м ³	0,6541	—	—	—	$\frac{-0,2826}{3,6}$	$\frac{-0,1159}{2,4}$
Для корней $\ln P_{\text{к}}$, т/га	-1,4004	$\frac{0,2902}{4,4}$	—	—	—	$\frac{-0,5712}{6,4}$

Зависимая переменная	Константы (числитель) и их значимость <i>t</i> (знаменатель)						
	a_6	a_7	a_8	a_9	a_{10}	a_{11}	a_{12}
Для стволов $\ln P_{\text{ст}}$, т/га	$\frac{0,0783}{4,9}$	—	—	—	—	—	—
Для ветвей $\ln(P_{\text{в}}/V)$, т/м ³	$\frac{4,7310}{2,9}$	$\frac{-1,3217}{3,3}$	$\frac{0,0963}{3,1}$	—	—	$\frac{-0,0250}{2,5}$	$\frac{-0,9265}{2,9}$
Для хвои $\ln(P_{\text{х}}/V)$, т/м ³	—	$\frac{-0,1693}{4,1}$	$\frac{0,0229}{3,7}$	—	$\frac{-0,0278}{2,2}$	—	—
Для корней $\ln P_{\text{к}}$, т/га	—	—	—	$\frac{0,2072}{3,5}$	—	—	—

Зависимая переменная	Константы (числитель) и их значимость <i>t</i> (знаменатель)					R^2	SE
	a_{13}	a_{14}	a_{15}	a_{16}	a_{17}		
Для стволов $\ln P_{\text{ст}}$, т/га	—	—	—	—	$\frac{0,9671}{93,2}$	0,983	0,127
Для ветвей $\ln(P_{\text{в}}/V)$, т/м ³	$\frac{-0,6980}{3,4}$	$\frac{0,4490}{4,8}$	$\frac{-0,1920}{2,7}$	—	—	0,563	0,329
Для хвои $\ln(P_{\text{х}}/V)$, т/м ³	—	—	$\frac{-0,0770}{7,5}$	$\frac{0,6694}{15,7}$	—	0,781	0,312
Для корней $\ln P_{\text{к}}$, т/га	—	$\frac{0,1145}{6,2}$	—	—	$\frac{0,6132}{15,3}$	0,827	0,383

По базисной плотности ствола P_r/V все шесть подзон достоверно различаются ($t =$ от 2,5 до 12,6). Наибольшие значения последней имеют место в подзоне ПР, а наименьшие — в ПА.

Соотношение фактических и расчетных значений переводного коэффициента массы ветвей и хвои показано соответственно на рис. 38, а и 38, б, а для массы стволов и корней — на рис. 38, в и 38, г. Эти модели (см. табл. 28) необходимы для исследования общих закономерностей изменения запасов фитомассы по зональному градиенту с учетом изменения по этому же градиенту основных массообразующих показателей древостоев. В частности, они будут использованы в главах 5 и 7 при моделировании предельных показателей фитомассы древостоев по подзонам.

Для составления региональных таблиц биопродуктивности одного зонального разбиения экспериментальных данных фитомассы и соответствующих им моделей недостаточно, поскольку модели переводных коэффициентов фитомассы стыкуются с ТХР, которые дифференцированы по подзонам и лесотаксационным подрайонам. Различия ТХР в пределах одной подзоны в какой-то степени отражают варьирование комплекса лесорастительных условий (индекс сухости, влажность местообитания, высотная поясность, преобладающий тип почв и т. д.). Поэтому путем разбиения массива экспериментальных данных фитомассы, полученных для той или иной подзоны, по крупным регионам (таксационным подрайонам) можно выявить региональные различия в запасах фитомассы, которые на этапе зонального разбиения выявить невозможно. В итоге стыковка полученных региональных моделей фитомассы с соответствующими региональными ТХР становится более корректной, чем обобщенных зональных моделей.

Поскольку масса корней определялась на меньшем числе пробных площадей в сравнении с надземной массой при большом разнообразии применяемых методик, то в пределах той или иной подзоны региональные различия в массе корней не удалось выявить и при стыковке с ТХР использованы зональные модели для P_r (см. табл. 28).

3.3.5.1. Таблицы биопродуктивности ельников подзоны северной тайги

Ельники подзоны северной тайги (IP) представлены сравнительно небольшим числом пробных площадей, однако почти все они (94 %) заложены в пределах европейской части России меж-

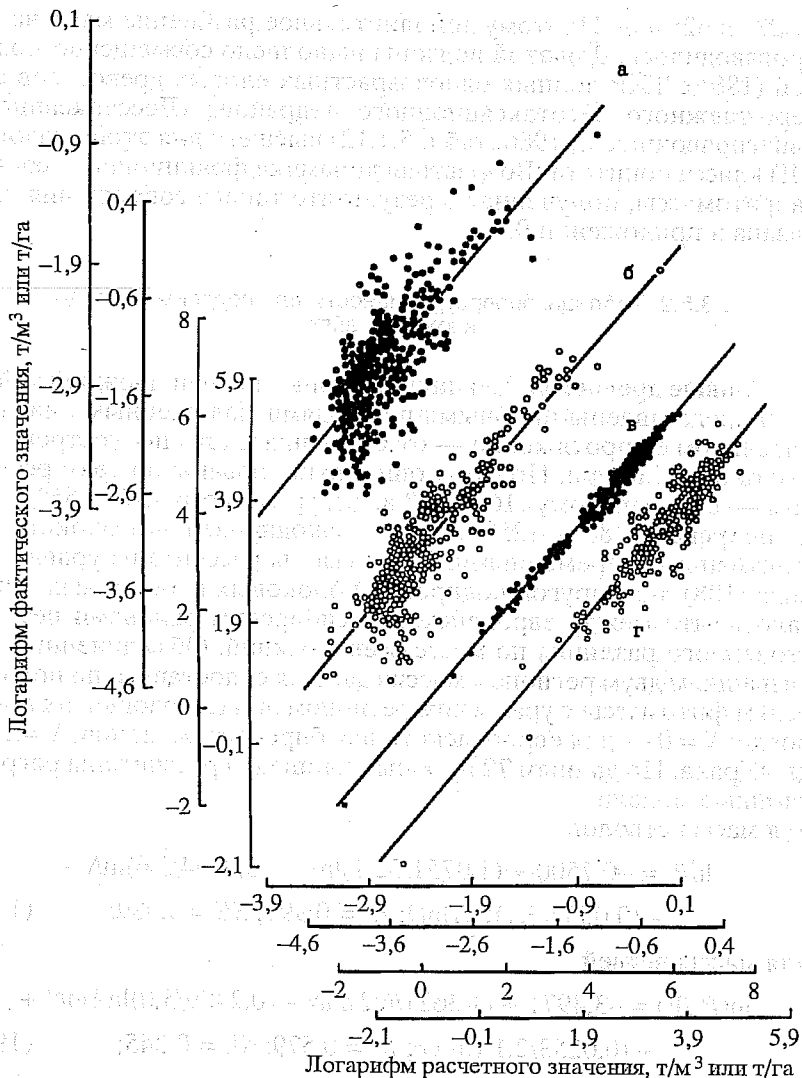


Рис. 38. Соотношение фактических и расчетных значений переводного коэффициента массы ветвей (а) и хвои (б), а также фактических и расчетных значений массы стволов (в) и корней (г) по уравнениям (188)

ду 28° и 62° в. д. Поэтому дополнительное разбиение массива не производилось. Для этой подзоны выполнено совмещение моделей (188) с ТХР полных одновозрастных еловых древостоев северо-таежного лесотаксационного подрайона (Лесотаксационный справочник..., 1986; табл. 5.1.12) высшего для этой подзоны (III) класса бонитета. Возрастная динамика фракционного состава фитомассы, полученная в результате такого совмещения, показана в приложении 9.

3.3.5.2. Таблицы биопродуктивности для подзоны средней и южной тайги

Еловые древостои. Ельники подзоны средней и южной тайги (ПР) представлены пробными площадями, заложенными на значительном ее протяжении — от Скандинавского полуострова до Восточной Сибири. Поэтому они сгруппированы по трем регионам — европейскому (16°—52° в. д.), уральскому (57°—66° в. д.) и сибирскому (88°—125° в. д.), — закодированным блоковыми фиктивными переменными. Для подзоны рассчитаны уравнения вида (188), но с другой кодировкой блоковых переменных. Оказалось, что между европейским и сибирским районами нет достоверного различия по массе всех фракций. Объединенный по названным двум регионам массив данных сопоставлен по показателям фитомассы с уральским регионом при следующей их кодировке: $X = 0$ — для европейского и сибирского регионов; $X = 1$ — для Урала. По данным 72 пробных площадей рассчитаны регрессионные модели для массы стволов

$$\ln P_s = -0,7500 + (1,0751/32,1)\ln V - (0,0694/2,6)\ln N - (0,0552/3,1)\ln H \ln D; R^2 = 0,991; SE = 0,089; \quad (189)$$

для массы ветвей

$$\ln(P_b/V) = -3,4971 + (1,3621/6,2)\ln N - (0,2489/5,0)\ln A \ln N + (0,0253/2,1)(\ln A)^2; R^2 = 0,579; SE = 0,345; \quad (190)$$

для массы хвои

$$\ln(P_f/V) = 0,0915 + (0,3266/5,8)X + (0,7657/10,9)(\ln P_b - \ln V) - (0,2794/4,0)\ln D - (0,0182/2,7)(\ln A)^2; R^2 = 0,894; SE = 0,218. \quad (191)$$

Здесь и далее в числителе — константа, в знаменателе — ее значимость по Стьюденту.

Таким образом, по массе стволов и ветвей между регионами подзоны средней и южной тайги различий нет (константа при X не достоверна на уровне $t_{0,5}$), а при одних и тех же значениях массообразующих показателей, запасов V и массы ветвей уральский регион существенно выделяется (относительно других) по массе хвои ($t = 5,8 > t_{0,5} = 2$).

Выполнено совмещение моделей (189)—(191) при $X = 0$, а также модели (188) для массы корней ели подзоны ПР (см. табл. 28) с ТХР полных одновозрастных еловых древостоев среднетаежного лесотаксационного подрайона на Северо-Востоке европейской части России (Лесотаксационный справочник..., 1986, табл. 5.1.11) высшего для этого подрайона (III) класса бонитета (ельник кисличный). Возрастная динамика фракционного состава фитомассы, полученная в результате такого совмещения, показана в приложении 10.

Для уральского региона подзоны ПР модели (189)—(191) при $X = 1$ для надземной массы и (188) при нулевом значении всех блоковых переменных — для массы корней совмещены с ТХР сомкнутых еловых древостоев II—IV классов бонитета бывшего Нижне-Тагильского округа (Милованович, 1928) (см. приложение 11). Чтобы сопоставить фитомассу ельников Урала с таковой для европейской и азиатской частей подзоны ПР, модели (189)—(191) протабулированы по тем же показателям ТХР Д. В. Миловановича, но при значении $X = 0$. Поскольку по массе ветвей и стволов различия между регионами подзоны ПР отсутствуют, то сопоставление выполнено при одних и тех же значениях показателей не только массообразующих, но и массы стволов и ветвей. При таком условии масса хвои в ельниках горного Урала на 39 % выше, чем в равнинных ельниках европейской и азиатской частей подзоны ПР.

Пихтовые древостои. Пихтовые насаждения в подзоне средней и южной тайги (ПА) представлены пробными площадями, заложенными в пределах ареала пихты сибирской, главным образом — в горных местообитаниях Западного и Восточного Саяна, Хамар-Дабана и Енисейского кряжа. Заложены также 6 пробных площадей в западной части горного Урала (Ханбеков, 1972; Усольцев, 1997; Усольцев и др., 1998). Продуктивность фитомассы в этих пихтарниках оказалась настолько ниже, чем в ельни-

ках той же подзоны, представленных в основном равнинными местообитаниями Восточной Европы, что регион был вычленен уже на первом этапе — этапе зонального анализа. Из 57 пробных площадей в пихтарниках 33 заложены И. Е. Кузиковым (1979) в зеленомошном типе леса.

Пихтарники Урало-Сибирского региона (ПА) на этапе регионального анализа сгруппированы по двум регионам — уральскому (55° — 60° в. д.) и сибирскому (83° — 110° в. д.) при их кодировке: $X = 0$ — для уральского и $X = 1$ — для сибирского региона. По данным 57 пробных площадей рассчитаны регрессионные модели для массы стволов:

$$\begin{aligned} \ln P_s = & 3,6654 - (1,5948/2,4)\ln A + (0,0298/2,8)(\ln A)^3 - \\ & - (1,5558/2,5)\ln N + (0,3651/2,7)\ln A \ln N + \\ & + (0,0914/2,1)(\ln N)^2 + (0,9413/29,3)\ln V; \\ R^2 = & 0,961; SE = 0,115; \end{aligned} \quad (192)$$

для массы ветвей

$$\begin{aligned} \ln(P_w/V) = & 0,6761 - (0,5858/6,0)X - (0,2698/3,4)\ln N - \\ & - (1,9530/7,9)\ln D + (0,2003/4,9)\ln A \ln D; \\ R^2 = & 0,745; SE = 0,206; \end{aligned} \quad (193)$$

для массы хвой

$$\begin{aligned} \ln(P_h/V) = & 0,6242 - (0,9833/3,3)\ln N - (0,5687/3,6)\ln H + \\ & + (0,1982/3,1)\ln A \ln N + (0,8022/8,1)\ln(P_w/V); \\ R^2 = & 0,782; SE = 0,208. \end{aligned} \quad (194)$$

Анализ моделей (192)—(194) показывает, что по массе стволов пихты названные два региона (при условии одинаковых запасов V и массообразующих показателей) не различаются, а по массе ветвей и хвой есть достоверные различия ($t = 6,0$). Величина этих различий показана на примере ТХР нормальных пихтовых насаждений Уфимского плато (Башкирия), единственных во всем уральском регионе. Путем стыковки моделей (192)—(194)

для надземной фитомассы и моделей (188) — для корней с названными ТХР получена возрастная динамика показателей фитомассы пихтарников в сравнении по двум регионам при условии равенства их запасов V и массообразующих показателей (см. приложение 12). Из полученной таблицы видно, что масса хвои в пихтарниках Урала при прочих равных условиях на 60 %, а масса ветвей — на 80% выше, чем в Сибири.

Таким образом, при одних и тех же значениях массообразующих показателей и запасов V уральский регион существенно выделяется относительно сибирского не только по массе хвои ели, но и по массе хвои пихты.

Совмещение моделей (192)—(194) и (188) для пихтарников подзоны ПА в сибирском регионе выполнено с ТХР пихтовых древостоев III класса бонитета Восточно-Саянской провинции Южно-Сибирской горной лесохозяйственной области (Ход роста..., 1975, табл. 100) (см. приложение 13).

Ель и пихта — биологически близкие виды, в таежной зоне произрастают обычно в смеси и на начальном этапе исследований априорно предполагалось, что в пределах уральского региона они не различаются по продуктивности фитомассы, поэтому может быть составлена одна общая таблица биопродуктивности. Для проверки этого предположения модели (192)—(194) для пихты Урала при $X = 0$ для надземной фитомассы и модели (188) при $X_1 = 0, X_2 = 0, X_3 = 0, X_4 = 0, X_5 = 1$ для массы корней протабулированы по показателям той же ТХР Д. В. Миловановича (1928), которая взята за основу при составлении таблиц биопродуктивности ельников Среднего Урала (см. приложение 11). Сопоставление полученной таблицы для пихты (см. приложение 14) с аналогичной для ели (см. приложение 11) показывает, что последняя в условиях Урала при равенстве запасов V и массообразующих показателей может иметь превышение над пихтой как по надземной, так и по общей фитомассе в молодняках до 50 % и в спелом возрасте — до 17 %. Вследствие крайне ограниченных данных о фитомассе пихтарников Урала эти цифры следует считать приблизительными. По крайней мере, можно сделать вывод, что для ели и пихты на Урале необходимы отдельные таблицы биопродуктивности, даже если по ходу роста стволового запаса V эти породы не различаются.

3.3.5.3. Таблицы биопродуктивности для подзоны широколиственно-темнохвойных лесов

Ельники (*P. excelsa* Link) подзоны широколиственно-темнохвойных лесов (ШП) представлены 79 пробными площадями, заложенными в пределах Центральной и Восточной Европы (10°—43° в. д.). В эту же подзону входят ельники (*P. jezoensis* Carr.) Сихотэ-Алиня (132°—135° в. д.), представленные 7 пробными площадями (Дюкарев и др., 1971). Поскольку достоверного различия между видами не выявлено ни по одной фракции надземной фитомассы (все значения $t < 2,0$), все ельники подзоны объединены в одну выборку, для которой действительны модели (188) при $X_1 = 1, X_2 = 0, X_3 = 0, X_4 = 0, X_5 = 0$, полученные в ходе зонального анализа (см. табл. 28).

Совмещение упомянутых моделей выполнено с ТХР нормальных ельников кисличных Белоруссии (Нормативные материалы..., 1984) высшего для этой подзоны (Ia) класса бонитета. Возрастная динамика фракционного состава фитомассы, полученная в результате такого совмещения, показана в приложении 15.

3.3.5.4. Таблицы биопродуктивности для подзоны широколиственных лесов

Еловые древостой. Ельники подзоны широколиственных лесов (IVP) представлены 105 (*P. excelsa* Link) и 2 (*P. sitchensis* Carr.) пробными площадями, заложенными в пределах большей части Европы (от 6° з. д. до 44° в. д.) как в горных местообитаниях, так и на равнинах и 6 пробными площадями *P. excelsa* Link в возрасте древостоев 30—47 лет, заложенными в северной части Японии (см. рис. 37). Поскольку японские пробные площади малочисленны и заложены в узком возрастном диапазоне, они анализировались в совокупности данных о фитомассе ели в подзоне, хотя европейские и японские объекты, расположенные практически на противоположных сторонах земного шара, имеют различия по комплексу лесорастительных условий.

Для подзоны IVP выполнено совмещение моделей (188) при $X_1 = 0, X_2 = 1, X_3 = 0, X_4 = 0, X_5 = 0$ с ТХР полных условно-однодревостоев среднегорного пояса Украинских Карпат (Нормативно-справочные..., 1987, табл. 3.2.6) высшего для этой

подзоны (Iв) класса бонитета. Возрастная динамика фракционного состава фитомассы, полученная в результате такого совмещения, показана в приложении 16.

Пихтовые древостои. Пихтовые насаждения в подзоне широколиственных лесов (IVA) представлены относительно немногочисленными (43) пробными площадями с разной видовой принадлежностью. 21 пробная площадь заложена в пихтарниках (*A. alba* Mill.) Средней Европы (12°—23° в. д.) и 22 — в Японии, в том числе 15 — *A. Veitchii*, 6 — *A. sachalinensis* и 1 — *A. firma*. Пробные площади сгруппированы по трем породам, закодированным блоковыми переменными: $X_1 = 0, X_2 = 0$ — пихта белая; $X_1 = 1, X_2 = 0$ — пихта Вича; $X_1 = 0, X_2 = 1$ — пихта сахалинская. По совокупности данных 43 пробных площадей рассчитаны регрессионные модели для массы стволов

$$\ln P_s = -1,0481 - (0,1102/4,1)X_1 + (0,9995/95,5)\ln V + \\ + (0,1061/4,5)\ln A - (0,1021/4,7)\ln D; R^2 = 0,998; \quad (195)$$

$$SE = 0,052;$$

для массы ветвей

$$\ln(P_b/V) = -2,1675 + (0,3158/2,4)X_2 - (0,8605/8,4)\ln H + \\ + (1,0816/5,0)\ln D - (0,1349/3,9)\ln A \ln D; \quad (196)$$

$$R^2 = 0,814; SE = 0,243;$$

для массы хвои

$$\ln(P_f/V) = -0,7731 + (0,4966/4,4)X_1 + (0,5838/4,4)X_2 - \\ - (0,0602/6,0)(\ln A)^2 - (0,2841/3,1)\ln H + (0,3565/3,1)\ln(P_b/V); \quad (197)$$

$$R^2 = 0,929; SE = 0,214.$$

Таким образом, при прочих равных условиях есть достоверные различия между тремя видами по массе хвои: наибольшие значения у пихты сахалинской и наименьшие — у белой при $t = 4,4 > t_{0,5} = 2,0$. По массе ветвей достоверно различаются пихты сахалинская и белая ($t = 2,4 > 2,0$), различия между пихтами сахалинской и Вича недостоверны ($t = 0,32 < 2,0$). По массе ство-

лов достоверно различаются пихты белая и Вича ($t = 4,1 > 2,0$), различия между пихтами сахалинской и белой недостоверны ($t = 0,39 < 2,0$).

Для пихты белой (европейская часть подзоны IVA) вполне совмещение моделей (195)—(197) при $X_1 = 0$, $X_2 = 0$ для надземной фитомассы и модели (188) при $X_1 = 0$, $X_2 = 0$, $X_3 = 1$, $X_4 = 0$ и $X_5 = 0$ для массы корней с ТХР полных естественных пихтовых древостоев Карпат (Нормативно-справочные..., 1987, табл. 3.2.8) высшего для этой подзоны (Ia) класса бонитета. Возрастная динамика фракционного состава фитомассы, полученная в результате такого совмещения, показана в приложении 17.

Динамика роста пихт Вича и сахалинской, по-видимому, имеет свои региональные особенности, однако представляет интерес сопоставление фитопродуктивности трех видов по принципу "Что будет, если..." т. е. в предположении, что все сопоставляемые насаждения имеют один и тот же возраст и одну общую морфоструктуру, что в реальных условиях может иметь место. В качестве основы для такого сопоставления взяты ТХР полных естественных пихтовых древостоев Карпат Ia класса бонитета (см. приложение 17). При одном и том же возрасте древостои пихты разных видов, но одного класса бонитета существенно различаются по соотношению различных фракций надземной фитомассы, прежде всего — по степени охвоенности: по отношению к массе хвои пихты белой аналогичный показатель у пихты Вича выше в 1,6 раза, а у сахалинской — в 2,0 раза. Масса ветвей у последней по отношению к пихтам белой и Вича больше в 1,4 раза, а по массе стволов пихта Вича на 12 % уступает пихтам белой и сахалинской.

* * *

Собранные коллекции экспериментальных данных о фитомассе древостоев дали возможность рассчитать по ним серию регрессионных моделей переводных коэффициентов фитомассы разных уровней обобщения: для ели, пихты и осины — в пределах их ареала на территории Северной Евразии, а для сосны и березы — для Урало-Казахстанского региона. Об их достоверности можно судить по соответствующим статистическим критериям, и тем не менее точность приводимых моделей нельзя пере-

оценивать, поскольку она не может быть выше точности исходных экспериментальных данных (Мак-Лоун, 1979). Эти данные по первым трем из упомянутых пород получены и опубликованы на протяжении почти полувека, поэтому вероятность существенного пополнения сводок экспериментальных данных на ближайшие годы и соответствующего повышения точности моделей для переводных коэффициентов очень мала.

Совокупность приведенных моделей позволяет совместить их со всеми региональными ТХР еловых, пихтовых и осиновых древостоев Северной Евразии и создать тем самым своеобразную сводку, или банк нормативов, т. е. продублировать весь арсенал ТХР, представленный в комплекте региональных лесотаксационных справочников бывшего СССР, аналогичными таблицами биопродуктивности. Это задача чисто техническая, она не могла быть полностью решена в рамках настоящей монографии. Наличие такого банка нормативов дает возможность проводить инвентаризацию фитомассы лесов на государственном уровне, оценивать ее изменение за определенный период, в том числе изменение приходной части углеродного баланса.

В разделе 3.3 по существу сделана первая попытка районирования переводных коэффициентов фитомассы. Установлено различие переводных коэффициентов по подзонам, регионам и подрегионам при условии равенства массообразующих показателей и запасов стволов V . Фактические же закономерности распределения фитомассы лесов определяются не только региональными различиями переводных коэффициентов, но и географическими закономерностями изменения массообразующих показателей и запасов V . Необходимо дальнейшее совершенствование методики исследования географических закономерностей в динамике массообразующих показателей древостоев и вместе с ними — запасов стволовой древесины и всей фитомассы.

ГЛАВА 4

ЭКСТРАПОЛЯЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ О ФИТОМАССЕ ЛЕСОВ НА ЛЕСОПОКРЫТУЮ ПЛОЩАДЬ РЕГИОНА

Многофакторные модели переводных коэффициентов фитомассы можно стыковать не только с ТХР, но и с банками данных ГУЛФ, тем самым экстраполируя экспериментальные данные о фитомассе на ту или иную лесопокрытую площадь. Мы придерживаемся мнения М. Ф. Макаревского (1991), что оценку запасов фитомассы лесов следует начинать не с глобального или национального уровней, как это имеет место сейчас при расчетах депонирования углерода, а с уровня региона, для чего на основе экспериментальных работ должны быть выведены для всех лесобразующих пород региональные переводные коэффициенты фитомассы. Эти коэффициенты оцениваются с помощью регрессионных моделей, включающих основные массообразующие показатели древостоя в качестве объясняющих переменных.

В результате периодически проводимой лесоинвентаризации лесных площадей вся территория гослесфонда России обеспечена выделенными банками лесоустроительных данных, которые для значительной части лесхозов (в Свердловской области — для половины) записаны на магнитных носителях. При этом каждый выдел в пределах квартала характеризуется величиной площади и запаса стволовой древесины на ней, а также основными массообразующими показателями. Вводимые в действие “Основные положения лесного мониторинга в России” предполагают организацию общегосударственной сети автоматизированных рабочих мест лесничих. Такая ситуация создает предпосылку для создания банков данных о фитомассе лесов по принципу от частного к общему, т. е. с иерархией от уровня лесничества и лесхозов до общенационального. На их основе можно составлять картосхемы биопродуктивности лесов в такой же последовательности уровней обобщения. На любом из этих уровней мо-

гут быть применены различные способы совмещения переводных коэффициентов с данными ГУЛФ, которые в разделе 3.1 были систематизированы по четырем уровням приближения к реальности. Использование наиболее продвинутых из них предполагает:

- расчет регрессионных моделей зависимости переводных коэффициентов фитомассы от основных массообразующих факторов (таксационных показателей);
- структурирование повыдельного банка данных ГУЛФ для получения матрицы распределения запасов стволовой древесины по тем же массообразующим факторам;
- табулирование регрессионных моделей по цифровым значениям матрицы распределения запасов и получение взвешенных по этим значениям запасов фитомассы для всей лесопокрытой площади.

Покажем принципы стыковки переводных коэффициентов фитомассы на примере сосняков Северского лесничества Учебно-опытного лесхоза УГЛТА по двум вариантам сортировки повыдельного банка данных ГУЛФ и расчета матриц переводных коэффициентов:

- по возрасту и классу бонитета, согласно структуре уравнения (161) (см. раздел 3.1);
- по возрасту, классу бонитета, среднему диаметру и густоте, согласно структуре уравнения (149) (см. раздел 2.5.5).

4.1. ПОВЫДЕЛЬНАЯ ЭКСТРАПОЛЯЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ ФИТОМАССЫ НА ПЛОЩАДЬ СОСНЯКОВ УЧЕБНО-ОПЫТНОГО ЛЕСХОЗА УГЛТА

В качестве исходных данных для проведения анализа количественного представительства лесных насаждений с различной лесотаксационной характеристикой и получения итоговых результатов используются повыдельные таксационные описания. Повыдельные таксационные описания для каждого отдельного лесничества хранятся на магнитных носителях в виде бинарных структурированных файлов специального формата. Каждая запись файла соответствует одному выделу, однозначно идентифицируется номерами квартала и выдела и содержит в последовательности полей определенной длины коды неметрических и значения метрических таксационных показателей. Наиболее

Таблица 29

Форма представления итогов второго этапа сортировки повыделного банка данных

№ п/п	Поле	Тип данных	Ширина	Точность
1	Номер квартала	Цифровой	5	0
2	Номер выдела	Цифровой	3	0
3	Площадь выдела	Цифровой	7	1
4	Коэффициент состава-1	Цифровой	2	0
5	Порода-1	Символьный	5	
6	Коэффициент состава-2	Цифровой	2	0
7	Порода-2	Символьный	5	
8	Коэффициент состава-3	Цифровой	2	0
9	Порода-3	Символьный	5	
10	Коэффициент состава-4	Цифровой	2	0
11	Порода-4	Символьный	5	
12	Коэффициент состава-5	Цифровой	2	0
13	Порода-5	Символьный	5	
14	Коэффициент состава-6	Цифровой	2	0
15	Порода-6	Символьный	5	
16	Коэффициент состава-7	Цифровой	2	0
17	Порода-7	Символьный	5	
18	Класс возраста	Цифровой	2	0
19	Средняя высота	Цифровой	2	0
20	Средний диаметр	Цифровой	2	0
21	Класс бонитета	Цифровой	1	0
22	Буква класса бонитета	Символьный	1	
23	Тип леса	Символьный	7	
24	Тип условий произрастания	Цифровой	3	0
25	Полнота	Цифровой	3	1
26	Запас	Цифровой	5	0
27	Класс товарности	Цифровой	1	0

трудоёмкая часть работы — процесс распределения элементарных лесных площадей (выделов) по градациям основных таксационных показателей. Процесс автоматизации данного блока работ состоит из четырех основных этапов:

- разработки специального математического (программного) обеспечения ЭВМ для экстракции необходимых данных из таксационного описания выдела;
- собственно экстракции данных и импортирования их в специальный формат (табл. 29);
- разработки специального математического обеспечения ЭВМ для сортировки подготовленных на втором этапе данных и вычисления необходимых абсолютных и относитель-

ных итоговых характеристик распределения выделов по градациям основных таксационных показателей;

- автоматического распределения данных и вычисления итоговых результатов.

Для выполнения данного блока работ применяется IBM-совместимый персональный компьютер с процессором Intel 80486, оснащенный встроенным математическим сопроцессором. Применение столь мощной вычислительной техники обусловлено необходимостью обработки большого информационного объема с множеством ключевых параметров. Математическое обеспечение для второго этапа подготовки данных разработано на языке программирования Pascal (версия Borland pascal 7,0).

Таксационные описания, изначально представленные в виде обычных текстовых файлов, содержащих повыделные таксационные характеристики кварталов, подвергаются логическому разбиению по элементам на основе характерных строковых последовательностей в следующем порядке: лесхоз→лесничество→квартал→выдел→таксационные показатели. Данные, прошедшие интеграцию в описанной последовательности, оформляются в текстовый файл, пригодный для исполнения автоматического импорта в формат системы управления базами данных (СУБД) FoxBase plus (версия 2,0).

Заключительный этап рассматриваемого блока работ выполняется с использованием математического обеспечения, созданного с применением средств, предоставляемых стандартной СУБД FoxBase plus. Выбор конкретной среды разработки не имеет решающего значения, поскольку все современные СУБД предоставляют разработчику мощные средства сортировки данных, что и является основной задачей на данном этапе разработки.

4.1.1. СОРТИРОВКА ПЛОЩАДЕЙ ВЫДЕЛОВ ПО ВОЗРАСТУ И КЛАССУ БОНИТЕТА

Используя изложенную программу, получаем распределение площадей лесфонда по категориям земель, а также покрытой лесом площади и соответствующих запасов стволовой древесины по лесообразующим породам. Установили, что в общей пло-

щади Северского лесничества покрытая лесом площадь составляет 87 %. Доля сосны в лесопокрытой площади — 64, березы — 26 и ели — 10 %. Затем для каждой породы производится сортировка величин площадей выделов и соответствующих им запасов по двум определяющим факторам — возрасту и классу бонитета. Далее в качестве примера взята преобладающая порода — сосна.

Каждое значение запаса стволов V ($\text{м}^3/\text{га}$), приходящееся на ячейку матрицы, соответствующую заданным классам возраста и бонитета, взвешивается по величине площадей выделов, накапливаемых в данной ячейке. Результаты сортировки запасов стволовой древесины сосны по классам возраста и бонитета представлены двояким образом (табл. 30). Во-первых, запасы стволовой древесины отнесены к единице площади (числитель), чтобы обеспечить возможность стыковки переводных коэффициентов P_i/V согласно уравнений (161), с систематизированным по классам возраста и бонитета повыдельным банком данных, и во-вторых, эти же стратифицированные запасы выражены в долях от 1000 м^3 общего запаса (знаменатель), чтобы распределение состыкованных значений P_i/V , приведенных к абсолютным величинам P_i , можно было перенести на сосновые древостои любой площади или административно-хозяйственной единицы. Поскольку повыдельный банк данных, записанный на магнитных носителях, имеется лишь для половины лесхозов области, этот прием может быть применен в случае создания базы данных о фитомассе лесов для территории, выходящей за пределы обеспеченности информацией на магнитных носителях, с использованием обобщенного распределения запасов стволов, аналогичного приведенному в табл. 30.

Распределение переводных коэффициентов массы кроны сосны по классам возраста и бонитета после табулирования уравнения (161) по данным табл. 30 (числитель) приведено в табл. 31. После умножения данных табл. 31 на числовые значения табл. 30 (знаменатель) имеем итоговую массу кроны, равную $93,2 \text{ т}$, приходящуюся на 1000 м^3 запаса стволов (табл. 32). Эта цифра представляет результат взвешивания разнесенных по классам возраста и бонитета переводных коэффициентов по фактическим запасам V соответствующих ячеек матрицы.

Таблица 30
Результаты сортировки по классам возраста и бонитета запасов стволовой древесины сосны, отнесенных к 1 га (числитель) и приведенных к 1000 м³ (знаменатель) в выделенном банке данных ГУЛФ Северского лесничества

Класс бонитета	Класс возраста									Итого
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	
I	—	105 1	—	260 3	789 27	—	—	—	—	— 31
II	19 1	161 68	201 96	314 137	357 363	340 65	300 6	285 16	276 38	— 790
III	25 1	155 5	—	234 9	264 21	310 11	260 3	280 70	244 41	— 161
IV	—	—	80 1	—	—	—	140 1	240 1	190 1	— 4
V	—	—	53 1	115 1	155 7	—	—	101 2	103 3	— 14
Итого	— 2	— 74	— 98	— 150	— 418	— 76	— 10	— 89	— 83	— 1000

Таблица 31
Распределение переводных коэффициентов массы кроны P_c/V (кг/м³) после табулирования модели (161) по данным табл. 30

Класс бонитета	Класс возраста								
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
I	—	171	—	116	50	—	—	—	—
II	331	116	108	84	84	94	107	114	119
III	283	101	—	87	86	82	98	97	108
IV	—	—	144	—	—	—	115	88	103
V	—	—	158	101	85	—	—	118	118

Таблица 32
Распределение массы кроны в абсолютно сухом состоянии (т), приходящейся на 1000 м³ запаса стволовой древесины в сосновых древостоях Северского лесничества

Класс бонитета	Класс возраста									Итого
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	
I	—	0,2	—	0,4	1,3	—	—	—	—	1,9
II	0,3	7,9	10,4	11,5	30,5	6,1	0,6	1,8	4,5	73,6
III	0,3	0,5	—	0,8	1,8	0,9	0,3	6,8	4,4	15,8
IV	—	—	0,1	—	—	—	0,1	0,1	0,1	0,4
V	—	—	0,2	0,1	0,6	—	—	0,2	0,4	1,5
Итого	0,6	8,6	10,7	12,8	34,2	7,0	1,0	8,9	9,4	93,2

Таким образом, процедура сортировки повыдельного банка данных и стыковки их с переводным коэффициентом предусматривает двойное взвешивание итогового показателя: а) запасы стволов ($m^3/га$) в ячейках взвешиваются по величинам площадей выделов и б) значения переводного коэффициента (см. табл. 31) взвешиваются по запасам стволов, распределенным по ячейкам двухходовой матрицы соответствующих классов возраста и бонитета (см. табл. 32).

Для массы хвой и корней уравнения (161) при табулировании их по данным табл. 30 дают отрицательные значения, по-видимому, вследствие экстраполяции за пределы области их применимости, поскольку данные по Уралу при расчете моделей (161) отсутствовали.

4.1.2. СОРТИРОВКА ПЛОЩАДЕЙ ВЫДЕЛОВ ПО ВОЗРАСТУ, КЛАССУ БОНИТЕТА, СРЕДНЕМУ ДИАМЕТРУ И ГУСТОТЕ ДРЕВОСТОЕВ

Уравнение вида (149), на применении которого основан II вариант, содержит в качестве одного из определяющих факторов показатель густоты N . В банках данных ГУЛФ он отсутствует, но зато там есть данные средних диаметра D , высоты H и относительной полноты (B_{rel}). Для обеспечения стыковки с моделью вида (149), представленной для массы ветвей уравнением (166), в программу сортировки повыдельного банка данных вводится дополнительный блок, включающий в себя расчетный алгоритм (рис. 39).

$$B_n = f(H) \rightarrow B = B_n \cdot B_{rel} \rightarrow N = 1,274 \cdot B/D^2, \quad (198)$$

где первое звено представляет аналитическое выражение для суммы площадей сечений нормального древостоя (B_n) как функции средней высоты древостоя, согласно стандартной таблице ЦНИИЛХ.

При стыковке данных фитомассы с повыдельным банком данных ГУЛФ в соответствии со структурой модели (166) данные, необходимые для стыковки (в частности запасы стволов), сортируются по ячейкам не двухходовой, как в первом варианте, а трехходовой матрицы, а именно по классам возраста, клас-

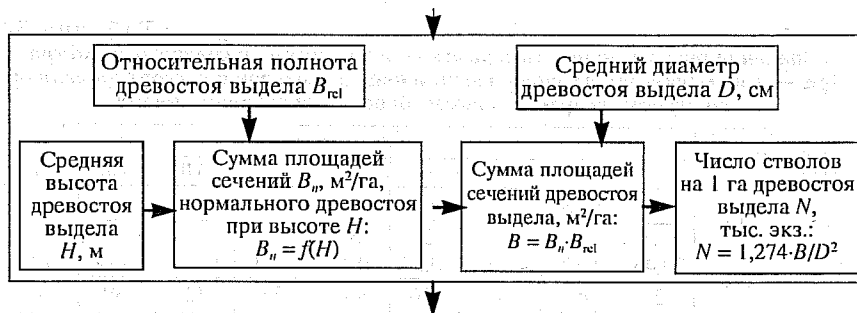


Рис. 39. Вспомогательный блок для расчета густоты древостоя на выделе по средней высоте H , относительной полноте $B_{отн}$ и среднему диаметру древостоя D

сам бонитета и в пределах последних — по группам относительной полноты: 0,4; 0,7 и 1,0 (табл. 33). Одновременно по этим же трем показателям сортируются повыведельные значения числа стволов (тыс. экз./га) и среднего диаметра древостоя (см) (табл. 34), которые, как и запасы стволов, взвешиваются по площади выделов.

Путем табулирования уравнения (166) для массы ветвей и аналогичного ему уравнения для массы хвой по значениям возраста, класса бонитета, числа стволов и среднего диаметра, приве-

Таблица 33
Результаты сортировки и накопления повыведельных запасов стволов по трем входам, в долях от 1000 м³ общего запаса

Класс бонитета	Полнота	Класс возраста									Итого
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	
I	0,7	—	1	—	3	27	—	—	—	—	31
	0,4	0*	0	0	3	2	2	3	2	19	31
II	0,7	1	52	54	84	290	63	3	14	19	580
	1,0	—	16	42	50	71	—	—	—	—	179
III	0,4	1	—	—	2	—	—	—	13	16	32
	0,7	—	—	—	3	18	11	3	57	25	117
IV	1,0	—	5	—	4	3	—	—	—	—	12
	0,4	—	—	—	—	—	—	—	—	1	1
V	0,7	—	—	1	—	—	—	1	1	—	3
	0,4	—	—	—	—	—	—	—	1	1	2
Всего	0,7	—	—	1	1	7	—	—	1	2	12
		2	74	98	150	418	76	10	89	83	1000

* Нулевое значение соответствует доле запаса яички в общем запаса, меньшей 0,001.

Таблица 34

Значения числа стволов (тыс. экз/га — в числителе) и среднего диаметра (см — в знаменателе), взвешенные по площади выделов и рассортированные по классам возраста, классам бонитета и группам полнот

Класс бонитета	Полнота	Класс возраста								
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
I	0,7	—	<u>1,36</u>	—	<u>0,47</u>	<u>0,40</u>	—	—	—	—
			14		26	30				
II	0,4	<u>20,45</u>	<u>4,32</u>	<u>0,37</u>	<u>0,34</u>	<u>0,12</u>	<u>0,21</u>	<u>0,23</u>	<u>0,14</u>	<u>0,14</u>
		2	6	24	26	44	33	32	39	41
	0,7	<u>23,64</u>	<u>1,96</u>	<u>1,25</u>	<u>0,60</u>	<u>0,46</u>	<u>0,34</u>	<u>0,29</u>	<u>0,33</u>	<u>0,21</u>
		2	12	17	24	28	32	32	33	40
	1,0	—	<u>2,48</u>	<u>2,04</u>	<u>0,86</u>	<u>0,60</u>	—	—	—	—
			12	14	22	27				
III	0,4	<u>20,02</u>	—	—	<u>0,12</u>	—	—	—	<u>0,14</u>	<u>0,14</u>
		3			38				39	40
	0,7	—	—	—	<u>0,79</u>	<u>0,58</u>	<u>0,53</u>	<u>0,34</u>	<u>0,21</u>	<u>0,20</u>
					20	24	26	31	38	41
	1,0	—	<u>3,90</u>	—	<u>1,04</u>	<u>1,13</u>	—	—	—	—
			10		20	20				
IV	0,4	—	—	—	—	—	—	—	—	<u>0,27</u>
										28
	0,7	—	—	<u>3,59</u>	—	—	—	<u>0,46</u>	<u>0,29</u>	—
				8				26	30	
V	0,4	—	—	—	—	—	—	—	<u>0,70</u>	<u>0,40</u>
									16	23
	0,7	—	—	<u>4,79</u>	<u>1,28</u>	<u>1,07</u>	—	—	<u>0,59</u>	<u>0,51</u>
				7	14	17			20	22

денным в табл. 34, получаем значения переводных коэффициентов для массы ветвей и хвои, распределенные по ячейкам, соответствующим названным трем (а фактически — четырем) входам (табл. 35). Полученные значения переводных коэффициентов умножаем на значения относительных запасов стволов (второе взвешивание показателей), приведенных в табл. 32, и получаем распределение массы ветвей и хвои (т), приходящейся на 1000 м³ запаса стволов (табл. 36).

Таким образом, используя уравнения (149) и результаты соответствующей сортировки по выделному банку данных, мы получаем значение массы кроны, приходящееся на 1000 м³ стволо-

Переводные коэффициенты P_i/V , кг/м³ (где P_i — масса ветвей — в числителе, или масса хвои — в знаменателе), распределенные по классам возраста, классам бонитета и полнотам в результате табулирования уравнений вида (149) по данным табл. 34

Класс бонитета	Полнота	Класс возраста								
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
I	0,7	—	$\frac{180}{26}$	—	$\frac{78}{12}$	$\frac{51}{9}$	—	—	—	—
		—	$\frac{22}{45}$	$\frac{270}{29}$	$\frac{476}{18}$	$\frac{145}{13}$	$\frac{633}{11}$	$\frac{73}{9}$	$\frac{39}{8}$	$\frac{62}{8}$
II	0,4	$\frac{23}{45}$	$\frac{132}{29}$	$\frac{69}{18}$	$\frac{73}{13}$	$\frac{54}{11}$	$\frac{49}{9}$	$\frac{36}{8}$	$\frac{30}{8}$	$\frac{44}{8}$
		—	$\frac{113}{29}$	$\frac{39}{18}$	$\frac{50}{13}$	$\frac{44}{11}$	—	—	—	—
III	0,4	$\frac{54}{52}$	—	—	$\frac{279}{15}$	—	—	—	$\frac{86}{9}$	$\frac{71}{9}$
		—	—	—	$\frac{59}{15}$	$\frac{48}{12}$	$\frac{37}{11}$	$\frac{44}{10}$	$\frac{65}{9}$	$\frac{67}{9}$
IV	0,4	—	$\frac{95}{33}$	—	$\frac{53}{15}$	$\frac{30}{12}$	—	—	—	—
		—	—	—	—	—	—	—	—	—
V	0,4	—	—	—	—	—	—	—	$\frac{22}{14}$	$\frac{42}{13}$
		—	—	$\frac{42}{30}$	$\frac{63}{22}$	$\frac{54}{18}$	—	—	$\frac{35}{14}$	$\frac{41}{13}$

вой древесины, равное 74,8 т. Видимо, эта цифра более близка к реальности в условиях Урала, чем величина 93,2 т, полученная по I варианту, во-первых, вследствие более корректной сортировки площадей выделов по основным массообразующим показателям и, во-вторых, благодаря использованию экспериментальных данных о фитомассе сосняков Урала, а не Сибири.

Чтобы показать влияние каждого из упомянутых в разделе 3.1 четырех способов (уровней) совмещения переводных коэффициентов фитомассы с банками данных ГУЛФ на точность экстраполяции экспериментальных данных фитомассы на лесопо-

Электронный архив УГЛТУ

Таблица 36

Распределение массы ветвей (числитель) и хвоя (знаменатель), взвешенной по возрасту, классу бонитета и полноте и приходящейся на 1000 м³ запасов стволовой древесины, т

Класс бонитета	Полнота	Класс возраста									Итого
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	
I	0,7	—	$\frac{0,2}{0}$	—	$\frac{0,2}{0}$	$\frac{1,4}{0,2}$	—	—	—	—	$\frac{1,8}{0,2}$
		0*	$\frac{0}{0}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{0,4}{0}$	$\frac{1,3}{0}$	$\frac{0,2}{0}$	$\frac{0,1}{0}$	$\frac{0,1}{0}$	$\frac{1,0}{0,2}$	$\frac{3,1}{0,2}$
II	0,4	$\frac{0}{0}$	$\frac{6,9}{1,5}$	$\frac{3,7}{1,0}$	$\frac{6,1}{1,1}$	$\frac{15,7}{3,2}$	$\frac{3,1}{0,6}$	$\frac{0,1}{0}$	$\frac{0,4}{0,1}$	$\frac{0,8}{0,2}$	$\frac{36,8}{7,7}$
		—	$\frac{1,8}{0,5}$	$\frac{1,6}{0,8}$	$\frac{2,5}{0,7}$	$\frac{3,1}{0,8}$	—	—	—	—	$\frac{9,0}{2,8}$
III	0,4	$\frac{0,1}{0,1}$	—	—	$\frac{0,6}{0}$	—	—	—	$\frac{1,1}{0,1}$	$\frac{1,1}{0,1}$	$\frac{2,9}{0,3}$
		—	—	—	$\frac{0,2}{0}$	$\frac{0,9}{0,2}$	$\frac{0,4}{0,1}$	$\frac{0,1}{0}$	$\frac{3,7}{0,6}$	$\frac{1,7}{0,2}$	$\frac{7,0}{1,1}$
IV	0,7	—	$\frac{0,5}{0,2}$	—	$\frac{0,2}{0,1}$	$\frac{0,1}{0}$	—	—	—	—	$\frac{0,8}{0,3}$
		0,4	—	—	—	—	—	—	—	$\frac{0}{0}$	$\frac{0}{0}$
V	0,4	—	—	$\frac{0}{0}$	—	—	—	$\frac{0}{0}$	$\frac{0,1}{0}$	—	$\frac{0,1}{0}$
		0,4	—	—	—	—	—	—	$\frac{0}{0}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{0}{0}$
Всего	0,7	—	—	$\frac{0}{0}$	$\frac{0,1}{0}$	$\frac{0,4}{0,1}$	—	—	$\frac{0}{0}$	$\frac{0,1}{0}$	$\frac{0,6}{0,1}$
		0,4	$\frac{0,1}{0,1}$	$\frac{9,4}{2,2}$	$\frac{5,3}{1,8}$	$\frac{10,3}{1,9}$	$\frac{22,9}{4,5}$	$\frac{3,7}{0,7}$	$\frac{0,3}{0}$	$\frac{5,4}{0,8}$	$\frac{4,7}{0,7}$
Итого крона		0,2	11,6	7,1	12,2	27,4	4,4	0,3	6,2	5,4	74,8

* Нулевое значение соответствует массе ветвей или хвои, меньшей 0,1 т.

крытую площадь, рассмотрим изложенный в разделе 4.1.2 вариант стыковки более детально — на другой породе и на большей лесопокрытой площади.

4.2. ПОВЫДЕЛЬНАЯ ЭКСТРАПОЛЯЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ ФИТОМАССЫ НА ПЛОЩАДЬ БЕРЕЗНЯКОВ НЕВЬЯНСКОГО ЛЕСХОЗА СВЕРДЛОВСКОЙ ОБЛАСТИ

4.2.1. РЕГРЕССИОННЫЕ МОДЕЛИ ПЕРЕВОДНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ ФИТОМАССЫ БЕРЕЗЫ РАЗНЫХ УРОВНЕЙ ПРИБЛИЖЕНИЯ

Структурированный повыдельный банк данных ГУЛФ дает возможность рассчитать смещения (систематические ошибки) оценок фитомассы на лесопокрытой площади, как общие, так и дифференцированные по площадям. Для расчета смещений, обусловленных применением переводного коэффициента первых трех уровней приближения, по отношению к предлагаемому подходу четвертого уровня (см. раздел 3.1), по массиву данных 63 пробных площадей (см. приложение 3) рассчитаны переводные коэффициенты фитомассы P_i/V , дифференцированные по трем регионам (их кодировку см. в разделе 3.3.2) по вариантам:

$$1) P_i/V = \text{const} \text{ (первый уровень приближения);}$$

$$2) \ln(P_i/V) = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + a_3\ln A + a_4(\ln A)^2 + a_5(\ln A)^3 + a_{10}\ln(P_i/V) \text{ (второй уровень приближения);} \quad (199)$$

$$3) \ln(P_i/V) = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + a_3\ln A + a_4(\ln A)^2 + a_5(\ln A)^3 + a_6\ln H_{50} + a_7(\ln H_{50})^2 + a_8\ln A \ln H_{50} + a_9\ln A (\ln H_{50})^2 + a_{10}\ln(P_i/V) \text{ (третий уровень приближения).} \quad (200)$$

На первом уровне приближения переводные коэффициенты для массы листвы и скелета кроны достоверно различаются по всем трем регионам и составляют соответственно для Среднего Урала 18,3 и 70,8 кг/м³, для Южного Урала — 19,5 и 75,1 кг/м³, для Казахстана — 27,3 и 102,6 кг/м³. Для массы стволов переводные коэффициенты для Среднего Урала и Казахстана достоверно не различаются и обобщенный по двум регионам показатель составляет 507,6 кг/м³, а для Южного Урала — 545,0 кг/м³.

Характеристика уравнений (199) и (200) (табл. 37) показывает, что на втором и третьем уровнях приближения переводные коэффициенты для массы ветвей являются общими для Казах-

Таблица 37

Характеристика уравнений (199) и (200) для переводных коэффициентов P_i/V различных фракций надземной фитомассы березняков трех регионов в зависимости от определяющих факторов

$P_i/V, \text{т/м}^3$	Константы (числитель) и их значимость t (знаменатель)						
	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6
Уравнение (199) (второй уровень приближения)							
Для стволов	1,333	$\frac{0,063}{2,5}$	—	$\frac{-2,088}{3,6}$	$\frac{0,681}{3,4}$	$\frac{-0,071}{3,2}$	—
Для ветвей	2,553	—	$\frac{-0,531}{4,5}$	$\frac{-2,805}{5,7}$	$\frac{0,390}{5,1}$	—	—
Для листвы	2,182	$\frac{0,223}{2,1}$	$\frac{-0,525}{4,2}$	$\frac{-2,209}{4,1}$	$\frac{0,224}{2,8}$	—	—
Уравнение (200) (третий уровень приближения)							
Для стволов	-8,900	$\frac{0,062}{2,2}$	—	—	$\frac{0,749}{3,4}$	$\frac{-0,078}{3,2}$	$\frac{7,400}{2,7}$
Для ветвей	3,342	—	$\frac{-0,455}{3,8}$	$\frac{-2,757}{5,8}$	$\frac{0,380}{5,1}$	—	—
Для листвы	-50,395	$\frac{0,405}{4,0}$	—	$\frac{4,146}{2,8}$	—	—	$\frac{29,689}{4,3}$
$P_i/V, \text{т/м}^3$	Константы (числитель) и их значимость t (знаменатель)				R^2	SE	
	a_7	a_8	a_9	a_{10}			

Уравнение (199) (второй уровень приближения)

Для стволов	—	—	—	—	0,293	0,073
Для ветвей	—	—	—	—	0,514	0,343
Для листвы	—	—	—	$\frac{0,414}{3,5}$	0,852	0,300

Уравнение (200) (третий уровень приближения)

Для стволов	$\frac{-1,311}{2,6}$	$\frac{-1,631}{3,4}$	$\frac{0,291}{3,0}$	—	0,307	0,075
Для ветвей	$\frac{-0,101}{2,2}$	—	—	—	0,551	0,332
Для листвы	$\frac{-4,267}{3,7}$	$\frac{-1,680}{3,3}$	—	$\frac{0,422}{4,1}$	0,871	0,282

стана и Южного Урала, а для массы стволов — общими для Казахстана и Среднего Урала. Переводные коэффициенты для массы листвы достоверно различаются по трем регионам (при условии равенства возраста и класса бонитета).

По вариантам (уровням приближения) имеют место закономерное увеличение коэффициента детерминации и соответственное снижение ошибки уравнения SE по мере добавления количества массоопределяющих факторов в оценочные регрессионные уравнения, т. е. в последовательности уравнений (199), (200) и (181). Это дает основание принять последний вариант (четвертый уровень приближения) в качестве базового и сопоставить с ним по точности оценки запасов фитомассы на данной лесопокрытой площади каждый из предыдущих вариантов.

4.2.2. СОВМЕЩЕНИЕ РЕГРЕССИОННЫХ МОДЕЛЕЙ ПЕРЕВОДНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ ФИТОМАССЫ С ПОВЫДЕЛЬНЫМ БАНКОМ ДАННЫХ ГУЛФ

4.2.2.1. Экспорт лесоустроительных данных из исходных бинарных файлов

Реализация алгоритма показана на примере березовой хозяйственной секции Невьянского лесхоза Свердловской области. Общая ее площадь — 33,4 тыс. га, общий запас — 2986 тыс. м³, средняя площадь выдела — 2,0 га, средний запас на выделе — 90 м³/га.

На первом этапе работ разрабатывается специальное математическое обеспечение для экспорта данных из исходных бинарных файлов. Результаты заносятся в реляционную однотобличную базу данных “Таксационное описание” (табл. 38) стандартного формата (использован формат СУБД PARADOX версии 4.5 для DOS). В процессе экспорта производится отбор выделов, содержащих только лесопокрытые площади. Математическое обеспечение первого этапа разработано на языке программирования Borland Pascal версии 7.0 для DOS (Усольцев, Сальников, 1998).

Получение переводных коэффициентов для четвертого уровня приближения (модель 181) требует наличия показателя густоты древостоя N . Поскольку в банках данных ГУЛФ он отсутствует, стыковка модели (181) с данными ГУЛФ осуществлена с помощью вспомогательного блока, представленного на рис. 39. В соответствии со схемой блока разработана структура базы данных “Нормальные древостои” (см. табл. 38).

Структура баз данных

Имя поля	Тип данных	Примечание
“Таксационное описание”		
Квартал	Целое число	Номер квартала
Выдел	Строка	Номер выдела (возможны буквенные обозначения подвыделов)
Площадь	Действительное число	Площадь выдела, га
Бонитет	Строка	Класс бонитета
Полнота	Действительное число	Относительная полнота древостоя
Порода	Строка	Сокращенное наименование породы (элемента леса) из формулы состава
Коэффициент	Целое число	Коэффициент состава для данной породы
Высота	Целое число	Средняя высота элемента леса, м
Диаметр	Целое число	Средний диаметр элемента леса, см
Класс возраста	Целое число	Класс возраста элемента леса
Запас	Целое число	Запас элемента леса на выделе, м ³
Густота	Действительное число (значение отсутствует)	Густота древостоя, отсутствует в стандартных таксационных описаниях, тыс. экз/га
“Нормальные древостой”		
Порода	Строка	Сокращенное наименование породы
Высота	Целое число	Средняя высота нормального древостоя, м
Площадь сечений	Действительное число	Абсолютная полнота нормального древостоя, м ² /га
Запас	Целое число	Запас нормального древостоя, м ³
“Основное распределение”		
Порода	Строка	Сокращенное наименование породы
Бонитет	Строка	Класс бонитета
Полнота	Действительное число	Относительная полнота древостоя
Класс возраста	Целое число	Класс возраста элемента леса
Показатель	Строка	Код таксационного показателя
Значение	Действительное число	Значение таксационного показателя
“Фитомасса”		
Бонитет	Строка	Класс бонитета
Полнота	Действительное число	Относительная полнота древостоя
Класс возраста	Целое число	Класс возраста элемента леса
Уровень	Целое число	Уровень приближения

Имя поля	Тип данных	Примечание
Фракция	Строка	Код фракции надземной фитомассы
Значение	Действительное число	Запас фитомассы, т
“Отклонения”		
Уровень	Целое число	Уровень приближения
Фракция	Строка	Код фракции надземной фитомассы
Отклонение	Действительное число	Абсолютное отклонение, т
Отклонение	Действительное число	Относительное отклонение, %
Площадь	Действительное число	Площадь группы, га
“Гистограммы”		
Фракция	Строка	Код фракции надземной фитомассы
Процент	Логический	Признак относительных значений
Разряд	Действительное число	Начальное значение разряда, т или %
Центр	Действительное число	Центральное значение разряда, т или %
Площадь-1	Действительное число	Суммарная площадь отклонения для первого уровня приближения, га
Площадь-2	Действительное число	Суммарная площадь отклонения для второго уровня приближения, га
Площадь-3	Действительное число	Суммарная площадь отклонения для третьего уровня приближения, га

4.2.2.2. Сортировка повыделных таксационных показателей

На втором этапе группируются данные базы “Таксационное описание”. Поскольку насаждения выделов в основном представлены смешанными древостоями, учет только преобладающей породы приводит к значительному искажению действительной картины распределения площадей и запасов по породам. Поэтому для каждого элемента леса рассчитывается значение псевдоплощади, представляющее собой площадь выдела, взвешенную по коэффициентам состава. Весь диапазон относительных полнот выделов подразделяется на три группы 0,4; 0,7 и 1,0.

Результаты группировки заносятся в базу данных “Основное распределение” (см. табл. 38), представление о которой дает фрагмент матрицы распределения в табл. 39.

Таблица 39

Фрагмент матрицы распределения взвешенных по площади выдела показателей N (тыс. экз/га), D (см) и V (м³/га) для трех классов возраста

Возраст, лет	Полнота	Показатель	Класс бонитета				
			I	II	III	IV	V
40	0,4	N	0,54	0,76	0,90	1,40	1,22
		D	16,7	13,5	12,3	8,6	9,1
		V	41	31	35	23	29
	0,7	N	1,06	1,10	1,50	2,26	2,26
		D	14,1	13,5	11,1	8,8	7,9
		V	62	63	53	43	35
	1,0	N	1,32	1,62	2,48	3,43	2,54
		D	13,4	12,4	9,4	7,8	7,8
		V	62	71	64	59	33
50	0,4	N	0,55	0,55	0,64	0,63	0,87
		D	17,2	16,3	14,5	13,1	10,0
		V	40	53	58	39	30
	0,7	N	0,86	0,96	1,08	1,24	2,11
		D	16,3	15,3	13,7	12,3	8,9
		V	85	92	81	61	52
	1,0	N	0,98	1,15	1,43	1,90	1,41
		D	16,5	15,5	13,4	10,9	11,8
		V	65	104	101	93	77
60	0,4	N	0,49	0,43	0,45	0,69	0,79
		D	18,6	19,7	18,1	14,3	11,7
		V	71	89	63	49	32
	0,7	N	0,67	0,71	0,73	0,82	1,25
		D	19,0	18,3	17,1	15,6	11,8
		V	115	107	94	87	46
	1,0	N	0,92	0,95	1,25	1,34	—
		D	17,8	17,5	14,8	13,7	—
		V	105	132	132	123	—

Таблица 40

Запасы фитомассы на лесопокрытых площадях березовой хозяйственной секции Невьянского лесхоза, рассчитанные разными методами

Фракция фитомассы	Варианты			
	I	II	III	IV (т/га)
Ствол	49,4/108	44,6/97	47,0/103	45,8
Ветви	6,40/94	5,00/73	6,00/88	6,80
Листва	1,55/140	0,67/60	1,33/120	1,11
Итого	57,35/107	50,27/94	54,33/101	53,71

Примечание. В числителе — т/га, в знаменателе — % к IV.

4.2.2.3. Расчет запасов фитомассы на основе переводных коэффициентов

На третьем этапе рассчитываются запасы фитомассы на основе моделей переводных коэффициентов четырех уровней приближения (рис. 40 на вкладке). Результаты заносятся в базу данных “Фитомасса”, представляющую собой отдельные для каждой породы таблицы (см. табл. 38).

На основе данных распределения запасов пород базы “Основное распределение” рассчитаны запасы каждой фракции фитомассы (табл. 40):

- **первый уровень приближения** — без учета класса бонитета, группы полноты и класса возраста;
- **второй уровень приближения** — с учетом класса возраста;
- **третий уровень приближения** — с учетом классов возраста и бонитета;
- **четвертый уровень приближения** — с учетом классов возраста и бонитета и с использованием данных распределения диаметров и густот по трем группам полноты в базе “Основное распределение”.

Приведенные в табл. 40 показатели представляют собой усредненные для всей площади лесхоза величины, тем не менее отклонения, обусловленные уровнем (точностью) оценки переводного коэффициента фитомассы крон, достигают 27—40 %. При разделении площади лесхоза по группам таксационных показателей величина смещений возрастает. Разработанная программа позволяет это проиллюстрировать.

4.2.3. РАСЧЕТ СИСТЕМАТИЧЕСКИХ ОШИБОК ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ФИТОМАССЫ

Отклонения значений запасов фитомассы в абсолютных (т) и относительных (%) единицах рассчитываются отдельно для первого, второго и третьего уровней приближения относительно четвертого (базового варианта). При этом попарно вычитаются соответствующие групповые значения базы данных “Фитомасса” и учитываются площади групп, находящиеся в базе данных “Основное распределение” (см. табл. 38, см. рис. 40 на вкладке). Результаты операции сортируются и заносятся в базу данных “Отклонения”, представляющую собой отдельные для каждой породы таблицы (см. табл. 38).

Для графического представления данных при анализе точности оценки запасов фитомассы по четырем уровням приближения производится группировка величин отклонений по градациям с вычислением соответствующих суммарных площадей.

Операция 1. Вычисление размаха вариационного ряда отклонений для каждого уровня приближения.

Операция 2. Исключение экстремальных значений отклонений с правого и левого краев ряда распределения, которые характеризуются ничтожно малыми значениями площадей. Выбор действительных параметров — нижнего и верхнего пределов и величины разряда группировки.

Операция 3. Вычисление абсолютных и относительных величин исключаемых площадей (обычно не более 0,2—0,3 % к общей площади). Корректировка выбранных диапазонов и шагов группировки.

Операция 4. Группировка отклонений, вычисление соответствующих суммарных площадей и занесение результатов в базу данных “Гистограммы”, представляющую собой отдельные для каждой породы таблицы (см. табл. 38).

Все расчеты данных в базах “Нормальные древостои”, “Основное распределение”, “Фитомасса”, “Отклонения” и “Гистограммы” (см. табл. 38) выполнены по программам, разработанным на языке сценариев PAL, встроенном в СУБД PARADOX.

Данные базы “Гистограммы” экспортированы в формат табличного процессора MS Excel версии 7.0, имеющего подсистему графического представления данных. Средствами MS Excel построены гистограммы распределения площадей выделов по величинам отклонений (рис. 41).

Анализ смещений оценок запасов фитомассы показывает (см. рис. 41), что каждая фракция характеризуется специфичной закономерностью распределения площадей по величине смещения в каждом варианте: I вариант завывает, II — занижает и III — завывает оценки фитомассы листвы и стволов, а для ветвей по всем трем вариантам наблюдается занижение запаса, что находится в соответствии с итоговыми взвешенными оценками (см. табл. 40).

Вариант I завывает массу листвы на величину 20, 40, 60 и 80 % на площадях, составляющих соответственно 20, 18, 21, и 13 % к общей лесопокрытой, II вариант занижает эту же оценку на 20, 40 и 60 % на площадях, составляющих соответственно 21, 62

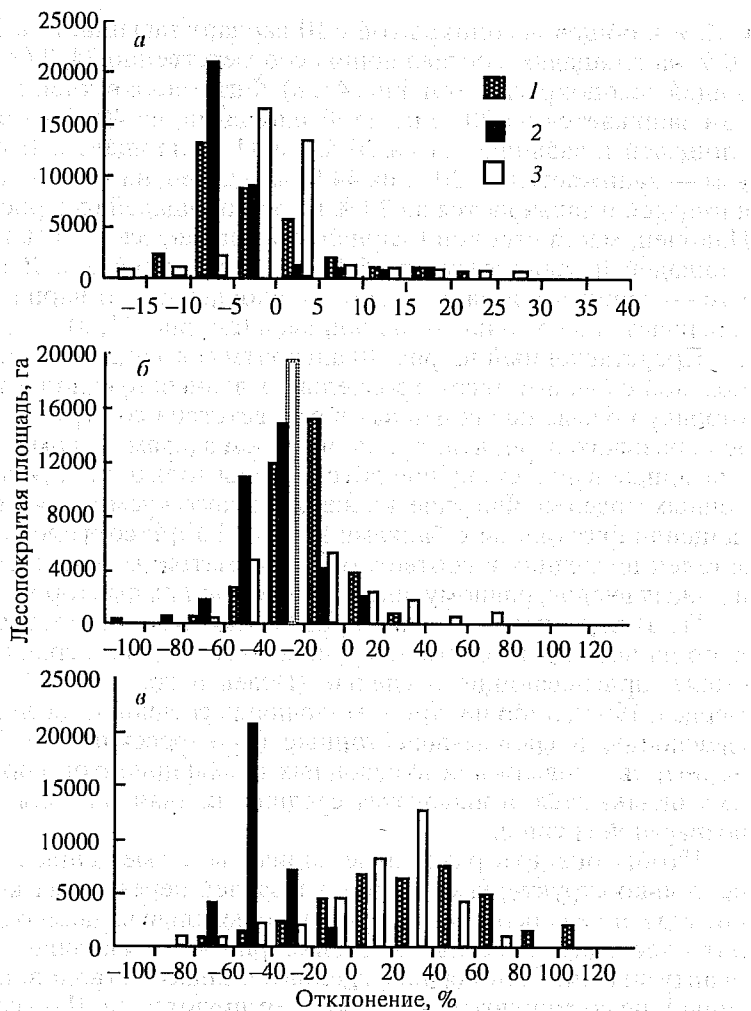


Рис. 41. Распределение лесопокрытой площади березовой хозяйственной секции Невьянского лесхоза по величине систематической ошибки при оценке фитомассы стволов (*a*), ветвей (*б*) и листвы (*в*), получаемой при использовании переводных коэффициентов разных уровней приближения (1; 2 или 3) при унифицированной схеме (сортировки повыделных данных (см. рис. 40)

и 12 % к общей лесопокрытой и III вариант завышает на 20, 40 и 60 % на площадях, составляющих соответственно 24, 37 и 12 % к общей лесопокрытой (см. рис. 41, в). Фитомасса ветвей I вариантом занижается на 20 % на 35 % площадей, на 40 % — на 32 % площадей и завышается на 20 % на 11 % площадей; II вариантом — занижается на 20 % на 44 % площадей, на 40 % — на 32 % площадей и завышается на 20 % на 6 % площадей (см. рис. 41, б). Наконец, масса стволов I вариантом занижается на 5 % на 39 % площадей и завышается на 5 % на 17 % площадей, II вариантом — занижается на 5 % на 63 % площадей и III вариантом — завышается на 5 % на 40 % площадей (см. рис. 41, а).

Представленный на рис. 40 алгоритм совмещения оценочных моделей с банком лесоустроительных данных предполагает сортировку по выделным данным в соответствии со структурой модели базового варианта, т. е. по четырем входам. Таким образом, описанные выше смещения обусловлены только точностью оценочных моделей. Фактически же при практикуемом сегодня совмещении фитомассы с банками данных ГУЛФ сортировка показателей последних в соответствующие матрицы осуществляется по числу входов, равному числу определяющих факторов модели.

По II варианту, например, разбиение выделов производится либо на четыре возрастные группы — молодняки, средневозрастные, приспевающие и спелые (Исаев и др., 1993; Алексеев, Бердси, 1994), либо на три — молодняки, средневозрастные-приспевающие и спелые-перестойные (Макаревский, 1991). Оценочные же модели для переводных коэффициентов вообще не рассчитываются, а выводятся средние их значения для каждой возрастной группы.

Чтобы оценить различные варианты совмещения с учетом не только структуры оценочных моделей переводных коэффициентов, но и способов сортировки по выделным данным, в алгоритм последней внесены изменения (рис. 42, на вкладке): по I варианту значения площадей выделов S и запасов стволовой древесины V не сортируются, а только суммируются; по II — сортируются по классам возраста A и затем суммируются; по III — сортируются по классам возраста A и бонитета H_{50} и затем суммируются; по IV — сортировка выполняется аналогично схеме, представленной на рис. 40.

Расчет смещений показал, что по фитомассе листы I вариант завышает оценку на 20, 40, 60 и 80 % на площадях, составля-

ющих соответственно 15, 44, 17 и 9% к общей; II — занижает на 20 и 40 % на площадях, составляющих соответственно 16 и 79 % к общей; III — завышает на 20 и 40 % на площадях, составляющих 28 и 42 % к общей (рис. 43, е). Взвешенные усредненные по всей площади (33,4 тыс. га) оценки фитомассы остались такими же, как при первом способе совмещения, т. е. по вариантам I, II и III соответственно 0,7; 0,3 и 0,6 т/га (см. табл. 40).

Таким образом, изменение способа сортировки привело к перераспределению величины смещения по площадям, но итоговая усредненная оценка осталась прежней. Аналогичная ситуация отмечена по остальным двум фракциям фитомассы. Поэтому в случае, если конечной целью является усредненная итоговая оценка фитомассы, можно использовать как первую (см. рис. 40), так и вторую (см. рис. 42) схемы совмещения банка данных ГУЛФ с переводными коэффициентами. Если же, кроме того, представляют интерес величины смещений оценок по тому или иному варианту, дифференцированных в пределах территории, то более корректна вторая схема совмещения, учитывающая не только структуру оценочных моделей, но и порядок сортировки данных ГУЛФ.

Итак, разработаны алгоритм и программа сопоставления существующих методов оценки фитомассы лесных экосистем с предложенным в качестве базового методом оценки на основе структурированного банка данных ГУЛФ. Сопоставление методов показало наличие существенных смещений в оценке запасов различных фракций фитомассы (особенно кроны), обусловленных тем, что в существующих методах оценки либо игнорируются, либо учитываются лишь частично основные массообразующие показатели древостоев. В результате экспериментальные данные переводных коэффициентов получают на пробных площадях с одним набором массообразующих таксационных показателей, а экстраполируют их на лесопокрытые площади, характеризующиеся другим их набором. Расчет смещений в оценке фитомассы, выполненной по переводным коэффициентам, усредненным для каждой из 13 древесных пород Сихотэ-Алиня (первый уровень приближения), не является корректным, поскольку смещения рассчитывались не на лесопокрытых площадях лесхоза или региона, а на тех же пробных площадях, на которых получены экспериментальные значения переводных коэффициентов (Опритова и др., 1982).

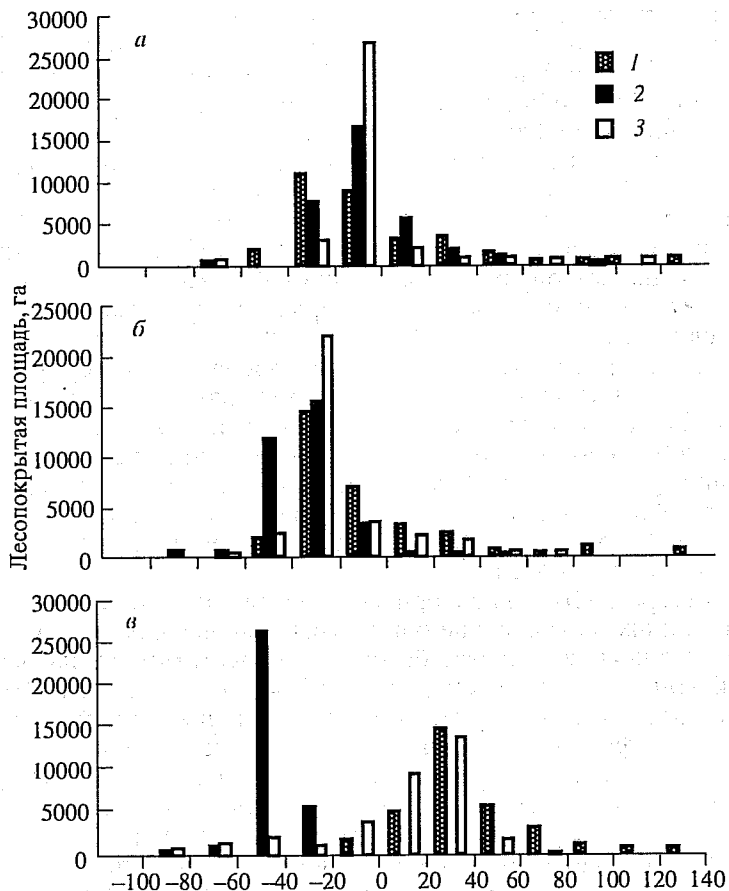


Рис. 43. Распределение лесопокрытой площади березовой хозяйственной секции Невьянского лесхоза по величине систематической ошибки при оценке фитомассы стволов (*а*), ветвей (*б*) и листвы (*в*), получаемой при использовании переводных коэффициентов разных уровней приближения (1, 2 или 3) при схеме сортировки поведельных данных, специфичной для каждого варианта (см. рис. 42)

Таким образом, приведенные цифровые показатели смещений в оценках фитомассы обусловлены некорректными существующими методами расчета переводных коэффициентов и могут иметь место на лесопокрытых площадях не только в пределах лесхоза, но и на территории крупных регионов. Особенно важно исключить систематические ошибки при оценке массы ассимиляционного аппарата, обуславливающего фитопродуктивность ценоза и интенсивность связывания атмосферного углерода.

Описанная процедура является основной для составления картосхемы продуктивности лесопокрытой площади лесхоза на уровне выдела как исходной единицы учета. Если подобная детализация оказывается излишней, то можно на том или ином уровне генерализации выполнить более мелкомасштабное картирование на ландшафтной основе.

4.3. ПРИНЦИПЫ ФОРМИРОВАНИЯ БАНКА ДАННЫХ О ФИТОМАССЕ ЛЕСОВ ШВЕЙЦАРИИ

Структура предложенных регрессионных уравнений вида (149) и (158), характеризуемая набором четырех определяющих факторов, неприемлема для стыковки с банком лесостроительных данных Швейцарии. Согласно национальной системе лесинвентаризации Швейцарии (Schweizerisches Landesforstinventar..., 1988), одновозрастные древостои составляют всего 18 % лесопокрытой площади, и абсолютно преобладают разновозрастные смешанные леса с вертикально сомкнутым пологом. Возраст и класс бонитета в обычном понимании не употребляются. Производительность древостоев определяется их верхней высотой, высотой местоположения над уровнем моря, экспозицией, уклоном местности, влагообеспеченностью местообитания и т. д. В. Келлер (Keller, 1978) упорядочил оценку производительности древостоев, по сути повторив подход Б. П. Колесникова с соавторами (1973) при лесотипологическом районировании Урала, без ссылки на уральских исследователей. Он разработал специальную бонитетную шкалу на основе 12 типовых местообитаний, при этом каждое характеризуется специфическим сочетанием экспозиции, уклона местности и других показателей, а также специфической зависимостью верхней высоты древостоя и

Таблица 41

Данные В. Келлера (Keller, 1978) о верхней высоте слыхов древостоев, ранжированные по эдафическим условиям при высоте над уровнем моря 1000 м

Код местообитания	№ таблицы (Keller, 1978)	Верхняя высота, м
1	20	8
2	26	13
3	17, 24, 25	15, 14, 16
4	19, 22, 23	17, 18, 18
5	15, 21	21, 21
6	16, 18	23, 23

общей производительности от высоты над уровнем моря. Характеристика каждого местообитания дана для пяти лесообразующих пород (ели, пихты, бука, лиственницы и сосны) в табличной и графической форме.

Для удобства пользования классификацией В. Келлера дискретный набор местообитаний заменен одним непрерывным рядом с использованием метода ранжирования местообитаний фиктивными переменными (Дрейпер, Смит, 1973). Каждому местообитанию или совокупности нескольких близких по производительности местообитаний присвоен номер (код) в порядке повышения производительности при базовом значении высоты над уровнем моря, равном 1000 м (табл. 41).

Затем дискретная совокупность зависимостей верхней высоты от высоты над уровнем моря (Keller, 1978) обобщена одной двухфакторной зависимостью (рис. 44):

$$H_{dom} = f(E, C), \quad (201)$$

где H_{dom} — верхняя высота древостоя (м), определенная как средняя высота 100 доминирующих деревьев на 1 га; E — высота местообитания над уровнем моря, м; C — кодовый номер местообитания (см. табл. 41).

Для формирования банка данных о фитомассе лесов Швейцарии используется банк экспериментальных данных Г. Бургера, опубликованный в серии из 13 работ по биологической продуктивности основных лесообразующих пород в течение 1920—1950 гг. (Bugger, 1929—1953). Для расчета переводных коэффициентов использованы данные объемов модельных деревьев, взятые из архивов Швейцарского Федерального Института леса,

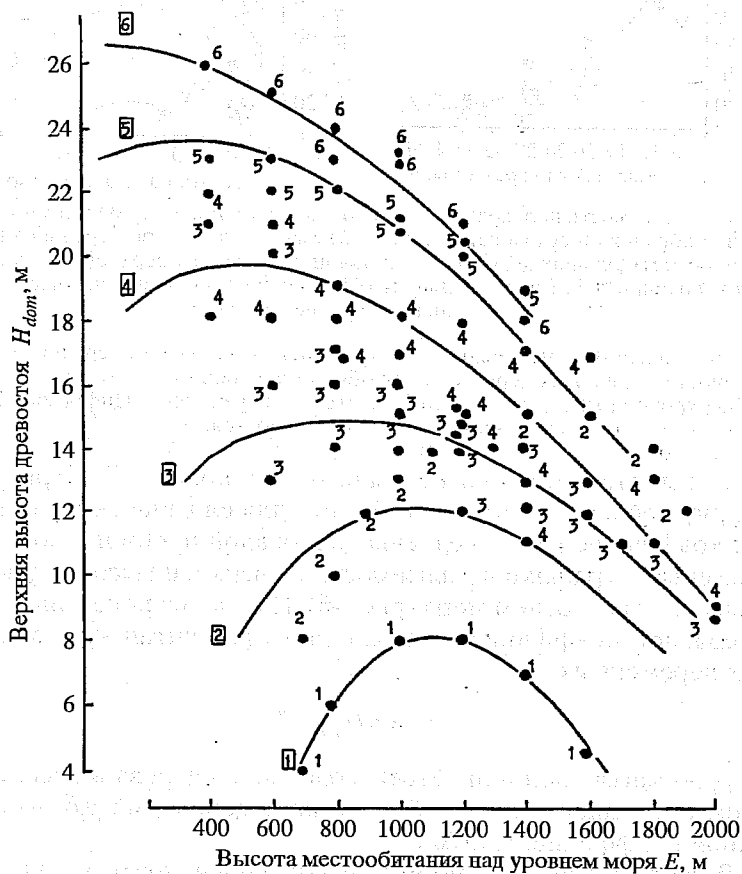


Рис. 44. Зависимость верхней высоты древостоя от высоты местообитания над уровнем моря. Цифрами обозначены коды шести укрупненных типов лесорастительных условий, полученных в результате группировки 12 типовых местообитаний, выделенных В. Келлером (Keller, 1978)



Рис. 45. Зависимость переводного коэффициента (отношение массы хвои дерева ели в абсолютно сухом состоянии к объему ствола в коре), среднего по совокупности модельных деревьев на пробной площади, от верхней высоты древостоя, по данным Г. Бургера (Burger, 1953). Цифрами обозначена высота местообитания над уровнем моря, м.

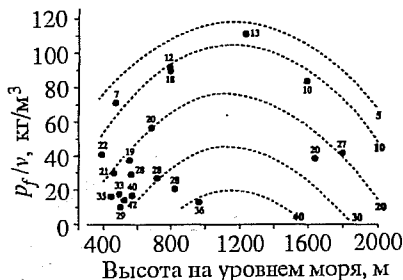


Рис. 46. Зависимость переводного коэффициента массы хвои, среднего по совокупности модельных деревьев на пробной площади, от высоты местообитания над уровнем моря, по данным Г. Бургера (Burger, 1953). Цифрами обозначена верхняя высота древостоя, м.

снега и ландшафта (они не были опубликованы Г. Бургером). Для лучшей наглядности полученные для ели значения переводных коэффициентов усреднены для каждой пробной площади и нанесены на графики в зависимости от верхней высоты (рис. 45) и высоты над уровнем моря (рис. 46). Их анализ показывает, что переводной коэффициент может быть рассчитан как функция двух переменных

$$p_i/v = f(H_{dom}, E), \quad (202)$$

где p_i — масса хвои или ветвей модельного дерева в абсолютно сухом состоянии, кг; v — объем ствола дерева, m^3 ; p_i/v — переводной коэффициент, kg/m^3 .

Для стыковки экспериментальных данных фитомассы с банком лесоустроительных данных рассчитываются уравнения на уровне совокупности модельных деревьев (а не одного — среднего для пробной площади), т. е. в уравнение (202) дополнительно вводится диаметр ствола на высоте груди (d , см), характеризующий ценотическое положение дерева

$$p_i/v = f(H_{dom}, E, d). \quad (203)$$

Характеристика уравнений (204)

ρ/ν , кг/м ³	Константы уравнения							R^2	SE
	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6		
Для ветвей	21,100	-11,700	1,442	1,598	-1,890	—	-2,558	—	
Для хвои	17,708	—	1,417	-1,378	-1,080	-0,822	—	0,843	

ρ/ν , кг/м ³	Константы уравнения						R^2	SE
	a_8	a_9	a_{10}	a_{11}	a_{12}	a_{13}		
Для ветвей	—	1,846	0,726	-1,246	-0,787	2,570	0,909	0,239
Для хвои	-27,404	4,872	0,208	-3,099	-1,819	10,798	0,866	0,291

Уравнения (201) и (202) образуют рекурсивную систему, в которой верхняя высота — в первом случае зависимая переменная, во втором — независимая. Наличие рядов распределения деревьев по ступеням толщины для каждой пробной площади (лесоустройство Швейцарии имеет в наличии около 1,5 тыс. пробных площадей) дает возможность с помощью уравнений (201) и (203) сформировать банк данных о фитомассе еловых лесов Швейцарии.

Для случаев, когда есть возможность измерения не только диаметра d , но и возраста дерева A , а также — объема ствола ν (например по объемной таблице или соответствующему уравнению), по данным 100 модельных деревьев Г. Бургера рассчитан уточненный вариант уравнения (203), куда дополнительно введены названные два определяющих фактора (Usoltsev, Hoffmann, 1997b):

$$\ln(\rho/\nu) = a_0 + a_1 \ln A + a_2 (\ln A)^2 + a_3 (\ln A)(\ln H_{dom}) + a_4 (\ln A)(\ln d) + a_5 (\ln A)(\ln E) + a_6 (\ln H_{dom})(\ln d) + a_7 (\ln H_{dom})(\ln E) + a_8 \ln d + a_9 (\ln d)(\ln E) + a_{10} (\ln d)(\ln \nu) + a_{11} \ln E + a_{12} (\ln E)(\ln \nu) + a_{13} \ln \nu. \quad (204)$$

Все константы значимы на уровне t_{05} и выше. Характеристика (204) дана в табл. 42. Соотношение между фактическими значениями переводных коэффициентов и расчетными по модели (204) показывает достаточно хорошую степень подгонки (рис. 47).

Предложенный подход к формированию банка данных о фитомассе лесов Средней Европы (на примере Швейцарии) нужда-

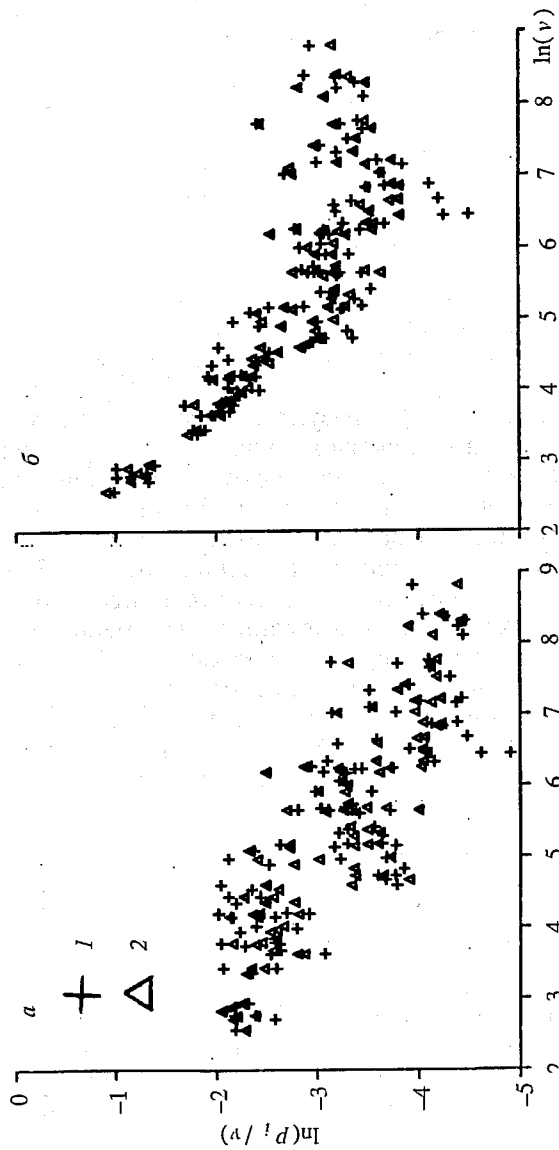


Рис. 47. Зависимость фактических (1) и расчетных (2) по уравнению (204) значений переводного коэффициента (кг/дм^3) массы хвой (а) и ветвей (б) от объема ствола v (дм^3) (Usoltsev, Hofmann, 1997b)

Электронный архив УГЛТУ

ется в дальнейшей доработке. Прежде всего необходимо рассчитать уравнения для переводных коэффициентов фитомассы остальных лесообразующих пород Швейцарии, используя данные Г. Бургера и других исследователей биопродуктивности лесов Средней Европы. Затем можно осуществить стыковку полученных уравнений с лесостроительными данными на примере лесов одного из кантонов.

* * *

Для осуществления мониторинга лесов на национальном и глобальном уровнях и разработки различных экологических программ необходима в качестве исходной основы база данных о фитомассе лесов. Технологія лесостроительных работ ориентирована сегодня на оценку лишь запасов стволовой древесины, однако при формировании баз данных о фитомассе могут быть использованы банки данных ГУЛФ.

Разработаны методы и средства для проведения автоматической сортировки повидельного банка лесостроительной информации. Созданное математическое обеспечение ЭВМ достаточно универсально и может быть использовано в дальнейшем при проведении подобного рода исследований в других регионах. Наиболее трудоемкая часть подготовки данных полностью выполняется на ЭВМ с высокой скоростью и надежностью.

ГЛАВА 5

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРЕДЕЛЬНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ФИТОМАССЫ ДРЕВОСТОЕВ

5.1. ОБЩИЕ ПОНЯТИЯ

Как уже отмечалось в разделе 2.5.6, учитывая чрезвычайно большой разброс глобальных оценок фитомассы лесов, для получения более или менее реальных значений возможного стока углерода необходимо иметь придержки о предельно возможной биопродуктивности лесных экосистем в разных регионах. Известно, что предельные показатели биопродуктивности лесного покрова, в том числе показатели массы и поверхности листвы, связаны с уровнем ФАР, водным балансом территории, температурой и влажностью воздуха и почвы, степенью континентальности климата (Paterson, 1956; Weck, 1960; Lieth, 1962; Brunig, 1967; Waring et al., 1978; Gholz, 1982; Jarvis, Leverenz, 1983; Blanke et al., 1991) и, следовательно, имеют региональные (зональные) особенности. Очевидно, что продуктивность лесных экосистем в пределах подзоны определяется не только условиями увлажнения, а всем комплексом лесорастительных условий, опосредуемых густотой, добротностью местопроизрастания, возрастом и т. д. Поэтому траектории верхних пределов продуктивности фитомассы внутри региона (подзоны) могут быть описаны совокупностью названных массоопределяющих показателей древостоев.

Известно, что на каждом этапе онтоценогенеза древостоя имеется определенный биологический предел густоты, выше которого древостой как лесной биоценоз существовать уже не может (Лосицкий, Чуенков, 1980). Однако данных о верхних пределах продуктивности фитомассы древесных пород крайне мало и они не согласуются между собой. Например, согласно ТХР фитомассы естественных максимально сомкнутых насаждений тополя осинообразного (*Populus tremuloides*), составленным для

двух провинций Канады, надземная фитомасса для возрастов 3, 4 и 5 лет составила соответственно 8,2; 9,3 и 11,0 т/га (Bella, Franceschi, 1980), а специальным исследованием верхних пределов надземной фитомассы аналогичных насаждений в тех же условиях и для тех же возрастов установлены существенно большие значения — соответственно 11,3; 12,5 и 29,6 т/га (Peterson et al., 1982). Обычно при оценке верхних пределов продуктивности фитомассы насаждений не уточняется, являются ли названные показатели таковыми для данного возраста при соответствующей (оптимальной) густоте или для данной (предельной) густоты при соответствующем возрасте. Как будет показано ниже, это далеко не одно и то же.

13 лет назад В. В. Кузьмичевым (1985) сделан вывод о наличии в структурно-функциональной организации лесных экосистем трех типов колоколообразных кривых, описывающих изменение наличного запаса древостоев в связи: а) с густотой (при одинаковом возрасте и условиях местопроизрастания), б) с возрастом (в одних и тех же условиях местообитания) и в) с условиями местообитания (при одинаковом возрасте).

Кривые первого типа — результат комбинации двух противоположных трендов: увеличения числа стволов с ростом плотности ценоза в статике (т. е. при постоянстве возраста) и соответствующего уменьшения объема (массы) среднего дерева в ценозах возрастающей густоты.

Кривые второго типа образуются также сочетанием двух противоположных монотонных трендов: возрастного увеличения объема (массы) среднего дерева древостоя и соответствующего снижения числа стволов вследствие его самоизреживания.

Кривые третьего типа формируются такими же двумя трендами: возрастающей монотонной кривой объема (массы) среднего дерева с улучшением условий роста в статике и соответственно убывающей (или выпуклой) кривой изменения числа стволов.

Сочетание первых двух типов названных кривых дает в итоге колоколообразную поверхность, показанную Х. О. Томазиусом (Thomasius, 1978) при моделировании объемного прироста чистого одновозрастного древостоя (рис. 48). Разрабатываемый в настоящей главе подход к моделированию предельных показателей фитомассы древостоев имеет в своей основе первые два типа кривых, или первые два аспекта упомянутой концепции. Необходим краткий экскурс в их предысторию.

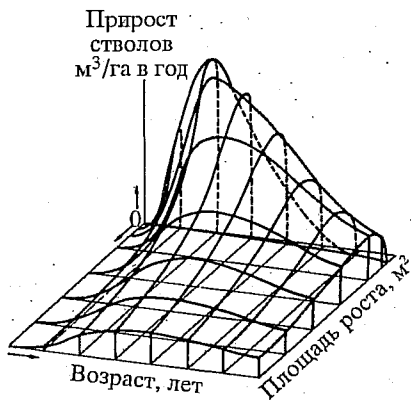


Рис. 48. Зависимость прироста запаса стволов одновозрастного чистого древостоя от возраста и средней площади роста деревьев (Thomasius, 1978)

Около 40 лет назад японскими учеными при исследовании одного из кардинальных вопросов экологии растительных сообществ — связи продуктивности с густотой ценоза — были выведены две основополагающие альтернативные зависимости: “прави-

ло 3/2” (Tadaki, Shidei, 1959; Yoda et al., 1963), описывающее максимальную массу дерева как функцию густоты (прямая самоизреживания в логарифмических координатах с угловым коэффициентом, равным $-3/2$), и уравнение обратной дроби (Kiga, Shinozaki, 1956), описывающее массу среднего дерева в статическом густотном эксперименте как функцию густоты. Обе зависимости получили многократное эмпирическое подтверждение (рис. 49) и интерпретировались как законы самоизреживания.

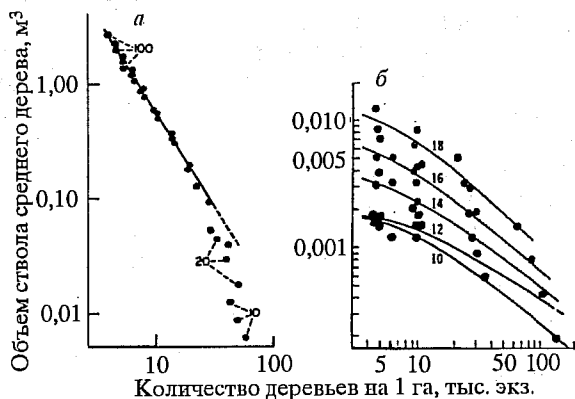
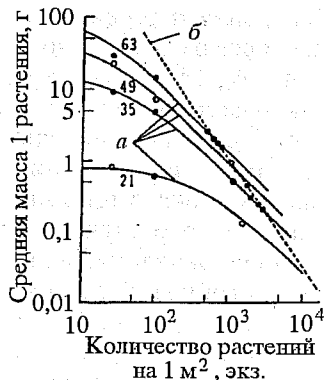


Рис. 49. Альтернативные зависимости объема ствола среднего дерева от густоты древостоя.

a — согласно правилу 3/2 для сосны Веймутовой (White, 1981), *b* — согласно уравнению обратной дроби для сосны густоцетной (Ando, 1968). Цифрами обозначен возраст древостоев, лет

Рис. 50. Соотношение:

семейства кривых зависимости средней массы растения гречишки (*Fagopyrum sagittatum*) в абсолютно сухом состоянии от числа растений на 1 м² (сплошные линии, описываемые уравнениями обратной дроби) (а) и линии самоизреживания как огибающей семейства кривых (пунктирная линия, описывающая правило 3/2) (б). Цифрами обозначено число дней после посева при начальных густотах в диапазоне от 30 до 50 000 растений на 1 м² (Drew, Flewelling, 1977)



Какое-то время они изучались независимо друг от друга, находясь в явном концептуальном противоречии (Кофман, 1986), пока не было показано, что первая (правило 3/2) является предельным случаем (огibaющей кривой) семейства альтернативных кривых густотного статического эксперимента, описываемых уравнениями обратной дроби (Drew, Flewelling, 1977) (рис. 50).

Позднее П. Уэстом (West, 1985) названные две концепции были совмещены аналогичным образом, однако выражены в терминах фитомассы древостоев на единице площади, а не мас-

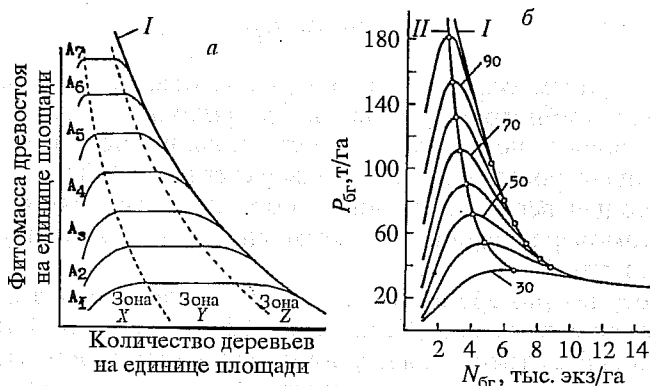


Рис. 51. Соотношение семейства кривых статической зависимости фитомассы древостоя от густоты для возрастов $A_1 \dots A_7$ и линии самоизреживания I как огибающей семейства кривых.

a — принципиальная схема с выделением зон неполного использования площади роста (X), полного ее использования (Y) и самоизреживания (Z) (West, 1985); b — зависимость фитомассы стволов биогруппы сосны Казахского мелкосопочника от числа деревьев на единице площади биогруппы; II — линия оптимальной густоты (Усольцев, 1985а). Цифрами обозначен возраст древостоев, лет

сы среднего дерева (рис. 51, а). При этом каждая густотная кривая и все их семейство в пределах некоторого возрастного диапазона $A_1 \dots A_7$ характеризовались тремя специфическими зонами — неполного использования площади роста (восходящий участок X), полного ее использования (горизонтальный участок Y) и самоизреживания (нисходящий участок Z), разделенные на рис. 51, а пунктирными линиями. Правые концы густотных кривых и в этом случае образовали огибающую кривую — линию самоизреживания, выше которой насаждения не могут находиться в устойчивом состоянии.

Концепция П. Уэста не подтверждена экспериментальными данными и не доведена до уровня аналитического описания. Это выполнено для массы стволовой древесины, отнесенной к единице площади биогрупп (территориально сближенных совокупностей деревьев как минимodelей древостоев различной густоты), в сосняках Казахского мелкосопочника (см. рис. 51, б) и в березняках семенного и порослевого происхождения Северного Казахстана (Усольцев, 1985а, в). Поскольку при аналитическом описании семейства густотных кривых двухфакторной моделью

$$P_{\text{бр}} = f(A, N_{\text{бр}}), \quad (205)$$

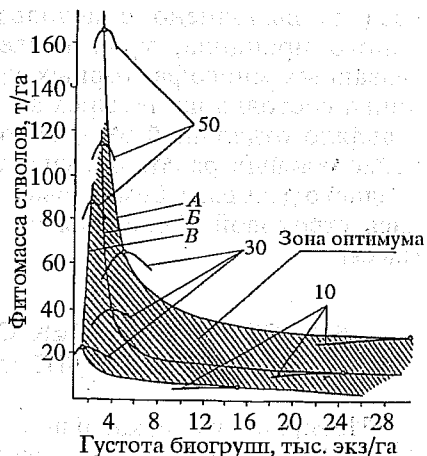
где $P_{\text{бр}}$ — фитомасса стволов биогруппы, т/га; A — возраст, лет; $N_{\text{бр}}$ — густота биогруппы, тыс. экз/га, наличие горизонтального участка (зона Y) не очевидно, вместо зоны полного использования площади роста выделена кривая оптимальной густоты (II), соединяющая вершины колоколообразных густотных кривых. Линия самоизреживания при этом определена как линия предельной густоты (I).

Далее, на примере биогрупп березовых древостоев Северного Казахстана показано (Усольцев, 1985а, 1988а), что фитомасса биогруппы $P_{\text{бр}}$, отнесенная к единице ее площади, является функцией не только возраста A и густоты $N_{\text{бр}}$, но и диаметра среднего дерева биогруппы $D_{\text{бр}}$, см:

$$P_{\text{бр}} = f(A, N_{\text{бр}}, D_{\text{бр}}). \quad (206)$$

Поскольку при фиксированных возрасте и густоте биогрупп

Рис. 52. Зависимость фитомассы стволов от густоты биогрупп березняка семенного происхождения I класса бонитета различного возраста (обозначен цифрами); А, Б и В — линии оптимальной густоты соответственно при максимальном, среднем и минимальном диаметрах среднего дерева в биогруппах (Усольцев, 1988а)



диаметр среднего ствола варьирует в широких диапазонах, выделены минимальный, средний и максимальный диаметры среднего дерева (соответственно $D_{бр}^{min}$, $D_{бр}^m$ и $D_{бр}^{max}$) и каждый аппроксимирован по фактическим значениям возраста и густоты. Полученная в итоге рекурсивная система уравнений

$$I. \begin{cases} D_{бр}^{min} = f(A, N_{бр}) \\ D_{бр}^m = f(A, N_{бр}) \\ D_{бр}^{max} = f(A, N_{бр}) \end{cases} \quad (207)$$

↓

$$II. P_{бр} = f(A, N_{бр}, D_{бр})$$

и результаты ее табулирования в последовательности, показанной стрелкой, дали возможность установить не линию (см. рис. 51, б), а полосу оптимума (рис. 52), которая соответствует зоне полного использования площади роста (Y) на рис. 51, а.

На заключительном этапе моделирования продуктивности березняков по исходным данным составляющих их биогрупп предложен выход на оценку предельных запасов фитомассы древостоев с использованием рекурсивной системы (157) (см. раздел 2.5.6), корректировочного коэффициента K для пересчета запасов стволов с уровня биогруппы на уровень древостоя и модели переводного коэффициента фитомассы (158).

Исследование региональных (зональных) закономерностей изменения предельных показателей фитомассы в настоящем

разделе выполнено с использованием рекурсивно-регрессионного принципа, т. е. последовательной цепочки взаимосвязанных многофакторных уравнений. В данном случае цепочка состояла из четырех звеньев, каждое из которых представляло отдельный этап статистико-регрессионного анализа региональных различий: сначала верхних пределов диаметра среднего дерева, затем — высоты среднего дерева, далее — запаса стволовой древесины и, наконец, — показателей фитомассы.

5.2. ГУСТОТНЫЕ ТРАЕКТОРИИ ВЕРХНИХ ПРЕДЕЛОВ ДИАМЕТРА СРЕДНЕГО ДЕРЕВА ДРЕВОСТОЯ

На первом этапе, как и при моделировании предельных показателей фитомассы березы на уровне биогрупп (см. уравнение (154) в разделе 2.5.6), вначале рассчитаны траектории изменения диаметра среднего дерева (D_{\max} , см), максимального для каждой градации густоты. Для получения исходных данных к расчету таких траекторий все значения D каждой породы распределены в двухходовые (по возрасту и густоте) матрицы, из каждой ячейки которых отобраны максимальные значения D_{\max} .

При отборе возникает проблема оптимизации объема выборки. С этой проблемой в лесной таксации столкнулись при бонитировании насаждений по верхней высоте: по мере увеличения количества деревьев высших рангов, отбираемых для оценки верхней высоты насаждения, снижается репрезентативная ошибка определения, но одновременно возрастает систематическая ошибка, т. е. занижается действительная верхняя высота. Аналогичная проблема возникает при расчете среднепериодического прироста деревьев и древостоев: среднепериодический прирост всегда отличается от действительного годовичного на величину, которая зависит от крутизны возрастного тренда и величины периода осреднения (Любич, 1963; Усольцев, 1979; Антанайтис, Загреев, 1981).

Традиционная биологическая статистика, оперирующая двумя основными понятиями — средней величиной и дисперсией, в таких случаях не может предложить ничего, кроме априорного принятия некоторого уровня доверительного интервала. Более перспективна в таких задачах методика, определяе-

мая альтернативной статистикой — статистикой экстремальных значений (Gaines, Deppy, 1993). При этом вероятностная структура экстремальных значений опосредуется некоторым обобщенным распределением. Оно описывается тремя параметрами, которые оцениваются методом максимального правдоподобия. Видимо, для определения оптимального объема выборки максимальных значений массоопределяющих показателей в упомянутой задаче необходима разработка соответствующей методики на основе статистики экстремальных значений, что требует проведения специального исследования.

В нашем случае отбирались 2-6 максимальных значений D_{\max} в древостоях разной густоты, но одного возраста. Их графический анализ показывает (рис. 53), что зависимость $\ln D_{\max} = f(\ln N)$ отклоняется от правила $3/2$, являясь специфической для каждой возрастной группы, и описывается уравнением скорее параболы, нежели прямой линии. Поскольку общий возрастной тренд также отклоняется от прямой, в аппроксимирующее уравнение общего вида $\ln D_{\max} = f(\ln A, \ln N)$ включены переменные второго порядка не только для $(\ln N)$, но и для $(\ln A)$:

$$\begin{aligned} \ln D_{\max} = & a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2 + a_3 X_3 + a_4 X_4 + a_5 X_5 + a_6 \ln A + \\ & + a_7 (\ln A)^2 + a_8 \ln N + a_9 (\ln N)^2 + a_{10} \ln A \ln N + \\ & + a_{11} (\ln N)^2 \ln A + a_{12} (\ln A)^2 \ln N, \end{aligned} \quad (208)$$

где A — возраст насаждений, лет; N — число деревьев, тыс. экз/га. Для ели и пихты уравнения (208) специфицированы по шести регионам путем кодирования блоковыми фиктивными переменными (см. табл. 27). Характеристика уравнений (208) приведена в табл. 43. Графический анализ уравнений (208) после их табулирования по задаваемым значениям A и N (а для елово-пихтовых древостоев также по $X_1 \dots X_5$) показывает, что каждый класс возраста A характеризуется в логарифмических координатах специфичной параболической кривой, их правые ветви пересекаются и точки пересечения при $\Delta A \rightarrow 0$ образуют огибающую кривую, которая является предельной для задаваемых густот N по условию самоизреживания. Положение предельной огибающей $D_{\max} \sim N$ относительно всей совокупности экспериментальных данных D (разделенных для елово-пихтовых древостоев по подзонам),

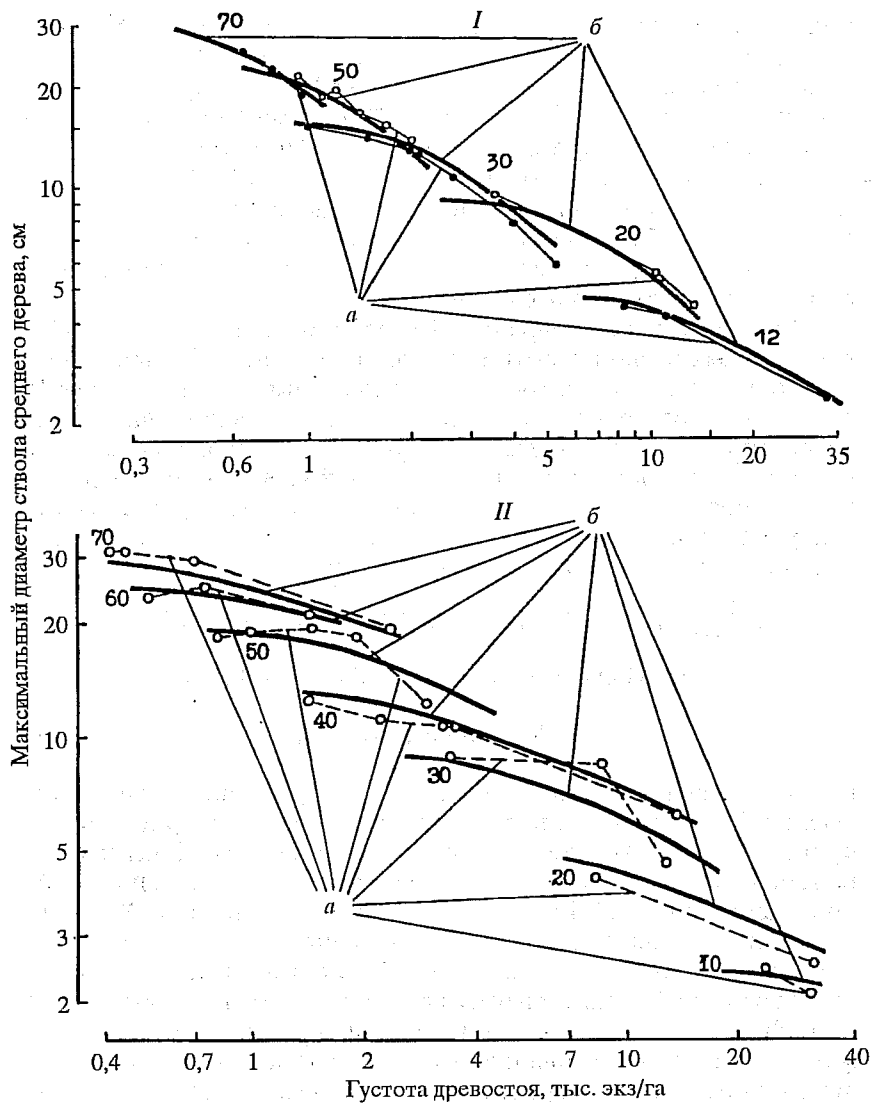


Рис. 53. Сопоставление фактических (*a*) и расчетных (*б*) значений D_{\max} , полученных по уравнению (208) для березовых (*I*) и осиновых (*II*) древостоев. Очевидно, что для каждого возраста зависимость $\ln D_{\max} \sim \ln N$ имеет скорее параболическую, чем прямолинейную зависимость. Цифрами обозначен возраст древостоев, лет

Характеристика уравнений (208)

Древесная порода	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6
Сосна	-8,4294	—	—	—	—	—	<u>5,3521</u> 7,6
Береза	-13,894	—	—	—	—	—	<u>8,4910</u> 10,9
Осина	-5,8809	—	—	—	—	—	<u>4,0171</u> 7,1
Ель и пихта	-3,6292	<u>0,1513</u> 3,0	<u>0,2870</u> 5,5	<u>0,2244</u> 3,8	<u>-0,2163</u> 2,2	<u>-0,2047</u> 3,5	<u>2,7394</u> 8,1

Древесная порода	a_7	a_8	a_9	a_{10}	a_{11}	a_{12}	R^2	SE
Сосна	-0,6174	1,4414	-0,1366	-0,3926	—	—	0,966	0,099
	6,7	6,4	9,0	7,3	—	—		
Береза	-1,0680	3,4890	-0,2570	-1,0140	—	—	0,990	0,083
	9,9	11,8	13,1	12,7	—	—		
Осина	-0,4392	1,5616	-0,1396	-0,4676	—	—	0,951	0,173
	6,3	4,9	6,1	5,4	—	—		
Ель и пихта	-0,2692	—	—	—	-0,0191	-0,0182	0,974	0,136
	5,9	—	—	—	10,6	10,3		

Примечание. В числителе — константа, в знаменателе — ее значимость t .

показано на рис. 54, a и 55, a , на вкладке. Относительная иерархия предельных траекторий по подзонам (рис. 56, a) находится в соответствии с упомянутым выше профилем продуктивности. В подзоне средней и южной тайги предельная огибающая для пихты сибирской (группа ПА) ниже, чем для ели той же подзоны (ПР), она совпадает с кривой для ели подзоны северной тайги (ПР).

5.3. ГУСТОТНЫЕ ТРАЕКТОРИИ ВЕРХНИХ ПРЕДЕЛОВ ВЫСОТЫ СРЕДНЕГО ДЕРЕВА ДРЕВОСТОЯ

Максимальная высота среднего дерева древостоя (H_{\max} , м) изменяется не только в связи с возрастом и густотой, но также в связи с диаметром среднего дерева. Поэтому на втором этапе

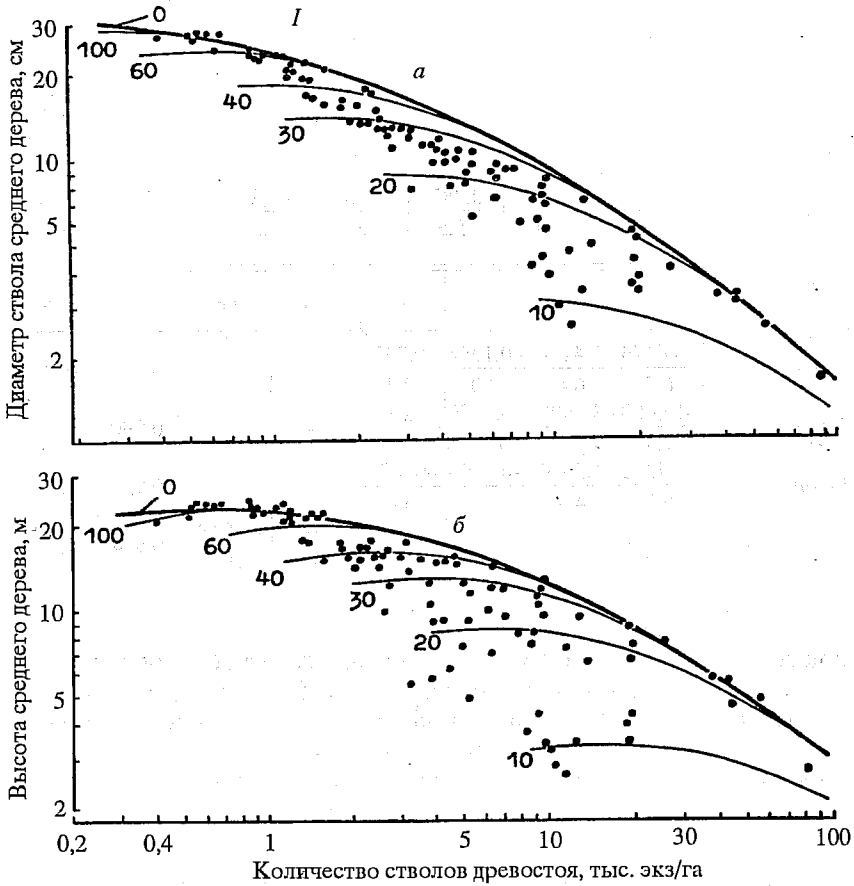


Рис. 54 (начало)

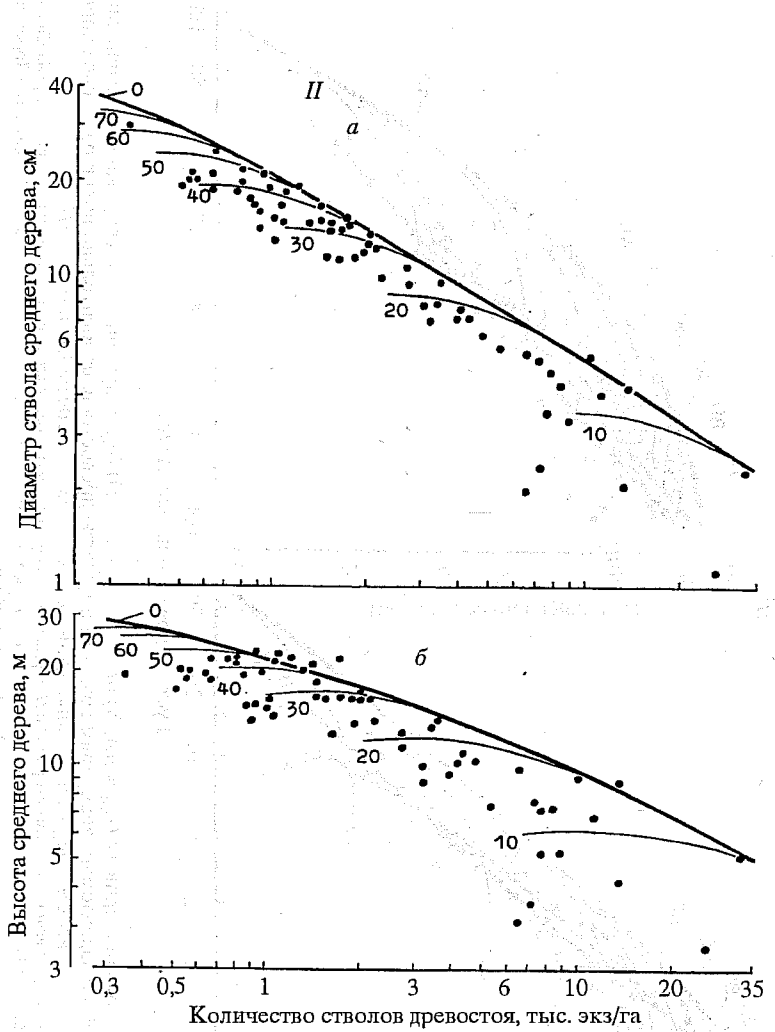


Рис. 54 (продолжение)

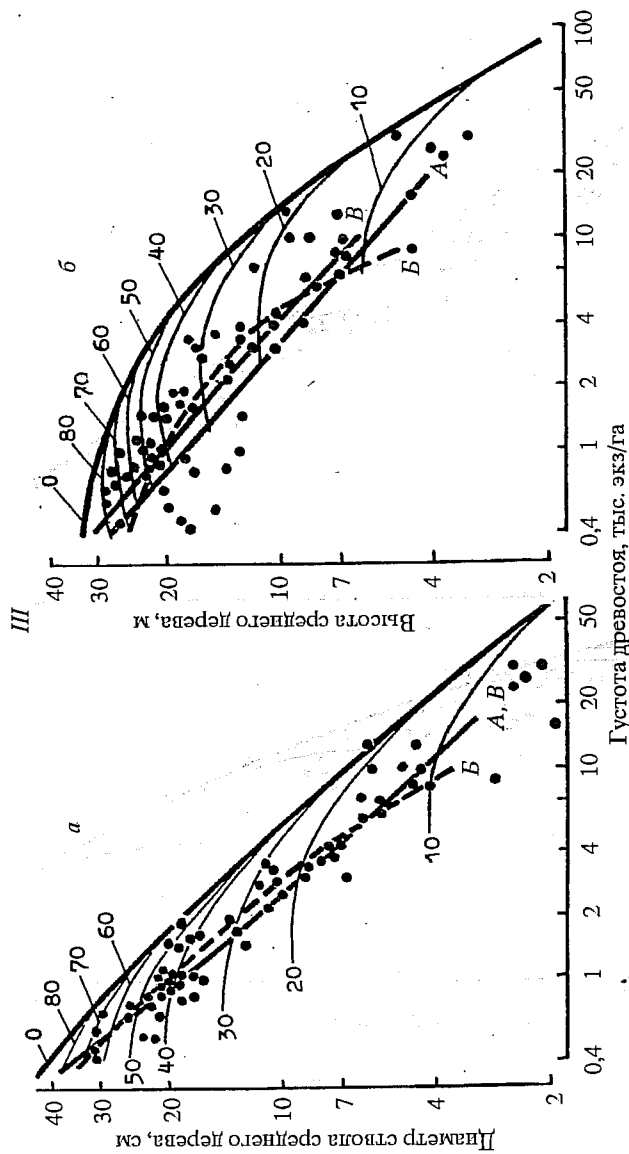
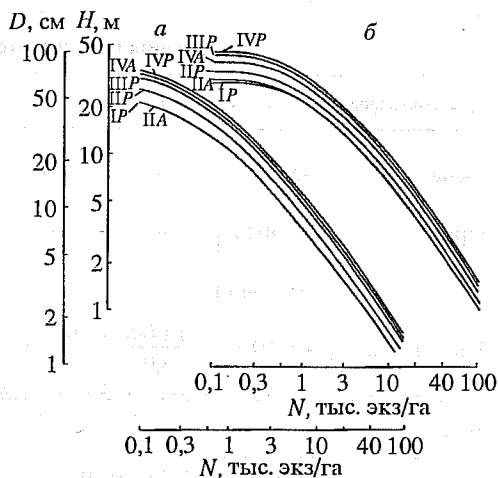


Рис. 54. Положение кривых $D_{\max} = f(A, N)$ и $H_{\max} = f(A, N, D)$, полученных табулированием уравнений (208) и (209) по задаваемым значениям возраста и густоты древостоев, относительно полей распределения всех экспериментальных данных для сосны (A), березы (H) и осины (III).
 O — линии самозароживания, A — траектории D и H нормальных основных древостоев, взятые из ТХР осинников горного Урала (Лесо-таксационный..., 1991), B — то же, Северного Казахстана (Усолицев, 1988a), B — то же, из всеобщей ТХР В. С. Черныяского (Нормативы..., 1993). Цифрами обозначен возраст древостоев, лет

Рис. 56. Относительное положение линий самоизреживания по диаметру (а) и высоте (б) еловых и пихтовых древостоев по подзонам (обозначения в тексте)



анализа для полученных исходных данных к расчету траекторий максимальных значений H_{\max} по аналогии с процедурой вывода уравнения (155) все экспериментальные данные для каждой породы, а для ели и пихты сгруппированные по регионам, распределены в трехходовые (по A , N и D) матрицы и из каждой их ячейки отобраны максимальные значения H_{\max} . Последние аппроксимированы зависимостью (табл. 44):

$$\ln H_{\max} = a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2 + a_3 \ln A + a_4 (\ln A)^2 + a_5 \ln N + a_6 (\ln N)^2 + a_7 \ln A \ln N + a_8 \ln D + a_9 \ln A \ln D + a_{10} \ln N \ln D. \quad (209)$$

Если по густотным трендам уравнений (208) выявлены достоверные различия D_{\max} елово-пихтовых древостоев по зональному градиенту, то по густотным траекториям средних высот H_{\max} (209) между некоторыми подзонами (в частности — между IP , $ПР$, $ПА$ и IVA) достоверных различий нет. Соответственно константы при X_3 , X_4 и X_5 статистически не значимы и в модель (209) не включены. Упомянутые четыре подзоны достоверно отличаются только от подзон широколиственно-хвойных ($ШП$) и широколиственных (IVP) лесов. Это имеет место при условии равенства значений D . Поскольку последняя величина входит в (209) в качестве независимой переменной, то при последовательном использовании уравнений (208) и (209) все различия между регионами по показателю D_{\max} неизбежно определяют и различия между этими регионами по показателю H_{\max} , даже если в (209) между некоторыми регионами различий нет. Иными слова-

Таблица 44

Характеристика уравнений (209)

Древесная порода	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
Сосна	-5,6927	—	—	3,2125	-0,3422	1,0860
				3,3	2,9	3,7
Береза	-0,9020	—	—	1,5470	-0,2880	—
				2,7	3,4	—
Осина	-0,00983	—	—	0,3142	—	0,2234
				6,1	—	5,4
Ель и пихта	-5,7581	0,1448	0,1111	3,2418	-0,3808	1,0904
		4,0	2,9	7,0	7,0	5,3

Древесная порода	a_6	a_7	a_8	a_9	a_{10}	R^2	SE
Сосна	-0,0873	-0,2255	0,3998	—	—	0,963	0,101
	3,5	2,9	2,6	0,2000	0,0350		
Береза	—	—	—	5,3	2,1	0,959	0,109
	-0,04787	—	0,6096	—	—		
Осина	8,5	—	7,2	—	—	0,951	0,126
	-0,0879	-0,2664	0,6245	—	—		
Ель и пихта	7,4	5,5	8,7	—	—	0,985	0,098

Примечание. В числителе — константа, в знаменателе — ее значимость t .

ми, в результате последовательного табулирования рекурсивной системы уравнений $D_{\max} = f(A, N)$ (208) $\rightarrow H_{\max} = f(A, N, D)$ (209) различия между регионами по показателям H_{\max} накладываются на различия по показателям D_{\max} по регионам и полученная в итоге иерархия результирующих кривых для H_{\max} показана на рис. 56, б. При этом, если знаки при фиктивных переменных в (208) и (209) совпадают, то совокупные различия между регионами по показателям D_{\max} и H_{\max} возрастают, если же знаки противоположные, то различия могут или скомпенсироваться, или сменить знак. Графическая интерпретация системы рекурсивных уравнений (208) и (209) и положение лимитирующих кривых относительно экспериментальных данных для сосны, березы и осины показаны на рис. 54, б, а для ели и пихты — на рис. 55, б(на вкладке).

5.4. ГУСТОТНЫЕ ТРАЕКТОРИИ ВЕРХНИХ ПРЕДЕЛОВ ЗАПАСА СТВОЛОВОЙ ДРЕВЕСИНЫ

На третьем этапе на основе содержательного анализа экспериментальных данных запасов стволов V ($\text{м}^3/\text{га}$) по всем совокупностям пробных площадей для каждой породы подобрана структура уравнений

$$\begin{aligned} \ln V = & a_0 + a_1 X_2 + a_2 X_3 + a_3 X_5 + a_4 \ln A + a_5 (\ln A)^2 + a_6 \ln N + \\ & + a_7 \ln H + a_8 H + a_9 \ln D + a_{10} \ln A \ln N + a_{11} \ln A \ln D + \\ & + a_{12} \ln A \ln H + a_{13} \ln D \ln N + a_{14} H \ln A + a_{15} H (\ln A)^2 + \\ & + a_{16} H \ln D + a_{17} H \ln N. \end{aligned} \quad (210)$$

Запас V определяется теми же четырьмя массообразующими показателями, что и запас $V_{\text{ог}}$ в (156). Расчет уравнений (210) (табл. 45) показал, что по запасам стволовой древесины елово-пихтовых древостоев при условии равенства всех массообразующих показателей между подзонами таежных и широколиственно-хвойных лесов (IP, ПП, ППР) достоверного различия нет, но есть существенные различия между последними, с одной стороны, и подзоной широколиственных лесов (IVP и IVA) — с другой. В пределах подзоны средней и южной тайги есть достоверные различия между ельниками (ПР) и пихтарниками (ПА).

В результате последовательного табулирования рекурсивной системы уравнений $D_{\text{max}} = f(A, N)$ (208) $\rightarrow H_{\text{max}} = f(A, N, D)$ (209) $\rightarrow V = f(A, N, D, H)$ (210) упомянутые различия наложились на различия D_{max} и H_{max} по регионам (см. рис. 56, а, б), соответствующая иерархия результирующих кривых запаса стволов V показана на рис. 57, а. Эти результирующие кривые, или линии самоизреживания, представляют собой геометрическое место точек пересечения правых ветвей густотных кривых для запасов стволовой древесины V по классам возраста, положение которых относительно экспериментальных данных V показано для сосны, березы и осины на рис. 58, а, 59, а и 60, а, а для ели и пихты по регионам — на рис. 61, а.

Таблица 45

Характеристика уравнений (210)

Древесная порода	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
Сосна	-4,3428	—	—	—	$\frac{2,3401}{6,4}$	$\frac{-0,3601}{5,0}$
Береза	1,1490	—	—	—	$\frac{-1,823}{3,5}$	—
Осина	0,7036	—	—	—	—	—
Ель и пихта	-0,3740	$\frac{0,1816}{5,1}$	$\frac{0,4105}{5,2}$	$\frac{0,1333}{3,3}$	—	—

Древесная порода	a_6	a_7	a_8	a_9	a_{10}	a_{11}	a_{12}
Сосна	$\frac{0,7567}{13,9}$	—	$\frac{1,0163}{7,5}$	—	—	$\frac{0,4445}{8,9}$	—
Береза	—	—	$\frac{0,5830}{6,1}$	—	$\frac{0,5520}{6,3}$	$\frac{0,8900}{5,7}$	—
Осина	—	$\frac{-1,9614}{8,1}$	$\frac{0,8682}{4,0}$	$\frac{2,3149}{7,2}$	$\frac{0,2751}{3,4}$	—	—
Ель и пихта	—	$\frac{2,2044}{29,7}$	—	—	$\frac{0,1982}{14,0}$	$\frac{0,1907}{8,4}$	$\frac{-0,2276}{7,8}$

Древесная порода	a_{13}	a_{14}	a_{15}	a_{16}	a_{17}	R^2	SE
Сосна	—	$\frac{-0,3870}{6,4}$	$\frac{0,0427}{6,4}$	$\frac{-0,0323}{3,5}$	—	0,983	0,131
Береза	—	$\frac{-0,0470}{3,9}$	—	$\frac{-0,1130}{3,2}$	$\frac{-0,0720}{3,3}$	0,977	0,152
Осина	—	$\frac{-0,1999}{5,1}$	$\frac{0,0256}{2,8}$	$\frac{-0,0970}{3,1}$	$\frac{-0,0387}{2,9}$	0,958	0,190
Ель и пихта	$\frac{-0,1194}{6,3}$	—	—	—	—	0,930	0,248

Примечание. В числителе — константа, в знаменателе — ее значимость t .

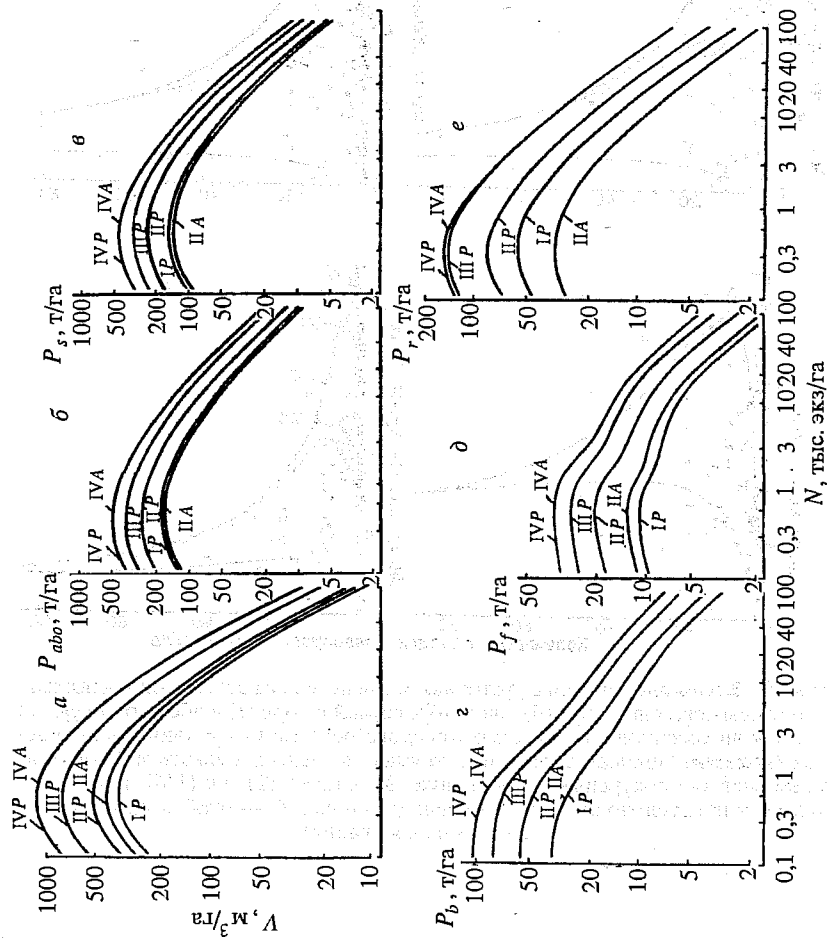


Рис. 57. Относительное положение линий самоизреживания, или предельных огибающих кривых, запаса стволовой древесины (а), надземной фитомассы (б), массы стволов в коре (в), ветвей в коре (г), хвои (д) и корневой (е) для разных регионов в зависимости от густоты словых и пихтовых древостоев (обозначения в тексте)

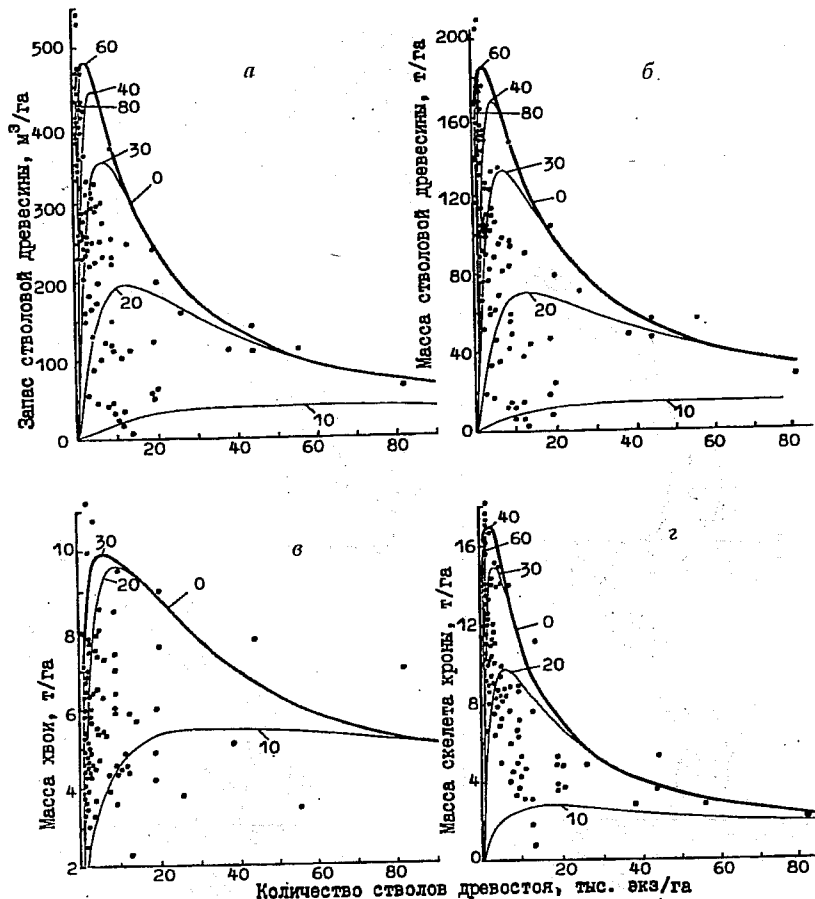


Рис. 58. Колоколообразные густотные кривые запаса стволовой древесины (а), массы стволов в коре (б), хвои (в) и ветвей в коре (г) в абсолютно сухом состоянии сосняков Урало-Казахстанского региона для различных возрастов (показаны цифрами, лет), полученные последовательным табулированием системы рекурсивных уравнений (208), (209), (210) и (176), и их положение относительно экспериментальных данных (О — огибающая, или линия самоизреживания)

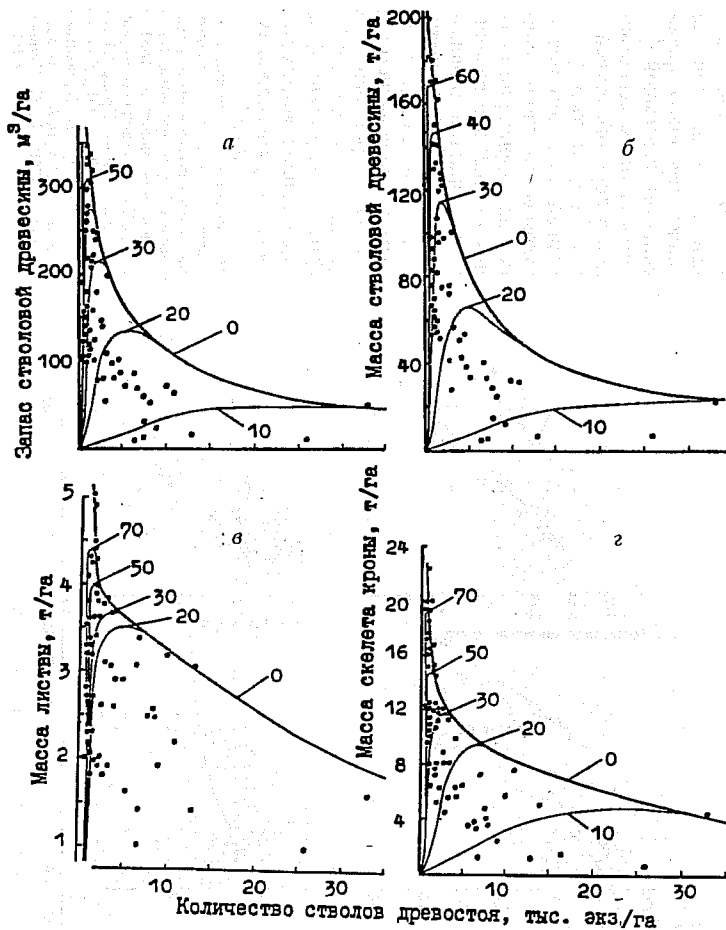
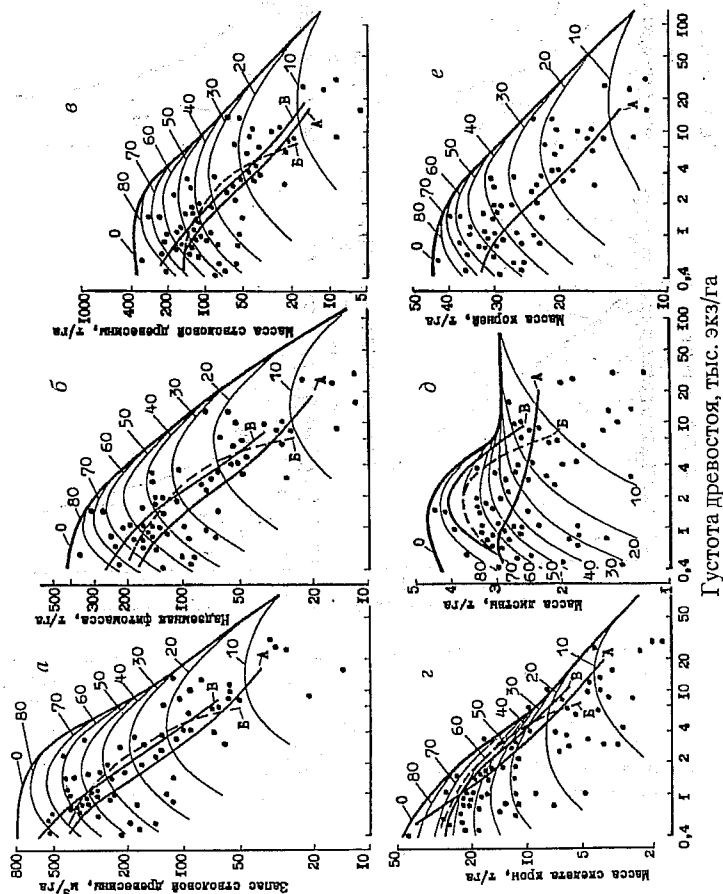


Рис. 59. Колоколообразные густотные кривые запаса стволной древесины (а), массы стволов в коре (б), листья (в) и ветвей в коре (г) в абсолютно сухом состоянии березняков Урало-Казахстанского региона для различных возрастов (показаны цифрами, лет), полученные последовательным табулированием системы рекурсивных уравнений (208), (209), (210) и (178), и их положение относительно экспериментальных данных (О — оглябующая, или линия самоизреживания)

Рис. 60. Колоколообразные густотные кривые запаса ствольной древесины (а), надземной фитомассы (б), массы стволов в коре (в), ветвей в коре (г), листья (д) и корней (е) в абсолютно сухом состоянии осинников на территории бывшего СССР для различных возрастов (показаны цифрами, лет), полученные последовательным табулированием системы рекурсивных уравнений (208), (209), (210), (183) и (186), и их положение относительно но экспериментальных данных.



О — огнивообразная, или линия симметризации, А — траектория запаса стволов (а) и фитомассы (б—г), полученные путем совмещения моделей (183) и (186) с ГХР нормальных древостоев для горного Урала (Диссо-таксационный..., 1991), В — то же, для Саянского Казахстана (Усольцев, 1988а), В — то же, с ассоблей ТХР В. С. Чернявского (Нормативы..., 1993)

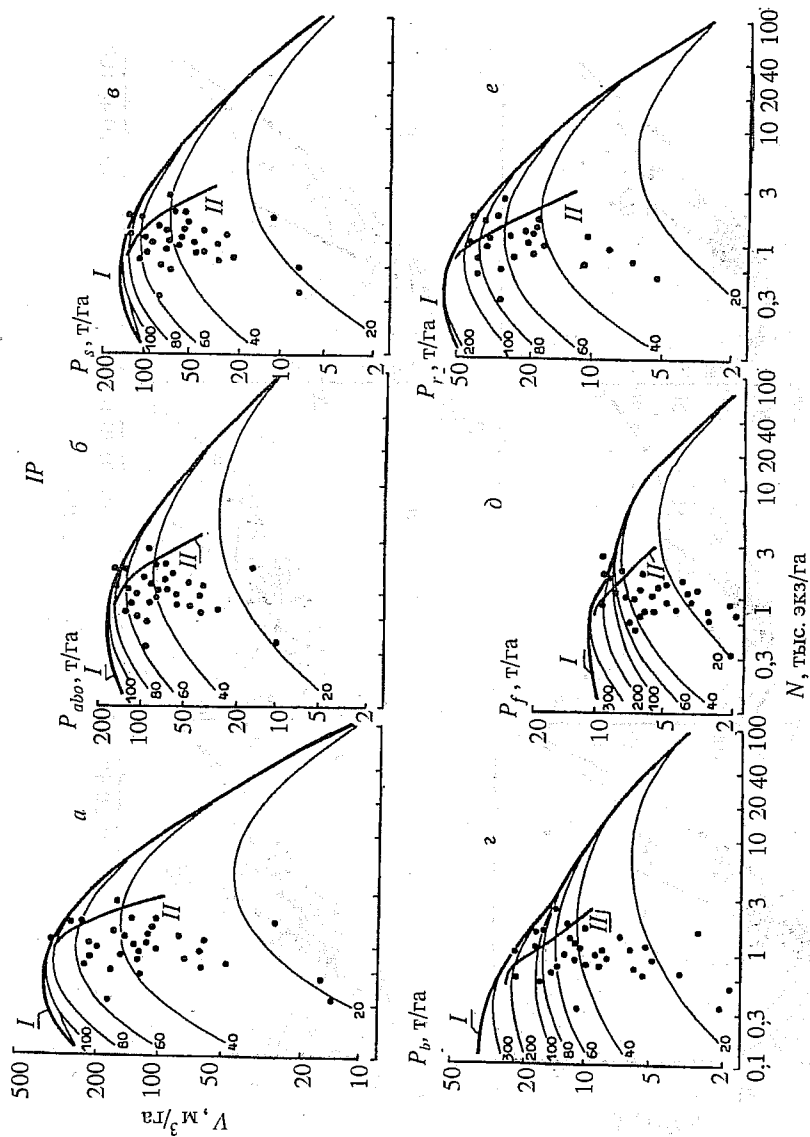
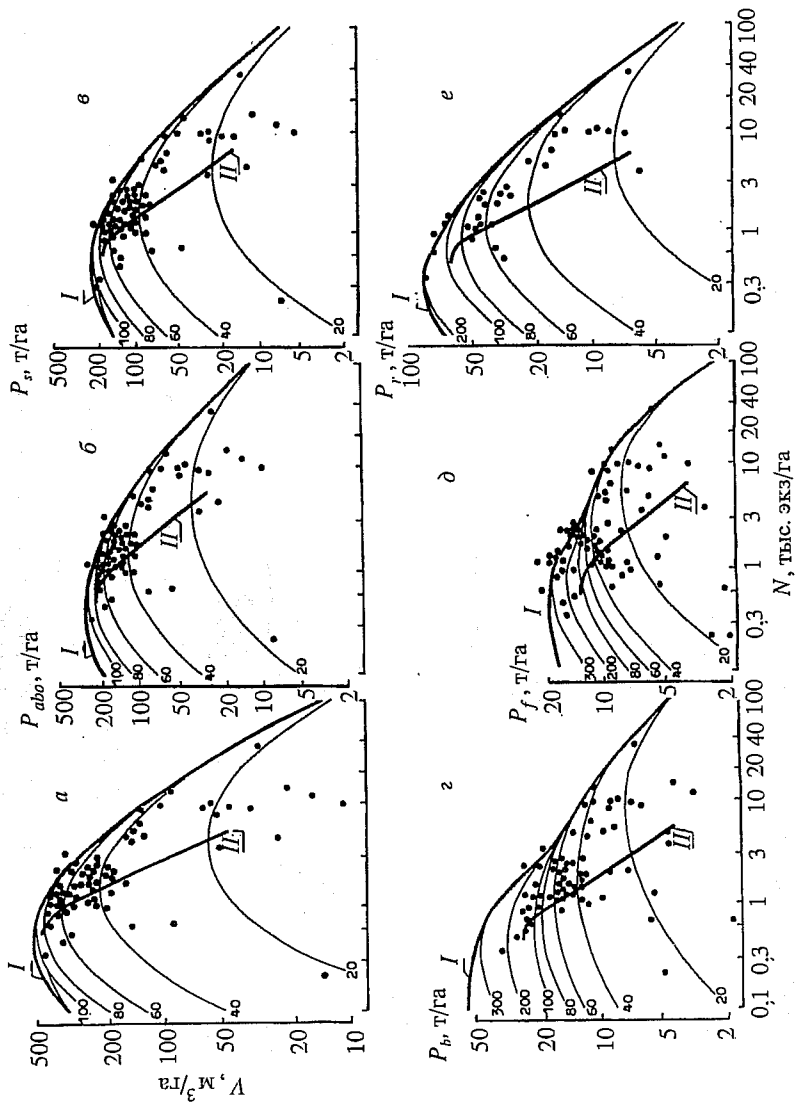
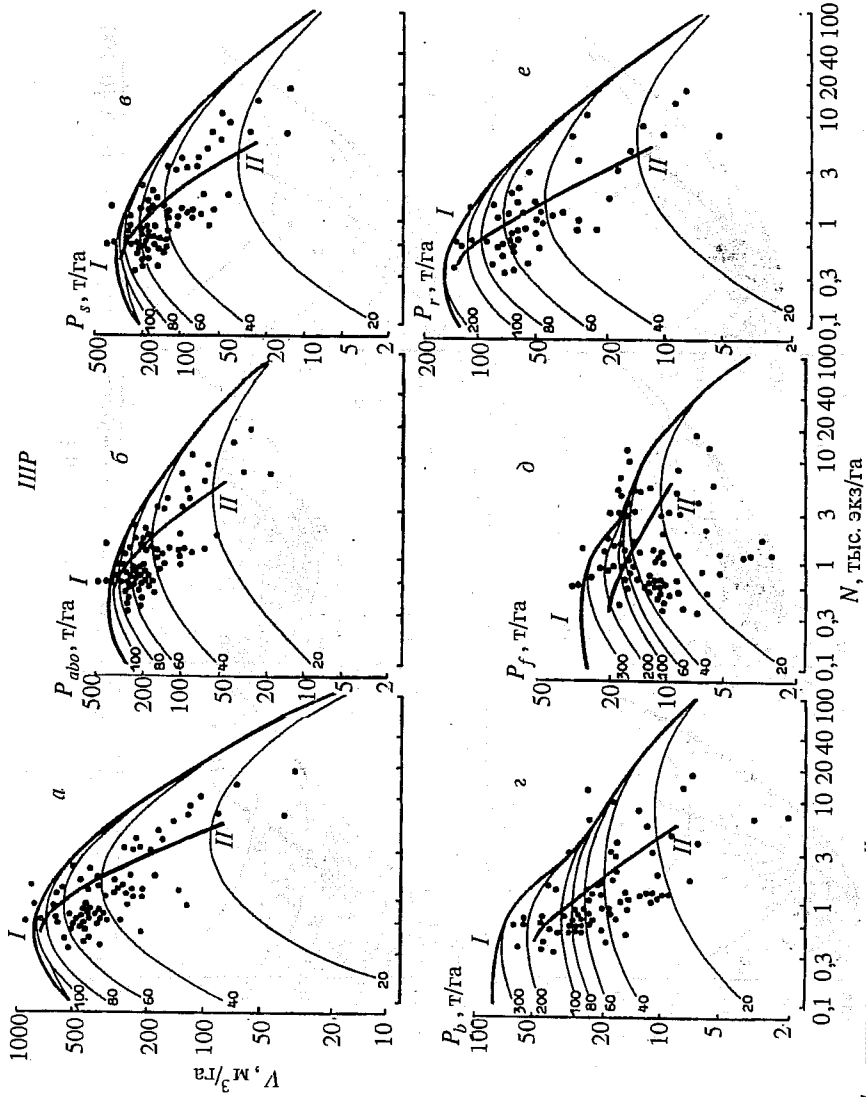


Рис. 61. Колоколообразные густотные кривые запаса стволов (*a*), наземной фитомассы (*b*), массы стволов (*c*), ветвей (*d*), хвой (*e*) и корней (*e*) в абсолютно сухом состоянии ельников и пихтарников Северной Евразии для различных возрастов (показаны цифрами, лет), полученные последовательным табулированием системы рекурсивных уравнений (208), (209), (210) и (188), и их положение относительно

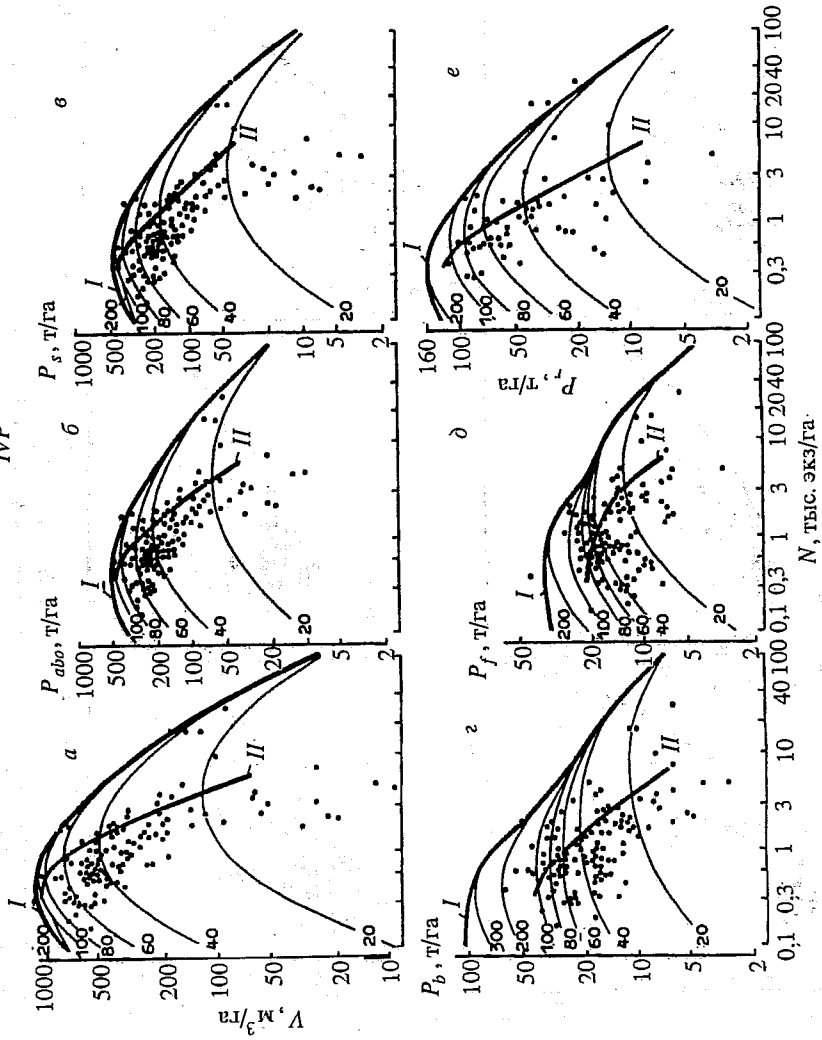
III





I — линии самоизреживания, *II* — траектории запасов стланики (*а*) и фитомассы (*б–е*), полученные путем совмещения моделей (188) с ТХР нормальных древостоев для регионов: *IP* — (Лесотаксационный..., 1986; табл. 5.1.12), *IIР* — (Лесотаксационный..., 1986; табл. 5.1.11), *IIIР* — (Нормативные..., 1984; табл. 41), *IVР* — (Нормативно-справочные..., 1987; табл. 3.2.6), *IIА* — (Ход роста..., 1975; табл. 100) *IVА* — (Нормативно-справочные..., 1987; табл. 3.2.6).

IVP



III A

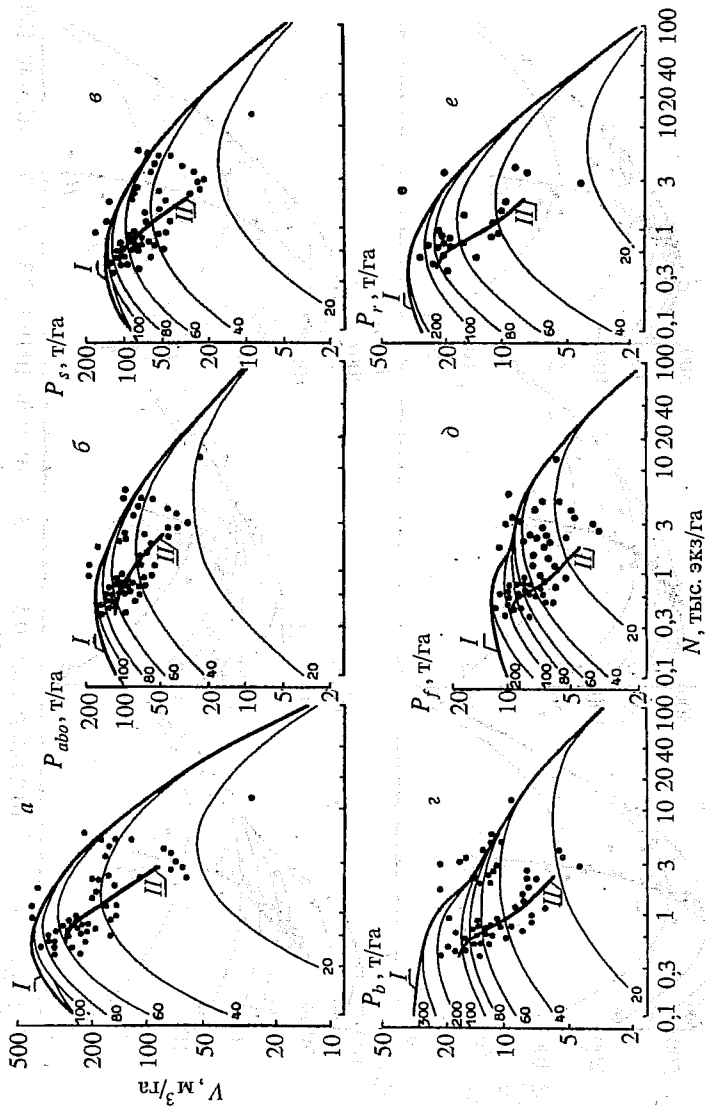


Рис. 61 (продолжение)

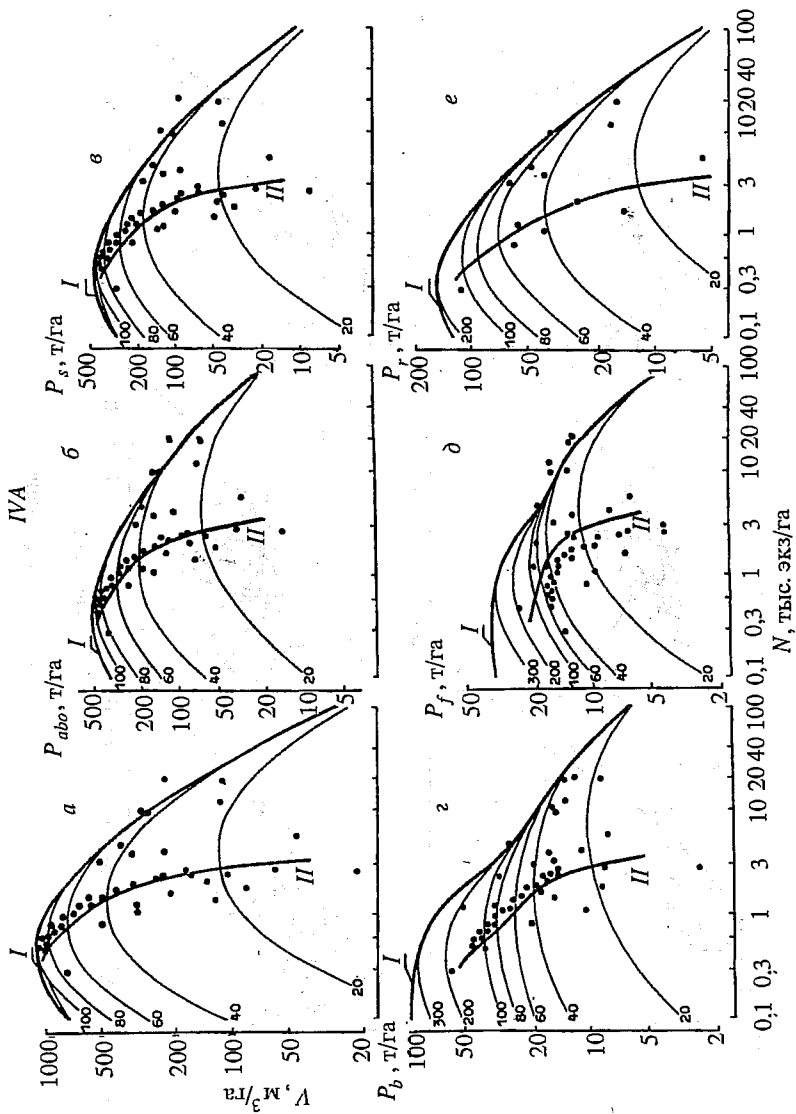


Рис. 61 (окончание)

5.5. ГУСТОТНЫЕ ТРАЕКТОРИИ ВЕРХНИХ ПРЕДЕЛОВ
ФИТОМАССЫ ДРЕВОСТОЕВ

На четвертом этапе рассчитывались густотные траектории верхних пределов фитомассы древостоев с учетом соответствующих траекторий не только для массообразующих показателей D и H , но и для запаса стволовой древесины V . Модели переводных коэффициентов фитомассы представлены для сосны в разделе 3.3.1 (уравнение 176), для березы — в разделе 3.3.2 (уравнение 178), для осины — в разделе 3.3.3. (уравнения 183, 186) и для ели и пихты — в разделе 3.3.5 (уравнение 188). При расчете последних выявлены различия фитомассы елово-пихтовых древостоев по всем или некоторым подзонам при условии равенства как массообразующих показателей D и H , так и запасов стволов V по этим подзонам. В результате последовательного табулирования уравнений $D_{\max} = f(A, N)$ (208) $\rightarrow H_{\max} = f(A, N, D)$ (209) $\rightarrow V = f(A, N, D, H)$ (210) $\rightarrow P_i/V$ или $P_i = f(A, N, D, H, P_i/V, V)$ (188) различия по регионам по величине переводного коэффициента накладываются на различия между регионами по показателям D_{\max} , H_{\max} и V и полученная в итоге иерархия результирующих огибающих кривых представлена на рис. 57, б—е. Анализ кривых показывает, что, как и в случае густотных кривых для массообразующих показателей (см. рис. 56), по фитомассе насаждений также подтверждается общая закономерность профиля продуктивности. Ель и пихта в пределах подзоны широколиственных лесов обычно представлены чистыми насаждениями и различий между ними нет (кривые IVP и IVA на рис. 57 сливаются), а в пределах подзоны средней и южной тайги между видами есть существенные различия. Кривая для подзоны ПА либо находится между кривыми IP и IP (по массе хвои), либо практически совпадает с кривой IP (по массе ветвей, стволов и общей надземной фитомассе), либо проходит значительно ниже кривой IP (по массе корней). Видимо, эти расхождения являются следствием различий не столько между видами, сколько между лесорастительными условиями европейской (большая часть пробных площадей группы IP) и урало-сибирской (все пробные площади группы ПА) частями подзоны средней и южной тайги. Предположение основано на том, что в таежной зоне чистые еловые и пихтовые насаждения редки, ель и пихта обычно произрастают в ви-

де смешанных древостоев, и критерием отнесения их к группе ПР или ПА часто служило преобладание одной из пород в составе древостоя.

Огибающие результирующие кривые, или линии самоизреживания, представляют собой геометрическое место точек пересечения правых ветвей густотных кривых для запасов фитомассы P , по классам возраста, положение которых относительно экспериментальных данных фитомассы показано на рис. 61, б—е.

Из анализа рис. 57 и 61 следует, что предельные показатели фитомассы во всех подзонах повышаются по мере снижения густоты и соответствующего увеличения возраста насаждения и достигают максимума при числе деревьев 200—300 шт/га в общей надземной и подземной фитомассе в возрасте 150—200 лет и в массе крон — в возрасте 300 лет и более. Эти максимальные значения (табл. 46) в 1,5—1,7 раза выше соответствующих верхних пределов, даваемых по зональному градиенту Н. И. Базилевич и Л. Е. Родиным (1967).

Густотные кривые фитомассы по классам возраста для основных древостоев Урало-Казахстанского региона получены путем последовательного табулирования системы рекурсивных уравнений (208) → (209) → (210) → (176), для березовых древостоев Урало-Казахстанского региона — соответственно (208) → (209) → (210) → (178) и для осиновых — (208) → (209) → (210) → (183)—(186), которые представлены соответственно на рис. 58, б—г; 59, б—г и 60, б—е на фоне полей распределения экспериментальных данных. Правые ветви густотных кривых, пересекаясь, образуют огибающую кривую, которая является предельной по условию самоизреживания. Цифровые значения средних диаметров, высот, запасов V и фитомассы сосны, березы и осины, предельные для задаваемых густот, приведены в табл. 47—49.

Сопоставление огибающих для показателей фитомассы сосны и березы в пределах Урало-Казахстанского региона (рис. 62) показывает, что названные две породы существенно различаются как по форме кривых, так и по величине предельных показателей при заданной густоте: $N < 1000$ деревьев на 1 га общая надземная фитомасса больше у березы, а при $N > 1000$ деревьев на 1 га — наоборот. Однако их максимальные значения одинако-

Таблица 46

Предельные показатели фитомассы еловых и пихтовых экосистем по зональному градиенту в абсолютно сухом состоянии

Регион	Фитомасса, т/га					
	Стволов	Ветвей	Хвои	Надземная	Корней	Всего
IP	148	34	11	193	56	249
IIIP	228	54	20	302	80	382
IIIIP	320	80	29	429	142	571
IVP, IVA	440	100	38	578	154	732
IIA	140	34	13	187	34	221

Таблица 47

Предельные показатели средних диаметров, высот, запасов стволов и фитомассы сосняков Урало-Казахстанского региона

Показатель	Густота древостоя, тыс. экз/га									
	1	2	3	5	10	20	35	60	90	
Диаметр среднего дерева $D_{\text{ср}} \text{ см}$	23,3	19,0	16,3	13,0	8,8	5,5	3,7	2,4	1,7	
Высота среднего дерева $H_{\text{ср}} \text{ м}$	22,0	20,0	18,5	16,0	12,0	8,5	6,1	4,2	3,1	
Запас стволовой древесины $V, \text{ м}^3/\text{га}$	450	475	480	450	360	240	155	95	65	
Надземная фитомасса в абсолютно сухом состоянии, т/га	стволов	170	183	185	174	142	97	64	42	31
	скелета кроны	16,0	16,9	16,7	14,8	11,0	7,0	4,5	3,0	2,1
	хвои	6,5	8,2	9,2	9,9	9,7	8,8	7,2	5,8	5,1
Итого надземной фитомассы, т/га	192,5	208,1	210,9	198,7	162,7	112,8	75,7	50,8	38,2	

вы — около 200 т/га, но приходится на разные густоты. Предельная надземная фитомасса осинников вдвое больше — около 400 т/га (см. табл. 49).

На рис. 54 и 58—61 видно, что некоторые экспериментальные точки, соответствующие зоне Z (см. рис. 51, а), выходят за линию самоизреживания, и фактически имеет место не линия, а некая полоса самоизреживания. В ней древостои из-за чрезмерного перегущения не могут находиться в устойчивом состоянии: срабатывает механизм саморегуляции, спровоцирован-

Таблица 48

Предельные показатели средних диаметров, высот, запасов стволовой древесины и фитомассы березняков Урало-Казахстанского региона

Показатель	Густота древостоя, тыс. экз/га								
	1	2	3	5	10	15	20	25	35
Диаметр среднего дерева D_{max} , см	20,5	13,5	10,6	7,9	5,2	4,0	3,3	2,9	2,3
Высота среднего дерева H_{max} , м	21,4	17,5	15,5	12,7	9,6	8,0	6,9	6,1	5,0
Запас стволовой древесины V , м ³ /га	330	250	220	170	110	80	65	55	45
Надземная фитомасса в абсолютно сухом состоянии, т/га									
стволов	180	130	108	83	54	40	33	28	24
скелета кроны	21,0	16,2	15,0	13,2	10,8	9,4	8,1	7,0	5,0
листвы	5,4	3,9	3,8	3,6	3,2	2,9	2,6	2,3	1,9
Итого надземной фитомассы, т/га	206,4	150,1	126,8	99,8	68,0	52,3	43,7	37,3	30,9

Таблица 49

Предельные показатели средних диаметров, высот, запасов стволовой древесины и фитомассы осипников на территории бывшего СССР

Показатель	Густота древостоя, тыс. экз/га							
	0,4	1	2	4	7	10	20	50
Диаметр среднего дерева D_{max} , см	41	27	18	12	8,4	6,6	4,3	2,2
Высота среднего дерева H_{max} , м	33	29	25	20	16	13	7,5	3,3
Запас стволовой древесины V , м ³ /га	700	750	640	420	230	170	90	44
Надземная фитомасса в абсолютно сухом состоянии, т/га								
стволов	330	390	330	230	135	93	54	26
скелета кроны	47	32	23	14	9	7	5	3
листвы	4,3	4,6	4,4	3,8	3,0	2,9	2,9	2,9
Итого надземной фитомассы, т/га	381,3	426,6	357,4	247,8	147,0	102,9	61,9	31,9
Масса корней, т/га	44	43	40	34	29	27	22	17
Общая фитомасса, т/га	425,3	469,6	397,4	281,8	176,0	129,9	83,9	48,9

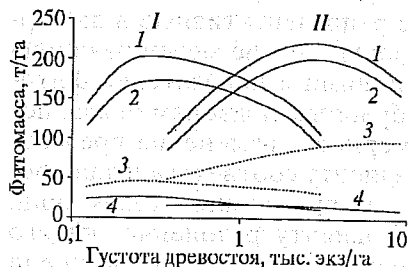


Рис. 62. Сопоставление предельных густотных кривых березовых (I) и сосновых (II) древостоев Урало-Казахстанского региона в полулогарифмических координатах для общей надземной фитомассы (1), массы стволов (2), листья (увеличенной на порядок) (3) и ветвей (4). Несмотря на то, что густотные кривые надземной фитомассы двух пород различаются по форме и положению относительно оси абсцисс, их максимальные значения одинаковы — около 200 т/га (Usoltsev, Vanclay, 1999)

ный любым внешним воздействием (засухой, обильным снегопадом, ураганом и т. д.), в результате чего резко сокращается густота древостоя и наши “выскакивающие” точки в следующий момент времени смещаются влево, за линию самоизреживания. Подтверждением изложенных соображений служат данные периодических перечетов на постоянных пробных площадях (рис. 63).

5.6. СОПОСТАВЛЕНИЕ ПРЕДЕЛЬНЫХ И “НОРМАЛЬНЫХ” ГУСТОТНЫХ ТРАЕКТОРИЙ ФИТОМАССЫ

Оценка степени достоверности различий предельных показателей фитомассы елово-пихтовых древостоев по подзонам и породам осложнялась тем, что при расчете траекторий объемобразующих показателей D_{\max} и H_{\max} отбирались значения D и H , находившиеся в крайних правых ступенях рядов распре-

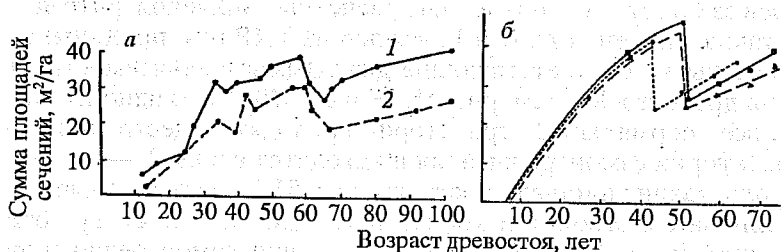


Рис. 63. Возрастная динамика суммы площадей сечений по данным периодических перечетов сосны *Pinus sylvestris* L. на постоянных пробных площадях. а — естественные бруснично-зеленомошные (1) и голосиянково-лишайниковые (2) сосняки подзоны южной тайги (Плешников, 1995), б — культуры на обыкновенных и солонцеватых черноземах Подгородной лесной дачи Омской области (Кузьмичев, 1980)

ления и, следовательно, наименее репрезентативные в выборках данных для той или иной подзоны. Тем не менее различия названных показателей, а вслед за ними и показателей фитомассы древостоев по четырем выбранным подзонам оказались существенными, а общая закономерность изменения предельной фитомассы по зональному градиенту соответствовала профилю продуктивности. Для расчета предельных траекторий продуктивности по зональному градиенту разбиение общего массива экспериментальных данных на четыре группы по ели и две — по пихте было достаточным, поскольку при малой репрезентативности D_{\max} и H_{\max} их различия при более детальном разбиении установить невозможно, они недостоверны.

Иная ситуация имеет место при расчете “нормальных” густотных траекторий. В этом случае уравнения для D_{\max} , H_{\max} и V не рассчитываются, а значения D , H и V берутся из соответствующих ТХР. Используются только уравнения для переводных коэффициентов фитомассы, рассчитанные по всему массиву данных по ее взаимосвязи с массообразующими показателями и состыкованные с ТХР нормальных древостоев по тем же массообразующим показателям, взятым из региональных ТХР, дифференцированных по подзонам и лесотаксационным подрайонам.

Северная тайга. Для этой подзоны выполнено совмещение моделей (188) с ТХР полных разновозрастных еловых древостоев северотаежного лесотаксационного подрайона (Лесотаксационный справочник..., 1986, табл. 5.1.12) высшего для этой подзоны (III) класса бонитета. Полученные расчетные значения фитомассы, а также значения D , H и V , взятые из ТХР (см. приложение 9), нанесены на соответствующие диаграммы в зависимости от густоты древостоев N (см. рис. 55, IP и 61, IP). Как видно из рис. 61, IP , все “нормальные” траектории проходят существенно ниже траекторий самоизреживания и находятся в зоне Y — полного использования площади роста (см. рис. 51, a). Предельные показатели массы стволов и корней при одной и той же густоте (3000 стволов на 1 га) на начальной стадии самоизреживания превышают “нормальные” значения в 2,7—3,0 раза, массы скелета кроны в 2,0 и хвои — в 1,5 раза, а на заключительной стадии в возрасте спелости при густоте 600 стволов на 1 га превышения составляют для всех фракций 10—15 %.

Средняя и южная тайга. Еловые насаждения. Полученные расчетные значения фитомассы по модели (188), а также значения D , H и V , взятые из ТХР (см. приложение 10) полных одновозрастных древостоев III класса бонитета для среднетаежного лесотаксационного подрайона (Лесотаксационный справочник..., 1986; табл. 5.1.11), нанесены на соответствующие диаграммы (см. рис. 55, ПР и 61, ПР) в зависимости от густоты древостоев N . При одной и той же густоте (5000 деревьев на 1 га) на начальной стадии самоизреживания предельные показатели массы стволов, ветвей, хвои и корней превышают "нормальные" показатели тех же фракций соответственно в 4,2; 3,4; 3,3 и 5,0 раз, а на заключительной стадии в возрасте спелости при густоте 500 деревьев на 1 га превышения составляют соответственно 13, 70, 54 и 25 %.

Пихтовые насаждения. Полученные расчетные значения фитомассы по модели (188), а также значения D , H и V , взятые из ТХР (см. приложение 13), нанесены на соответствующие диаграммы (см. рис. 55, ПА и 61, ПА). При одной и той же густоте (2000 деревьев на 1 га) на начальных стадиях самоизреживания предельные показатели массы стволов, ветвей, хвои и корней превышают "нормальные" показатели тех же фракций соответственно в 2,6; 2,7; 2,3 и 3,0 раза, а на заключительной стадии в возрасте спелости при густоте 500 деревьев на 1 га превышение составляет соответственно 50, 75, 38 и 45 %.

Подзона широколиственно-темнохвойных лесов. Полученные расчетные значения фитомассы по уравнению (188), а также значения D , H и V , взятые из ТХР (см. приложение 15), нанесены на соответствующие диаграммы в зависимости от густоты древостоев N (см. рис. 55, ПП и 61, ПП). При одной и той же густоте (5000 деревьев на 1 га) на начальной стадии самоизреживания предельные показатели массы стволов, ветвей, хвои и корней превышают "нормальные" показатели тех же фракций соответственно в 3,7; 3,0; 1,6 и 4,5 раза, а на заключительной стадии в возрасте спелости при густоте 500 деревьев на 1 га превышение составляет соответственно 7, 52, 50 и 25 %.

Подзона широколиственных лесов. Хотя на этапе зонального анализа предельных показателей фитомассы различия между елью и пихтой не выявлены и выведены общие густотные траектории для двух видов (см. табл. 46, рис. 57), при сопоставлении

предельных и “нормальных” густотных траекторий они рассмотрены отдельно.

Еловые насаждения. Полученные расчетные значения фитомассы по уравнению (188), а также значения D , H и V , взятые из ТХР (см. приложение 16), нанесены на соответствующие диаграммы (рис. 55, IVP и 61, IVP). Предельные показатели массы стволов, ветвей, хвои и корней при одной и той же густоте (6000 деревьев на 1 га) на начальной стадии самоизреживания превышают “нормальные” значения соответственно в 5,7; 3,7; 2,4 и 5,7 раза, а на заключительной стадии в возрасте спелости при густоте 400 деревьев на 1 га превышения составляют соответственно 13, 135, 180 и 126 %.

Пихтовые насаждения. Полученные расчетные значения фитомассы, а также значения D , H и V , взятые из ТХР (см. приложение 17 для пихты белой), нанесены на соответствующие диаграммы (см. рис. 55, IVA и 61, IVA). Предельные показатели массы стволов, ветвей, хвои и корней при густоте 3000 деревьев на 1 га превышают “нормальные” значения соответственно в 7,5; 4,5; 2,5 и 7,0 раза, а при густоте 400 деревьев на 1 га превышения составляют соответственно 14, 80, 60 и 33 %.

Таким образом, во всех подзонах по мере самоизреживания древостоев предельные и “нормальные” траектории как надземной, так и подземной фитомассы сближаются и на уровне максимальных значений тех и других практически одинаковые (см. рис. 55 и 61). Причина такого сближения траекторий, возможно, состоит в том, что к возрасту спелости уже не осталось не тронутых рубками древостоев, тем самым их густота на пробных площадях оказалась искусственным образом заниженной, а верхняя часть траектории самоизреживания — смещенной.

Для сопоставления предельных показателей фитомассы, полученных по условию самоизреживания осинников, с данными фитомассы нормальных древостоев регрессионные модели (183) протабулированы по значениям A , N , D , H и V , взятым из ТХР нормальных осиновых древостоев горного Урала (см. приложение 7), а затем по значениям суммарной надземной фитомассы протабулировано уравнение (184). После нанесения полученных значений, описывающих возрастную динамику фитомассы нормальных древостоев осины, а также показателей D , H и V , взятых из ТХР (см. приложение 7), на соответствующие диаграммы самоизреживания (линии A на рис. 54, III и 60), оказалось, что все

их траектории находятся существенно ниже траекторий самоизреживания и проходят вблизи линии, соединяющей вершины колоколообразных густотных кривых (см. рис. 51, б). Близкие результаты получены после нанесения на названные диаграммы соответствующих показателей (линии *B* на рис. 54, III и 60), взятых из эскиза таблиц биопродуктивности нормальных осиновых древостоев Ia класса бонитета Северного Казахстана (Усольцев, 1988а), а также показателей (линии *B* на рис. 54, III и 60), полученных путем совмещения моделей переводных коэффициентов фитомассы осины Северного Казахстана с всеобщей ТХР (Ia класс бонитета) В. С. Чернявского (Усольцев, 1988а). Примерно в таком же соотношении находятся траектории линий самоизреживания и оптимальной густоты, установленной по результатам контролируемых разреживаний древостоев сосны *Pinus radiata* (West, 1985).

Итак, “нормальная” траектория проходит через значения густоты, близкие к оптимальным, т. е. соответствует чаще всего максимальным значениям продуктивности в каждом возрасте. Предельная же траектория при тех же густотах соответствует возрасту, обычно большему на 3—5 классов, и в этом состоит принципиальное различие траекторий фитомассы по предельным и оптимальным густотам.

* * *

Использование обширного банка данных фитомассы основных лесобразующих пород Северной Евразии, многомерного подхода при построении моделей переводных коэффициентов фитомассы, концепции самоизреживания лесных фитоценозов и методологии систем рекурсивных уравнений позволило выйти на совершенно новый уровень анализа экспериментальных данных фитомассы и оценку ее предельных запасов в лесных насаждениях методом математического моделирования.

Применение разработанной методологии и полученных результатов в технологии ГУЛФ помогает оценить степень использования ресурсного потенциала на инвентаризируемых территориях, а также позволяет установить потенциально возможный сток атмосферного углерода, по крайней мере, его приходную часть.

Изложенные результаты получены на основе индуктивного метода (по принципу "от эксперимента") и не претендуют на какие-либо обобщения в области теории динамики популяций. Следует согласиться с Г. Б. Кофманом (1986), что подобные модели различной разрешающей способности в теоретическом плане играют вспомогательную роль и расчищают плацдарм для будущих теорий и асимптотических моделей.

Предложенный подход можно использовать для расчета предельных траекторий не только запасов, но и годовичного прироста фитомассы. Предельные траектории могут быть установлены не только по густоте, но и по высоте насаждения (что показано в разделе 7.3.3.2), а также по их совокупности. В последнем случае речь пойдет уже не о предельных траекториях, а о предельных поверхностях. Это составит предмет будущих исследований.

ГЛАВА 6

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ФИЗИОЛОГИЧЕСКИ ОБУСЛОВЛЕННЫХ ВЗАИМОСВЯЗЕЙ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ БАНКА ДАННЫХ И ВЫЯВЛЕНИИ РЕГИОНАЛЬНЫХ РАЗЛИЧИЙ ФИТОМАССЫ ЛЕСОВ

6.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Развитие современной лесной науки, в том числе лесной таксации, характеризуется все большей экологизацией (Стадницкий, 1984; Антанайтис, 1985). Поскольку леса абсолютно доминируют в растительном покрове планеты, лесная таксация выходит на уровень разработки глобальных экологических программ и международного лесного мониторинга, становится по существу количественной основой глобальной экологии (Будыко, 1977). Соответственно должна модифицироваться и ее методологическая основа.

Традиционные методы лесной таксации применимы уже далеко не во всех случаях. Например, попытки связать пространственную и временную динамику продуктивности лесов с изменением климата и атмосферными загрязнениями приводят сегодня к противоречивым результатам. Одни исследователи объясняют резкое повышение радиального прироста стволов в лесах Германии за последние 15 лет снижением атмосферного содержания SO_2 и NO_2 (Visser, Molenaar, 1992). Другие это утверждение опровергают, показывая, что снижение уровня поллютантов имеет место лишь в Рурской области, а на основных лесных площадях, расположенных в сотнях километров от источников загрязнений, их концентрация стабильно низкая и что повышение прироста имеет иную, не известную пока причину (Kandler, 1992). Не находит также объяснения ежегодное увеличение прироста площади сечений на 0,5—0,8 % в лесах Швеции за период с 1950 по 1990 г. (Elfving, Tegnhammar, 1996) и повышение продуктивности

всех лесообразующих пород Эстонии за тот же период на один класс бонитета (Kiviste, Korjus, 1997).

Увеличение общего запаса фитомассы лесов в течение последних 20 лет характерно для всей Европы. Это увеличение объясняют повышением концентрации атмосферного CO_2 и мелиорирующим эффектом поллютантов на допороговых уровнях (Kauppi et al., 1992), но оно находится в полном противоречии с общей тенденцией снижения охвоенности и плотности лесного полога (Schlaepfer, 1993), что связывается с загрязнением среды (Forest damage..., 1989; Innes, 1992). Выяснение противоречий при оценке воздействия антропогенных эмиссий на продуктивность лесов необходимо поставить на биоэкологическую основу (Усольцев, 1997). Однако сегодня определение степени повреждения лесов Европы основывается на визуальной (обычно 10-балльной) оценке изменения цвета, охвоенности и плотности полога (Innes, Boswell, 1990) без каких-либо придержек по ассимилирующей массе. Такие оценки чрезвычайно ненадежны, во-первых, в силу значительной генетической и естественной эколого-ценотической изменчивости морфологии крон и, во-вторых, вследствие методических расхождений и субъективности глазомерной оценки поражения лесов в разных странах (Innes, 1992). Имеются лишь единичные исследования взаимосвязи между визуальными и количественными критериями (Hornqvist, Christiansen, 1979; Hornqvist, 1993).

Для выяснения природы противоречий при оценке воздействия антропогенных эмиссий на продуктивность лесов сегодня фактически нет попыток прямо использовать известные с прошлого века взаимосвязи массы хвои с количеством депонируемых ассимилятов в виде объемного прироста (Hartig, 1896; Burger, 1929; Busse, 1930; Коссович, 1940; Георгиевский, 1948; Полякова, 1954; Satoo, 1970; Albrektson, 1980; Усольцев, 1988a), а также с характеристиками заболони, обеспечивающей хвою влагой (Huber, 1927; Shinozaki et al., 1964; Вомперский, Иванов, 1984; Кайбиянен и др., 1986; Keane, Weetman, 1987; Иванов, Дубинин, 1992). Названные зависимости учитываются пока на уровне отдельных деревьев с использованием различных критериев их жизнеспособности: отношения объемного прироста к поверхности хвои, как самостоятельного критерия (Waring, 1987), так и сопряженного с отношением прироста площади сечения к площади заболони ствола (Waring et al., 1980), отноше-

ния объема заболони к поверхности хвои (Kaufmann, Watkins, 1990) и др. Массовые измерения названных показателей отсутствуют, нет статистически подтвержденных внутри- и межрегиональных закономерностей их изменения, и, следовательно, проблема экстраполяции локальных результатов на ту или иную территорию остается открытой.

В наших предыдущих работах (Усольцев и др., 1994б, г.; Усольцев, 1997) показано, что диаметр ствола у основания кроны, представленного в основном заболонью, дает более точную оценку массы хвои или листвы (приближение второго уровня, на основе пайп-модели), чем диаметр ствола на высоте груди (приближение первого уровня). Однако имеют место отклонения от пайп-модели, которые объясняют изменением проводящей способности заболони, зависящей, в частности, от возраста, диаметра ствола и расстояния до кроны (West, Wells, 1990). Было установлено, что у хвойных дополнительный учет диаметра и радиального прироста ствола на высоте груди дает более точную (в сравнении с пайп-моделью) зависимость третьего уровня приближения (Usoltsev et al., 1993; Усольцев и др., 1994а, д; Усольцев, 1997). У мелколиственных подобное уточнение пайп-модели не оправдало себя, т. е. вклад радиального прироста в объяснение изменчивости массы кроны, включенного в пайп-модель дополнительно к диаметру ствола у основания кроны, оказался не значимым (Усольцев, 1997). Поэтому при формировании банка данных о фитомассе мелколиственных пород может быть применена пайп-модель, а для хвойных — зависимость третьего уровня приближения.

В настоящем разделе, во-первых, изложен метод оптимизации объема экспериментальных данных при оценке массы кроны у мелколиственных; во-вторых, предпринята попытка выяснить, имеют ли зависимости второго и третьего уровней приближения достоверные различия как между биологически близкими хвойными породами, так и между популяциями одной породы разного происхождения (естественного и искусственного) в пределах одного или нескольких регионов, и в-третьих, дан сравнительный анализ закономерностей распределения фитомассы по возрастным слоям кроны в сосняках естественного происхождения и культурах одного региона, а также в естественных сосняках двух регионов, различающихся по комплексу природных условий и по уровню антропогенных загрязнений.

Исследования проведены в лесах Северного Казахстана и Урала, которые относятся к разным природно-климатическим зонам и характеризуются разными комплексами природно-климатических факторов, из которых основной — уровень влагообеспеченности (Колесников, 1969; Грибанов и др., 1970). Эти два региона различаются и по уровню антропогенных эмиссий.

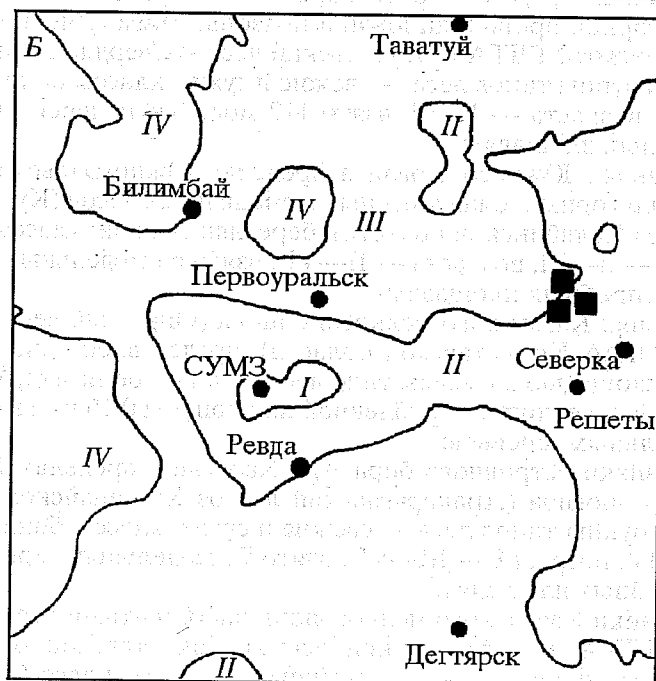
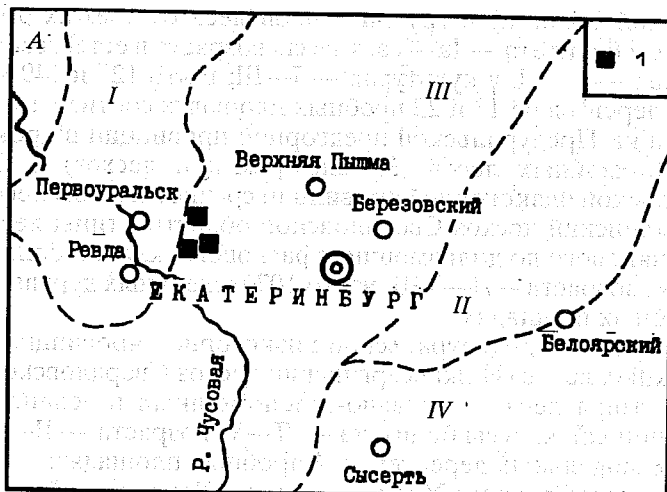
Островные боры Тургайского прогиба и лесные массивы Казахского мелкосопочника удалены от крупных источников промышленных загрязнений на сотни километров к северу и на многие тысячи километров — к югу и юго-востоку (см. рис. 22). Леса Урала испытывают сильнейшее воздействие антропогенных поллютантов, что приводит к снижению их текущего прироста (Фимушин, 1985, 1986). Районы закладки пробных площадей в сосняках Среднего Урала находятся по данным Уральского центра “Аэрокосмоэкология” на стыке районов с катастрофической и напряженной экологической ситуацией (рис. 64, А), а по данным Уральской лесотехнической академии — на стыке зон с плохим и удовлетворительным состоянием древостоев (см. рис. 64, Б). Они удалены на 10 км от Екатеринбурга и на 10—20 км — от крупных экоцидных предприятий Первоуральска, Ревды, Верхней Пышмы и Среднеуральска.

Объектами исследования были сомкнутые древостои пяти древесных пород Урало-Казахстанского региона:

- естественные сосняки Зауральской холмисто-предгорной провинции в пределах южной подзоны тайги (Учебно-опытный лесхоз Уральской государственной лесотехнической академии); типы леса — от разнотравного до болотного, классы бонитета — I—V, возраста — II—XV; взято 250 модельных деревьев на 35 пробных площадях;
- естественные сосняки и культуры в пределах Тургайского прогиба; пробные площади заложены в островном бору Аман-Карагай (Семиозерный и Басаманский лесхозы Куста-

Рис. 64. Схемы экологической ситуации в местах закладки пробных площадей (1) в сосняках Среднего Урала.

А — по данным Уральского центра “Аэрокосмоэкология” (Карта..., 1993), полученным на основе ландшафтно-экоиндикационного дешифрирования материалов аэро- и космических съемок; I, II, III и IV — районы соответственно катастрофической, критической, напряженной и условно удовлетворительной экологической ситуаций; Б — по данным Уральской лесотехнической академии (Фомин, 1998), полученным по совокупности морфометрических и физиологических характеристик древостоев; I, II, III и IV — зоны соответственно очень плохого, плохого, удовлетворительного и хорошего состояния древостоев



найской области) в группах типов леса от свежих до сухих, классы бонитета — Ia—Va, классы возраста в естественных сосяках — I—VI, в культурах — I—III; взято 127 и 149 модельных деревьев на 13 и 22 пробных площадях соответственно;

- ельники Предуральской предгорной провинции широколиственно-хвойных лесов (Красноуфимский лесхоз) и Среднеуральской низкогорной провинции среднетаежных лесов (Новолялинский лесхоз Свердловской области); типы леса — от липнякового до долгомошно-сфагнового, классы бонитета — I—V, возраста — I—VIII; взято 107 модельных деревьев на 20 пробных площадях;
- пихтарники Среднеуральской низкогорной провинции южнотаежных лесов (Нижнесергинский лесхоз Свердловской области); типы леса — травяно-зеленомошный и зеленомошно-кисличный, классы бонитета — II—V, возраста — II—IV; взято 18 модельных деревьев на 4 пробных площадях;
- березняки Среднего Урала в пределах Зауральской холмисто-предгорной провинции южной подзоны тайги (Учебно-опытный лесхоз УГЛТА и Березовский лесхоз Свердловской области); группы типов леса — свежие и сухие, классы бонитета — I—V, возраста — I—VI; взято 112 модельных деревьев на 11 пробных площадях;
- березняки Южного Урала в пределах Южноуральской провинции горных южнотаежных и смешанных лесов (Кусинский лесхоз Челябинской области); березняк свежий, классы бонитета — II—III, возраста — II—VII; взято 64 модельных дерева на 10 пробных площадях;
- березняк Казахского мелкосопочника (Опытный лесхоз КазНИИЛХА Кокчетавской области), представлен одной пробной площадью в свежем типе леса (V класс бонитета, V класс возраста), сплошь вырубленной на площади 0,16 га, взяты 100 модельных деревьев;
- березняки островного бора Ара-Карагай в пределах Тургайского прогиба (Аракарагайский лесхоз Кустанайской области); группы типов леса — свежие и сухие, классы бонитета — III—IV, возраста — III—VII; взято 78 модельных деревьев на 8 пробных площадях;
- осинники Казахского мелкосопочника (Опытный лесхоз КазНИИЛХА и Буландинский лесхоз Кокчетавской области); группы типов леса — от влажных до сухих, классы боните-

та — Ia—IV, возраста — I—VI; взято 160 модельных деревьев на 16 пробных площадях.

На казахстанских объектах исследований естественные чистые древостой и монокультуры сосны *Pinus sylvestris* L. произрастают на южном пределе ареала на дерново-боровых песчаных (Ia—Va классы бонитета) и на зональных темнокаштановых почвах (Ia—II классы бонитета). На Урале древостой сосны (*Pinus sylvestris* L.), ели (*Picea obovata* Ldb.) и пихты (*Abies sibirica* Ldb.) на пробных площадях представлены долей основной породы в составе от 10 до 5 единиц; березняки чистые или с примесью осины; осинники чистые, редко с примесью березы. Во влажных условиях осина (*Populus tremula* L.) представлена зеленокорой формой, в сухих — серокорой.

Модельные деревья на пробных площадях взяты по ступеням толщины в пределах диапазона их варьирования. Измеряли диаметры ствола на высоте груди и у основания кроны в двух направлениях и радиальный годичный прирост на высоте груди, средний за последние 5 лет, в четырех направлениях. Строго говоря, число лет осреднения прироста должно соответствовать возрасту хвои дерева. Однако здесь мы сталкиваемся с проблемой варьирования продолжительности жизни хвои по разным регионам (Онучин, Спицына, 1995): если принимать число лет осреднения прироста в каждом регионе по среднему возрасту хвои (например, у сосны в Казахском мелкосопочнике 7—8 лет, а в Велико-Анадольском массиве — 2 года), то региональные модели массы хвои становятся несопоставимыми. Кроме того: а) связь объемного прироста с радиальным на высоте груди опосредуется комплексом факторов, которые трудно полностью учесть в каждом регионе; б) вклад хвои различного возраста в прирост текущего года, а тем более в усредненный прирост за несколько лет, в нашей работе установить не представлялось возможным (хотя известно, что наибольшей физиологической активностью обладает хвоя последних лет); в) объемный прирост ствола не связан напрямую с ассимиляционной поверхностью (массой), а является мерой избытка ассимилятов после затрат на дыхание, поддержание функционирования и прирост хвои и корней, генеративных органов и т. д., и этот избыток варьирует в зависимости от условий года (Палуметс, 1990). Поэтому в нашем исследовании условно принято число лет осреднения прироста, равное 5.

Крону делили на 3—5 равных секций, каждую взвешивали, затем обрезали секатором облиственные побеги и взвешивали. По навескам каждой секции определяли долю листы в облиственных побегах и содержание сухого вещества термовесовым методом. В сосняках крона модельного дерева расчленена, обмерена и взвешена по каждой мутовке; в итоге получены данные соответственно по 1716 и 1830 мутовкам. Взвешивалась суммарная масса ветвей в каждой мутовке, затем у средней ветви мутовки ошпывалась вручную хвоя. Последняя, а также древесная часть (скелет) ветви термовесовым методом переводились в абсолютно сухое состояние и по полученному соотношению хвои и скелета модельной ветви рассчитаны масса хвои и скелета каждой мутовки в абсолютно сухом состоянии.

6.2. ПРИМЕНЕНИЕ ПАЙП-МОДЕЛИ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ БАНКА ДАННЫХ О ФИТОМАССЕ ЛЕСОВ

Как уже отмечалось в разделе 3.1, на сегодня накоплены обширные банки данных о запасах стволовой древесины в системе ГУЛФ, имеются многочисленные сведения о перечислительной таксации временных и постоянных пробных площадей и составлено большое количество региональных ТХР древостоев разных пород. Данные же о запасах и продуктивности фитомассы малочисленны, поскольку оценка фитомассы древостоев по составляющим фракциям по трудоемкости несопоставима с традиционной оценкой запасов стволовой древесины. Например, модели фитомассы дерева включают обычно до 4-5 определяющих факторов (таксационных показателей), требующих обеспечения ортогональности каждого из них. При числе факторов j и числе градаций n общее число необходимых модельных деревьев равно n^j . При $j = 4$ и минимальном значении $n = 5$ это составит 625 деревьев, каждое из которых необходимо фракционировать и взвесить с переводом на абсолютно сухое состояние.

Сказанное стимулирует поиск инвариантных соотношений между дендрометрическими и биопродукционными показателями деревьев и древостоев, или между легко замеряемыми показателями линейной меры и трудоемкими показателями фитомассы. В качестве одного из способов снижения трудоемкости натурных работ и ускоренного создания банков данных о фитомас-

се предложено применение физиологически обусловленных взаимосвязей на основе пайп-модели (Shinozaki et al., 1964; Усольцев, 1997). Одно из аналитических выражений последней, представляющее аллометрическую зависимость i -ой фракции фитомассы кроны в абсолютно сухом состоянии p_i (кг) от диаметра ствола у ее основания d_{bc} (см)

$$\ln p_i = a_0 + a_1 \ln d_{bc}, \quad (211)$$

характеризуется высоким коэффициентом детерминации и мало зависит от других таксационных показателей деревьев и древостоев (Усольцев, Сальников, 1993; Усольцев и др., 1994б; Усольцев, 1997).

К. Шинозаки с соавторами (Shinozaki et al., 1964) установили, что зависимость (211) является инвариантной не только относительно возраста и условий произрастания, но и в пределах различных популяций одной древесной породы — березы (*Betula platyphylla japonica*, *B. Maximowiczii*, *B. Ermani*). Аналогичную зависимость (211), общую для четырех популяций — *B. pendula* (Ленинградская область), *B. subarctica* Orlova, *B. tortuosa* Ledeb. (Мурманская обл.), *B. dahurica* Pall. (Приморский край), вывели М. В. Козлов и И. В. Соколова (1984). С. Г. Рождественский с соавторами (1991) показали, что зависимость (211) является общей для массы листвы двух пород — березы и осины.

Инвариантность зависимости (211), ее общность на втором уровне приближения подтвердились для массы листвы березы и осины Урала, Казахского мелкосопочника и Тургайского прогиба (Усольцев, Сальников, 1993; Усольцев и др. 1994б). В настоящем исследовании выделены две уральские популяции берез и дополнительно привлечены литературные данные о массе листвы трех видов берез Японии (Shinozaki et al., 1964), а также уравнения для массы листвы березы и осины подзоны южной тайги Поволжья (Рождественский и др., 1991). Методическая неточность при обмере ветвей и стволов берез, допущенная М. В. Козловым и И. В. Соколовой (1984), не позволила включить эти данные в настоящий анализ. Все данные ложатся в узком поле рассеяния, без видимого расхождения данных как между популяциями берез, так и между биологически близкими породами — березой и осиной (рис. 65, I, на вкладке), что подтверждается статистически ($t = 0,4...1,5 < t_{0,5} = 2,0$).

Обобщенное уравнение для массы листвы березы и осины имеет вид (Усольцев, 1997)

$$\ln p_f = -4,0912 + 2,0650 \ln d_{bc}; R^2 = 0,924. \quad (212)$$

Ель и пихта обозначены бинарными фиктивными переменными: для пихты $X_1 = 0$, для ели $X_1 = 1$. Масса хвои естественных сосняков Тургайского прогиба сравнивается в одном случае с массой хвои культур (разное происхождение в пределах региона), а в другом — с массой хвои естественных сосняков Урала (разные регионы). Поэтому она выбрана в качестве отправной выборки, относительно которой выявляется достоверность различия других популяций: $X_1 = 0, X_2 = 0$ — для естественных сосняков Тургайского прогиба; $X_1 = 1, X_2 = 0$ — для культур сосны, там же и $X_1 = 0, X_2 = 1$ — для естественных сосняков Среднего Урала. Массивы экспериментальных данных ели и пихты Среднего Урала и сосны двух регионов, в том числе разного происхождения, обработаны согласно уравнению

$$\ln p_f = a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2 + a_3 \ln d_{bc}. \quad (213)$$

Полученные результаты свидетельствуют об очень тесной связи не только массы листвы березы и осины (212), но и массы хвои ели, пихты и сосны — с диаметром ствола d_{bc} , объясняющим не менее 92 % изменчивости массы хвои. Отсутствуют различия по массе хвои между елью и пихтой (см. рис. 65, II) ($t = 0,5 < 2,0$) и между тремя популяциями сосны (см. рис. 65, III) ($t = 1,9 < 2,0$), что позволяет констатировать их инвариантность на втором уровне приближения и вывести модели, общие для популяций пихты и ели (Усольцев, 1997)

$$\ln p_f = -3,9589 + 2,3225 \ln d_{bc}; R^2 = 0,965; \quad (214)$$

и для всех популяций сосны (Усольцев и др. 1998)

$$\ln p_f = -4,0122 + 2,2138 \ln d_{bc}; R^2 = 0,933. \quad (215)$$

Использование взаимосвязи (211) при оценке фитомассы крон обеспечивает снижение трудозатрат при создании банка данных о фитомассе лесов. Это снижение определяется тем, что отпадает необходимость получения экспериментальных данных фитомассы по всем диапазонам возраста и эколого-ценотичес-

ких условий. Поскольку измерение диаметра d_{bc} связано с некоторыми трудностями, он может быть определен косвенным путем — через связь с диаметром на высоте груди d . Тогда исходная взаимосвязь (211) рассчитывается на ограниченном экспериментальном материале, а изменение зависимости d_{bc} от диаметра ствола на высоте груди d исследуется по всем названным выше диапазонам определяющих факторов. Снижение трудоемкости создания банка данных о фитомассе обеспечивается, таким образом, тем, что процедура фракционирования и взвешивания нескольких сотен модельных деревьев заменяется измерением их диаметров d_{bc} и d и использованием уравнений (212), (214) и (215), что несопоставимо по трудоемкости операций (Усольцев, 1997).

Трудоемкость составления банка данных о фитомассе лесов может быть существенно снижена также путем оптимизации объема экспериментальных данных при расчете зависимости (211). В наших предыдущих работах (Усольцев, Сальников, 1993; Усольцев и др., 1994 г.; Усольцев, 1997) показано, что средняя из 10 повторностей ошибка определения массы кроны по уравнению (211), рассчитанному по 20—40 модельным деревьям, и ошибка того же уравнения, рассчитанная по полным массивам (110—270 деревьев), практически одинаковы. Однако такое сопоставление не совсем корректно, поскольку ошибка уравнения (211), рассчитанная по всему массиву, сравнивалась с усредненной ошибкой уравнений (211), рассчитанных по 10 повторностям сокращенного массива, а не с ошибкой одной повторности.

Нами предлагается усовершенствованный подход к оптимизации объема экспериментальных данных на примере оценки массы крон березы по уравнению (211) с использованием специальных алгоритмов и программного обеспечения. Алгоритм расчета оптимального объема экспериментальных данных содержит шесть основных шагов:

1) вычисление модели (211) по полному массиву экспериментальных данных и расчет относительной (безразмерной) ошибки (Уткин и др., 1988):

$$\Delta' = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_{pi} - y_{phi})^2}}{\bar{y}_p \cdot (n - k)}, \quad (216)$$

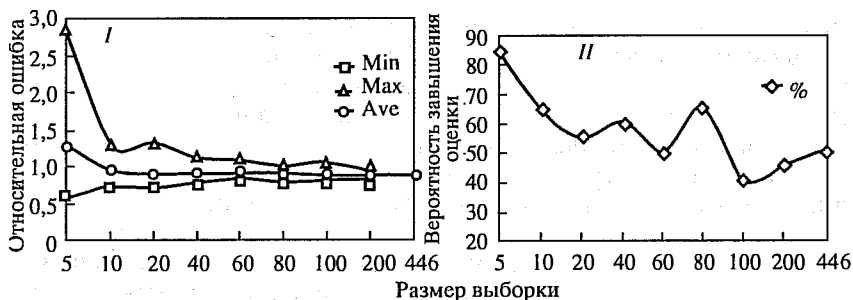


Рис. 66. Относительная ошибка (I) и вероятность завышения (II) оценки фитомассы листы по уравнению (211). Показаны диапазон варьирования от максимальных (max) до минимальных (min) ошибок и усредненный тренд (ave) в пределах 20 повторностей каждой выборки (5, 10, 20...200 наблюдений)

где y_{pi} и y_{phi} — соответственно расчетные и фактические значения зависимой переменной; n — число пар наблюдений; k — число коэффициентов уравнения; \bar{y}_p — среднее расчетное значение зависимой переменной;

2) формирование случайных выборок из полного массива экспериментальных данных объемом 5, 10, 20, 40, 60, 80, 100 и 200 наблюдений в 20 повторностях каждая;

3) вычисление моделей (211) по каждой повторности случайных выборок объемом 5, 10, 20, ..., 200 наблюдений;

4) табулирование моделей, полученных на предыдущем этапе, по значениям независимой переменной модели (211) исходного массива экспериментальных данных, и расчет ошибок для каждой из 20 повторностей каждого объема случайной выборки (5, 10, 20, ..., 200);

5) вычисление значений максимальной, минимальной и средней величин относительной ошибки по формуле (216) из 20 повторностей для каждого (5, 10, 20, ..., 200) объема случайной выборки и формирование соответствующего массива данных для построения графиков (рис. 66, I);

6) вычисление значений вероятности завышения относительной ошибки для 20 случайных выборок каждого объема (5, 10, 20, ..., 200) путем вычисления отношения количества значений ошибок, превышающих ошибку модели, рассчитанную по всему массиву экспериментальных данных, к количеству значений ошибок, не превышающих ошибку названной модели; формиро-

вание соответствующего массива данных для построения графиков (см. рис. 66, II).

Формирование случайных выборок для регрессионного анализа, расчет ошибок и формирование массивов данных для построения графиков выполнены по программам, написанным А. А. Сальниковым на языке Systat BASIC статистико-графического пакета Systat for Windows версии 5.0. Графики построены с помощью MS Excel 7.0.

Из общего массива данных по 446 деревьям (см. рис. 65, I) с помощью генератора нормальных случайных чисел набраны в 20-кратной повторности выборки объемом 5, 10, 20, 40, 60, 80, 100, 200 деревьев, по каждой выведены уравнения, аналогичные (211), и после табулирования каждого по исходному массиву из 446 деревьев рассчитаны ошибки. Наиболее резко средняя величина ошибки снижается при увеличении выборки с 5 до 20 деревьев. На рис. 66, I приведены средняя, максимальная и минимальная из 20 повторностей величины ошибок. При увеличении выборки с 20 до 200 деревьев среднее значение ошибки и диапазон ее варьирования уменьшаются, но очень незначительно.

Чтобы конкретизировать величину минимальной выборки модельных деревьев для расчета уравнения (211) без снижения его точности в сравнении с полной выборкой из 446 деревьев, введен показатель вероятности завышения ошибки (%). Ошибка в каждой из 20 повторностей в каждой выборке (5, 10, 20 и т. д. деревьев) сопоставлялась с ошибкой уравнения (211), полученной по всему массиву 446 деревьев. Предполагалось, что в последнем случае вероятность завышения равна вероятности занижения оценки, т. е. 50 %. На рис. 66, II по оси ординат отложено число случаев в (%) из 20 повторностей, в которых ошибка уравнения (211) по каждой повторности больше ошибки уравнения (211), рассчитанного по полному массиву. Эта величина названа вероятностью завышения ошибки. Очевидно, что для оценки массы листвы по уравнению (211) достаточно 50—60 деревьев.

Таким образом, при расчете уравнений (211) взятие числа деревьев свыше 60 теряет практический смысл, поскольку при дальнейшем увеличении выборки точность уравнения не повышается.

6.3. ИЗМЕНЕНИЕ ПРОДУКТИВНОСТИ ХВОИ В СВЯЗИ С АТМОСФЕРНЫМ ЗАГРЯЗНЕНИЕМ И ЕГО ОЦЕНКА НА ОСНОВЕ ПРОДВИНУТОЙ ПАЙП-МОДЕЛИ

Физиология ксилемного транспорта видоспецифична. У расеянно-сосудистых березы и осины вода проводится как периферийными, так и внутренними годичными слоями, как ранней, так и поздней древесины (Раскатов, 1964). У кольцесосудистых (в частности у сосны) площадь сечения заболони, активно участвующей в водоснабжении хвои, ограничивается несколькими внешними годичными слоями, а остальная часть заболони выполняет функцию резервуара влаги (Иванов, Дубинин, 1992). Можно предположить, что площадь сечения (диаметр) ствола под кроной характеризует лишь потенциальную влагообеспеченность хвои, а фактическое влагопотребление определяется соотношением зон транзита и депонирования влаги. В этом случае, чем выше названное соотношение, тем интенсивнее идут процессы фотосинтеза и отложения ассимилятов в виде прироста ствола.

Чтобы выяснить, действительно ли остаточное варьирование массы хвои по пайп-модели объясняется неучтенным эффектом флоэмного транспорта, обратимся к экспериментальным данным по сосне Тургайского прогиба (рис. 67). Часть поля рассеяния точек, лежащая выше линии регрессии (см. рис. 67, А), представлена деревьями с высоким радиальным приростом ствола на высоте груди, а часть, лежащая ниже названной линии, — деревьями со значительно меньшим радиальным приростом. При $d_{bc} = 4$ см снижение радиального прироста с 1,8 до 0,1 мм соответствует сокращению массы хвои с 0,60 до 0,16 кг, а при $d_{bc} = 9$ см соответствующие цифры составляют 0,9 и 0,1 мм по приросту и 4,3 и 0,9 кг — по массе хвои. Следовательно, пайп-модель (211) занижает массу хвои у деревьев высокой жизнеспособности и завышает — у деревьев низкой жизнеспособности: при одной и той же потенциальной влагообеспеченности хвои дерева (или величине d_{bc}) ее масса в значительной степени связана с интенсивностью отложения радиального прироста. Последняя зависимость показана на рис. 67, Б.

Однако количество депонируемых в стволе ассимилятов определяется не только радиальным приростом, но и диаметром ствола на высоте груди d . Часть поля рассеяния точек, лежащая

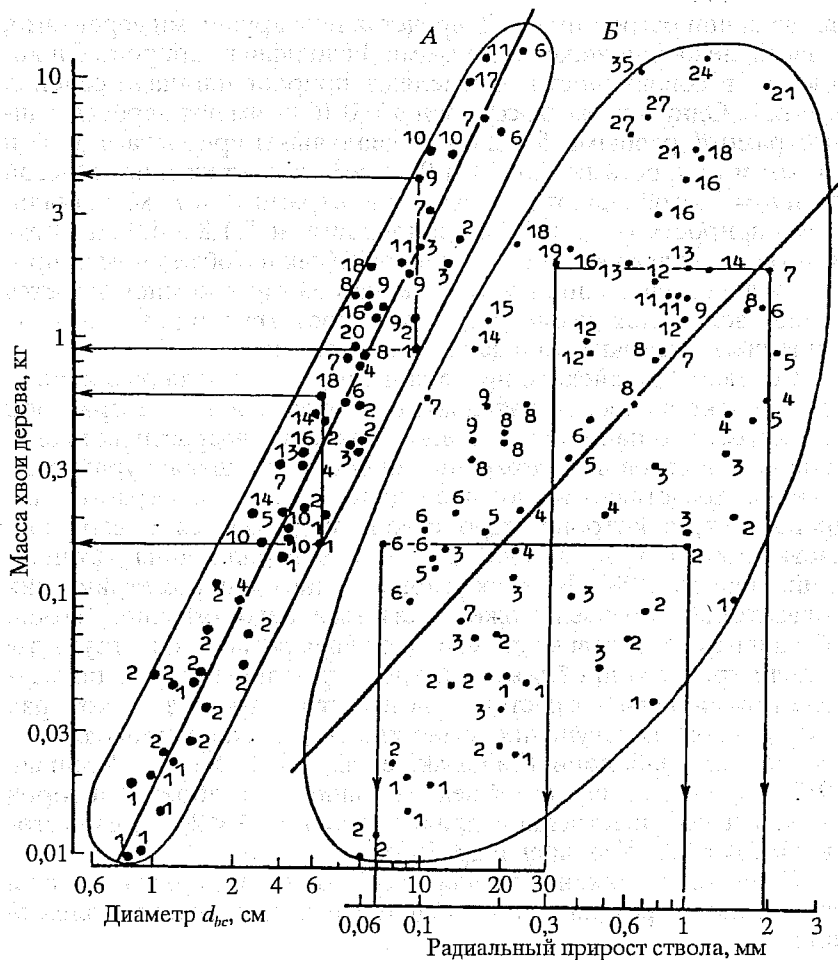


Рис. 67. Логарифмическая зависимость массы хвои в сосняках Тургайского прогиба: А — от диаметра ствола у основания кроны (цифры обозначают радиальные приросты на высоте груди в десятых долях миллиметра), В — от радиального прироста на высоте груди (цифры обозначают диаметры ствола на высоте груди, см) (пояснения в тексте)

выше линии регрессии $p_f \sim Z$, представлена крупными деревьями, а часть, лежащая ниже — мелкими. Радиальный прирост Z и диаметр d в совокупности определяют прирост площади сечения $Z_g \approx \pi dZ$. Одну и ту же массу хвой $p_f = 0,16$ кг имеют деревья с диаметрами d , равными 6 и 2 см, радиальными приростами 0,07 и 1,0 мм и приростами Z_g 0,13 и 0,63 см^2 соответственно. Массой хвой $p_f = 2$ кг обладают деревья с диаметрами 19 и 7 см, радиальными приростами 0,3 и 1,8 мм и приростами Z_g 1,8 и 4,0 см^2 соответственно. Расхождение в величине Z_g (как и в объемном приросте) у деревьев с одной и той же массой хвой компенсируется разной величиной диаметров d_{bc} и соответственно разным соотношением зон транзита и депонирования влаги.

Сосняки Тургайского прогиба и Среднего Урала различаются не только по лесорастительным условиям, но и по возрастной структуре, что нашло отражение в различии возрастных диапазонов древостоев на заложенных пробных площадях: уральские сосняки представлены большей долей спелых и перестойных древостоев, в которых ядро ствола поднимается в верхнюю часть кроны и по ветвям доходит до периферии кроны (Вомперский, Иванов, 1984). В таких условиях одних дендрометрических показателей деревьев может оказаться недостаточно. Чтобы обеспечить сопоставимость сосняков двух регионов, в структуру модели третьего приближения, кроме названных выше показателей, включены возраст дерева и густота древостоя, которая при сильном перегущении существенно снижает проводящую способность заболони (Shinozaki et al., 1964; Keane, Weetman, 1987). Однако на наших объектах значимость обоих факторов оказалась не существенной: для возраста $t = 0,1 < 2,0$ и для густоты $t = 0,4 < 2,0$ (Усольцев и др. 1998).

С учетом изложенного, для массы хвой ели, пихты и сосны предлагается трехфакторная модель третьего уровня приближения:

$$\begin{aligned} \ln p_f = & a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2 + a_3 \ln d_{bc} + a_4 \ln d + a_5 \ln Z + \\ & + a_6 (\ln d) (\ln d_{bc}) + a_7 (\ln Z) (\ln d) + a_8 (\ln Z) (\ln d_{bc}) + \\ & + a_9 (\ln Z) (\ln d_{bc})^3, \end{aligned} \quad (217)$$

где d и Z — соответственно диаметр (см) и годичный радиальный прирост ствола (мм) на высоте груди, средний за последние 5 лет.

Характеристика уравнений (217)

a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	a_8	a_9	R^2
Сосняки Урало-Тургайского региона										
-3,540	$\frac{-}{0,5}$	$\frac{0,163}{3,8}$	$\frac{1,307}{12,5}$	$\frac{0,615}{8,1}$	$\frac{0,340}{6,6}$	$\frac{-}{-}$	$\frac{0,121}{2,6}$	$\frac{-0,205}{3,2}$	$\frac{0,020}{3,6}$	0,957
Еловые и пихтовые древостои Среднего Урала										
-4,651	$\frac{-}{0,4}$	$\frac{-}{-}$	$\frac{2,202}{9,8}$	$\frac{0,737}{4,1}$	$\frac{-}{-}$	$\frac{-0,142}{2,3}$	$\frac{0,045}{2,8}$	$\frac{-}{-}$	$\frac{-}{-}$	0,967

Примечание. В числителе — константы, в знаменателе — их значимость.

Принятая в уравнении (213) кодировка переменных X_1 и X_2 , в уравнениях (217) сохранена. Результаты расчета показывают (табл. 49), что коэффициенты детерминации уравнений (217), объясняющих изменчивость массы хвой совмещенным эффектом ксилемного и флоэмного транспорта, выше, чем уравнений пайп-модели (214) и (215). Особенно существенное повышение у сосны ($0,957 > 0,933$). По массе хвой деревьев ели и пихты в пределах Среднего Урала различий не выявлено ($t = 0,4 < 2,0$). Нет также расхождений в массе хвой культур сосны и естественных сосняков Аман-Карагайского бора в Тургайском прогибе ($t = 0,5 < 2,0$). Это означает, что при одинаковой площади заболони на единицу прироста ствола приходится одна и та же масса хвой у ели и у пихты. Не различаются по показателю продуктивности хвой также естественные сосняки и культуры в пределах региона. При одном и том же диаметре d и при одном и том же d_{bc} с увеличением радиального прироста в 17 раз продуктивность хвой у ели и пихты возрастает в 10—11 раз, а у сосны — всего в 3—4 раза. В целом продуктивность хвой у теневыносливых ели и пихты ниже, чем у светолюбивой сосны, но только у деревьев низкой энергии роста ($Z = 0,2—1,0$ мм) (табл. 50), а у деревьев высокой жизнеспособности ($Z = 2,6—3,4$ мм) — наоборот. При одном и том же приросте площади сечений с увеличением d_{bc} в 3 раза продуктивность хвой снижается у ели и пихты в 6—7 раз, а у сосны — в 3—5 раз. Это подтверждает наше предположение, что диаметр ствола под кроной (площадь проводящей заболони) характеризует лишь потенциальную продуктивность хвой, опи-

Таблица 50

**Масса и продуктивность хвой в зависимости от диаметра ствола
у основания кроны, диаметра
и радиального годичного прироста на высоте груди**

$d_{\text{гр}}, \text{ см}$	Ширина годичного слоя (мм), средняя за последние 5 лет									
	0,2	1,0	1,8	2,6	3,4	0,2	1,0	1,8	2,6	3,4
Сосна Тургайского прогиба $d = 24 \text{ см}$ Сосна Среднего Урала										
8	<u>1,4</u> 343	<u>3,1</u> 774	<u>4,1</u> 1051	<u>4,9</u> 1273	—	<u>1,7</u> 282	<u>3,7</u> 649	<u>4,8</u> 900	<u>5,8</u> 1076	—
12	<u>2,3</u> 209	<u>5,3</u> 453	<u>7,2</u> 600	<u>8,7</u> 717	<u>10,0</u> 816	<u>2,7</u> 178	<u>6,2</u> 387	<u>8,4</u> 514	<u>10,2</u> 612	<u>11,7</u> 697
16	<u>3,0</u> 160	<u>7,6</u> 316	<u>10,8</u> 400	<u>13,4</u> 466	<u>15,6</u> 523	<u>3,5</u> 137	<u>9,0</u> 267	<u>12,7</u> 340	<u>15,7</u> 397	<u>18,3</u> 446
20	<u>3,6</u> 133	<u>10,3</u> 233	<u>15,0</u> 288	<u>19,0</u> 328	<u>22,6</u> 361	<u>4,3</u> 112	<u>12,1</u> 198	<u>17,6</u> 245	<u>22,4</u> 279	<u>26,6</u> 307
24	—	<u>13,0</u> 185	<u>19,8</u> 218	<u>25,7</u> 243	<u>31,1</u> 262	—	<u>15,3</u> 157	<u>23,3</u> 185	<u>30,2</u> 207	<u>36,6</u> 223
$d = 40 \text{ см}$										
8	<u>1,8</u> 444	<u>4,3</u> 930	<u>5,8</u> 1241	<u>7,1</u> 1465	—	<u>2,1</u> 381	<u>5,0</u> 800	<u>6,9</u> 1043	<u>8,4</u> 1238	—
12	<u>2,8</u> 286	<u>7,2</u> 555	<u>10,2</u> 706	<u>12,6</u> 825	<u>14,7</u> 925	<u>3,3</u> 242	<u>8,5</u> 471	<u>12,0</u> 600	<u>14,8</u> 703	<u>17,3</u> 786
16	<u>3,7</u> 216	<u>10,5</u> 381	<u>15,3</u> 471	<u>19,4</u> 536	<u>23,0</u> 591	<u>4,4</u> 182	<u>12,4</u> 322	<u>18,0</u> 400	<u>22,8</u> 456	<u>27,1</u> 502
20	<u>4,5</u> 178	<u>14,1</u> 284	<u>21,3</u> 338	<u>27,6</u> 377	<u>33,3</u> 408	<u>5,3</u> 151	<u>16,6</u> 241	<u>25,1</u> 287	<u>32,5</u> 320	<u>39,3</u> 346
24	—	<u>17,9</u> 223	<u>28,1</u> 256	<u>37,3</u> 279	<u>45,9</u> 296	—	<u>21,0</u> 190	<u>33,1</u> 217	<u>43,9</u> 237	<u>54,0</u> 252
$d = 56 \text{ см}$										
8	<u>2,1</u> 533	<u>5,2</u> 1077	<u>7,4</u> 1362	—	—	<u>2,4</u> 467	<u>6,1</u> 918	<u>8,6</u> 1172	—	—
12	<u>3,3</u> 339	<u>8,9</u> 629	<u>12,8</u> 788	<u>16,1</u> 904	—	<u>3,8</u> 295	<u>10,4</u> 538	<u>15,1</u> 668	<u>18,9</u> 770	—
16	<u>4,3</u> 260	<u>12,9</u> 434	<u>19,3</u> 522	<u>24,8</u> 587	—	<u>5,1</u> 220	<u>15,2</u> 368	<u>22,7</u> 444	<u>29,2</u> 499	—
20	—	<u>17,3</u> 324	<u>26,8</u> 376	<u>35,3</u> 412	—	—	<u>20,4</u> 275	<u>31,6</u> 319	<u>41,5</u> 351	—

$d_{\text{бер}}$ см	Ширина годичного слоя (мм), средняя за последние 5 лет									
	0,2	1,0	1,8	2,6	3,4	0,2	1,0	1,8	2,6	3,4
Ель и пихта Среднего Урала										
$d = 24$ см					$d = 40$ см					
8	3,0 160	3,8 625	4,1 1000	4,3 1429	—	3,6 222	4,7 833	5,2 1429	5,6 2000	—
16	10,1 48	12,7 189	13,9 312	14,6 435	15,2 526	11,6 69	15,2 263	16,7 435	17,8 588	18,6 714
24	—	25,9 93	28,1 154	29,7 208	30,8 263	—	30,0 133	33,0 217	35,1 294	36,7 370
$d = 56$ см										
8	—	—	—	—	—	4,1 270	5,5 1000	6,1 1667	6,5 2500	—
16	—	—	—	—	—	12,7 88	17,0 333	18,9 526	20,2 714	21,2 909
24	—	—	—	—	—	—	33,0 169	36,7 278	39,2 370	41,1 455

Примечание. В числителе — масса хвои, кг, в знаменателе — продуктивность хвои, см²/г.

сываемую пайп-моделью, а фактическая ее продуктивность при одном и том же $d_{\text{бер}}$ связана с приростом ствола.

При сравнении массы хвои естественных сосняков двух регионов выявлены существенные расхождения ($t = 3,8 > 2,0$) (В. Усольцев, А. Усольцев, 1996б): при фиксированных значениях диаметров и приростов стволов масса хвои в сосняках Урала на 17—18 % выше, чем в Тургае, а ее продуктивность — соответственно ниже (см. табл. 50). Известно, что в жестких условиях произрастания (годовые осадки в Тургайском регионе составляют 250—300 мм) продуктивность хвои ниже, чем в оптимальных, т. е. для отложения единицы прироста ствола требуется большая ассимилирующая масса. Мы получили противоположный результат, который может быть обусловлен относительной близостью источников загрязнений на среднеуральских объектах, хотя признаков деградации хвои и древостоев при визуальном обследовании не выявлено. Установлено, что по мере приближения к заводу азотных удобрений в Йонаве (Литва) с расстояния 15 км (контроль, отсутствие визуальных признаков де-

градации) до 8 км продуктивность хвой сосны, выражаемая отношением объемного прироста ствола к массе хвой, у деревьев I—III классов роста снижается на 30 % (Сидаравичюс, 1985). В исследовании устойчивости лесных насаждений к воздействию промышленных выбросов аммиачно-сернистого производства контрольные пробные площади были заложены на расстоянии 40 км от источника выбросов (Пастернак и др., 1985). Поэтому есть основания предполагать, что выявленная пониженная продуктивность хвой в сосняках, расположенных в 10—20 км от экоцидных промышленных предприятий Среднего Урала, объясняется вредным воздействием выбросов на ассимиляционный аппарат на допороговом уровне загрязнения.

6.4. ОЦЕНКА ФИТОМАССЫ ПО ВОЗРАСТНЫМ СЛОЯМ КРОНЫ В ЕСТЕСТВЕННЫХ СОСНЯКАХ И КУЛЬТУРАХ

Согласно теории пайп-модели (Huber, 1927; Shinozaki et al., 1964), растение рассматривается как совокупность элементарных трубок (сосудов ксилемы), каждая из которых завершается элементарной массой листы и выполняет влагопроводящие и поддерживающие функции. Поэтому, если разделить крону на несколько слоев и последовательно просуммировать массу листы по слоям в направлении от вершины к основанию кроны, то полученные кумулятивные значения будут пропорциональны значениям массы нефотосинтезирующих тканей каждого слоя. Иными словами, площадь сечения или диаметр ствола d_i на данном горизонтальном уровне пропорциональны кумулятивной массе листы выше этого уровня p_i и имеет место инвариантная взаимосвязь $p_i = f(d_i)$.

С другой стороны, гипотеза единства формы стволов (Захаров, 1955) обеспечивает инвариантность зависимости диаметра d_i от диаметра ствола на $1/10$ его высоты $d_{0,1}$, т. е. $d_i = f(d_{0,1})$. Совмещение названных двух концепций обеспечивало бы инвариантность внутрикранового распределения фитомассы благодаря наличию рекурсивной цепочки простых взаимосвязей: $d_i = f(d_{0,1}) \rightarrow p_i = f(d_i)$. Поскольку известно, что продуктивность ассимиляционного аппарата изменяется по вертикальному профилю полого, можно было бы в итоге иметь простую инвариантную модель биопродуктивности как полого в целом, так и любого его слоя. В дальнейшем такая модель могла быть адаптирована к де-

ревьям и древостоям различного физиологического состояния по градиенту атмосферного загрязнения.

Гипотеза проверена на 17 модельных деревьях сосны обыкновенной на Среднем Урале, взятых на 10 пробных площадях, заложенных в экологическом ряду сосняков от разнотравных до осоково-болотных (Усольцев, 1997). Выявлены устойчивые зависимости, как для p_f , так и для d_i , однако та и другая имели многофакторную природу и оказалось целесообразным расчленять крону не по градациям d_i , а по ее возрастным слоям. В настоящее время изложенный подход получил дальнейшее развитие. Предлагается математическое описание внутрикоронового распределения фитомассы в сосняках естественного и искусственного происхождения бора Аман-Карагай в сопоставлении с аналогичными данными для естественных сосняков Среднего Урала, подверженных атмосферному загрязнению (В. Усольцев, А. Усольцев, 1996б).

Внутрикороновое распределение кумулятивных значений массы хвои и скелета ветвей в сосняках Среднего Урала по экспериментальным данным 17 деревьев определялось, кроме диаметра ствола у основания мутовки d_i (см), также возрастом мутовки A_i (лет) и возрастом дерева A (лет) (Усольцев, 1997). Модельные деревья взяты не по всем ступеням толщины, и поэтому нельзя было выявить влияние центрического положения дерева (т. е. диаметра на высоте груди d , см) на распределение фитомассы кроны. При этом возраст дерева A и диаметр ствола d оказались тесно коррелированными признаками и один из них (диаметр d) оказался статистически не значимым. Вследствие малого числа модельных деревьев не выявлено также влияния добротности местопроизрастания (класса бонитета) на названное распределение, хотя экспериментальный материал представлен в широком диапазоне лесорастительных условий.

С учетом изложенного, для аналитического описания внутрикоронового распределения фитомассы по экспериментальным данным 1716 и 1830 мутовок соответственно в естественных сосняках и культурах принята регрессионная многофакторная модель общего вида

$$p_b = f(d_i, A_i, d, A, H_{100}), \quad (218)$$

где p_b — кумулятивная масса всех ветвей мутовки в абсолютно сухом состоянии, кг; H_{100} — класс бонитета, выраженный сред-

ней высотой древостоя (м) в 100-летнем возрасте, согласно бонитетной шкале М. М. Орлова.

Для "гармонизации" показателей фитомассы ветвей и хвои в уравнение для массы хвои дополнительно введен в качестве независимой переменной показатель массы ветвей p_b .

$$p_f = f(d_i, A_i, d, A, H_{100}, p_b). \quad (219)$$

На основе содержательного анализа экспериментальных данных подобрана структура линеаризованных регрессионных моделей:

$$\begin{aligned} \ln p_b = & a_0 + a_1 \ln d_i + a_2 \ln A_i + a_3 \ln d + a_4 (\ln d)^2 + a_5 \ln d_i \ln A_i + \\ & + a_6 \ln A_i \ln A + a_7 \ln d \ln A + a_8 \ln d \ln A_i + a_9 \ln d_i \ln A + \\ & + a_{10} \ln d_i \ln d + a_{11} \ln H_{100} + a_{12} \ln H_{100} \ln A_i + a_{13} \ln H_{100} \ln d + \\ & + a_{14} \ln H_{100} \ln d_i; \end{aligned} \quad (220)$$

$$\ln p_f = a_0 + \dots + a_{15} \ln p_b \ln A_i + a_{16} \ln p_b \ln d_i. \quad (221)$$

Константы уравнений (220) и (221) значимы на уровне t_{05} (табл. 51). Модели (220) и (221) действительны для всего исследованного диапазона возрастов и лесорастительных условий естественных сосняков и культур бора Аман-Карагай. Они могут быть реализованы на любом растущем дереве. Зная его возраст, диаметр на высоте груди, класс бонитета древостоя и задавая возраст мутовки, можно иметь распределение фитомассы по мутовкам или их совокупностям (возрастным слоям кроны), если известны диаметры ствола у основания соответствующих мутовок d_i .

Содержательный анализ экспериментальных данных показал, что диаметр d_i определяется несколькими факторами, в том числе возрастом мутовки A_i . Соотношение $d_i = f(A_i)$ зависит от возраста A и диаметра d дерева. Рассчитаны трехфакторные уравнения для естественных сосняков (Усольцев и др., 1997):

$$\begin{aligned} \ln d_i = & 5,898 + 0,430 \ln A_i \ln A - 0,220 \ln A_i \ln d - 3,275 \ln A + \\ & + 0,154 (\ln A)^2 + 1,205 \ln d; \end{aligned} \quad (222)$$

$$R^2 = 0,825; SE = 0,593;$$

Таблица 51

Характеристика уравнений (220) и (221)

Фракция фитомассы (по уравнениям)	Константы								
	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	a_8
Естественные сосняки									
Ветви (220)	5,622	1,129	—	1,319	0,176	0,274	0,377	-0,731	—
Хвоя (221)	-6,058	-1,286	2,484	3,852	0,211	-0,355	-0,304	-0,409	-0,140
Культуры									
Ветви (220)	1,394	2,498	—	-3,364	—	0,098	-0,389	—	—
Хвоя (221)	1,063	1,550	2,872	-1,920	0,112	-0,643	-0,663	-0,290	0,269

Фракция фитомассы (по уравнениям)	Константы									R^2	SE
	a_9	a_{10}	a_{11}	a_{12}	a_{13}	a_{14}	a_{15}	a_{16}			
Естественные сосняки											
Ветви (220)	—	—	—	-0,244	0,421	—	—	—	0,946	0,727	
Хвоя (221)	0,380	—	0,554	—	-0,705	0,304	0,249	-0,026	0,933	0,669	
Культуры											
Ветви (220)	0,282	0,187	-2,010	0,406	1,176	-0,548	—	—	0,901	0,647	
Хвоя (221)	0,528	-0,306	-1,380	—	0,853	-0,313	0,266	0,076	0,889	0,574	

и для культур

$$\begin{aligned}
 \ln d_i = & -0,555 + 0,237 \ln A_i \ln A + 0,115 \ln A_i \ln d - \\
 & -0,032 (\ln A_i)^3 + 0,007 (\ln A_i)^3 \ln A + 1,165 \ln A - 0,435 (\ln A)^2 + \\
 & + 0,355 \ln d; R^2 = 0,788; SE = 0,371. \quad (223)
 \end{aligned}$$

Уравнения (220) и (222), а также (221) и (223) образуют рекурсивные системы, в которых зависимая переменная второго (d_i) входит в первое в качестве одной из независимых переменных. Многомерное пространство факторов в предложенных моделях отличается недостаточной наглядностью и довольно сложно для восприятия. Поэтому в качестве иллюстрации влияния каждого фактора на результирующий признак в системе уравнений рассмотрим пример практической реализации рекурсивных систем (220)—(222) и (221)—(223). В моделях (220) и (221) три определяющих фактора — класс бонитета H_{100} , возраст дерева A

и ступень толщины ствола d — задаются с любой степенью дробности (табл. 52). Четвертый фактор — возраст мутовки A_i — тоже задается с требуемой степенью дробности, в нашем случае принят период 5 лет. При табулировании моделей (220) и (221) кумулята распределения массы кроны с заданными параметрами дерева и древостоа ограничивается предельным возрастом нижнего уровня кроны дерева, или возрастом кроны A_k (лет).

Возраст кроны — важная биоэкологическая и таксационная характеристика дерева (Лебков, 1993; Нагимов, Сальникова, 1997). Исследование зависимости возраста кроны от определяющих факторов имеет непосредственное отношение к закономерности распределения фитомассы кроны по возрастным слоям: чем больше возраст кроны при одной и той же фитомассе, тем более растянут ряд распределения. Аналогичная закономерность предполагается у деревьев с одним и тем же возрастом кроны по мере снижения общей ее фитомассы (Усольцев, 1997). Возраст кроны A_k в естественных сосняках и культурах бора Аман-Карагай определяется тремя факторами — возрастом дерева A , диаметром d и добротностью местопроизрастания H_{100} — согласно уравнений:

для естественных сосняков

$$\ln A_k = 3,626 + 0,098 \ln A \ln d - 0,544 \ln H_{100}; \quad (224)$$

$$R^2 = 0,627; SE = 0,290;$$

и для культур

$$\ln A_k = 4,800 + 0,079 \ln A \ln d - 0,879 \ln H_{100}; \quad (225)$$

$$R^2 = 0,474; SE = 0,227.$$

В табл. 52 колонка значений A_i для каждой ступени толщины ограничена снизу значением A_k , рассчитанным по уравнениям (224) и (225) и округленным до 5 лет.

Колонка значений d_i в табл. 52 получена расчетным путем по задаваемым значениям предыдущих колонок — A , d и A_i . Для каждой ступени толщины она ограничена снизу значением диаметра ствола у основания кроны d_{bc} (см), который, как и d_i , получен по уравнениям (222) и (223) путем подстановки вместо A_i воз-

Таблица 52
 Фрагменты результатов табулирования рекурсивных систем (220)—(222)
 и (221)—(223)

A, лет	d, см	A _г (A _г), лет	d _г (d _{гс}), см		Кумулятивные показатели массы кроны, кг	
			Естественные сосняки	Культуры	Естественные сосняки	Культуры
I класс бонитета ($H_{100} = 28,5$ м)						
20	8	5	3,7	3,7	0,31/0,49	0,60/0,56
		10	6,6	6,5	1,35/1,60	1,54/1,59
		12	5	5,2	4,6	0,91/1,21
	12	10	8,8	8,3	3,83/4,02	4,41/3,86
		15	11,8	—	9,72/9,40	—/—
		16	5	6,7	5,4	2,04/2,42
	16	10	10,7	9,9	8,32/8,12	9,54/7,41
		15	14,1	—	20,5/19,2	—/—
		50	12	5	1,3	1,3
10	2,9			2,8	0,22/0,25	0,85/0,16
15	4,5			4,4	0,78/0,69	1,55/0,33
20	5	5	2,0	1,7	0,10/0,19	1,14/0,10
		10	4,1	3,8	0,64/0,75	3,50/0,48
		15	6,2	6,2	2,14/1,97	6,96/1,16
28	20	5	8,3	—	5,29/4,33	—/—
		5	2,7	2,0	0,22/0,44	2,68/0,19
		10	5,2	4,7	1,36/1,65	9,17/1,04
15	7,6	7,7	4,36/4,29	19,4/2,75		
		10,0	10,8	10,5/9,30	33,3/5,37	
		III класс бонитета ($H_{100} = 21,5$ м)				
20	8	5	3,7	3,7	0,27/0,54	0,54/0,56
		10	6,6	6,5	1,24/1,68	1,39/1,66
		15	9,2	8,7	3,34/3,83	2,38/2,96
	12	5	5,2	4,6	0,76/1,38	1,27/1,05
		10	8,8	8,3	3,34/4,36	3,63/3,68
		15	11,8	11,4	8,72/9,98	6,59/7,16
	16	5	6,7	5,4	1,64/2,82	2,38/1,68
		10	10,7	9,9	7,02/9,01	7,34/6,61
		15	14,1	13,8	17,8/20,8	13,9/13,7
50	12	5	1,3	1,3	0,03/0,08	0,22/0,03
		10	2,9	2,8	0,20/0,30	0,60/0,11

Окончание табл. 52

A, лет	d, см	A _к (A _к), лет	d _к (d _к), см		Кумулятивные показатели массы кроны, кг	
			Естественные сосняки	Культуры	Естественные сосняки	Культуры
20		15	4,5	4,4	0,70/0,79	1,11/0,24
		20	6,3	6,0	1,83/1,74	1,73/0,43
		5	2,0	1,7	0,08/0,26	0,67/0,05
		10	4,1	3,8	0,53/0,92	2,16/0,30
		15	6,2	6,2	1,80/2,35	4,41/0,77
28		20	8,3	8,5	4,55/5,05	7,38/1,48
		5	2,7	2,0	0,17/0,61	1,45/0,09
		10	5,2	4,7	1,07/2,10	5,23/0,59
		15	7,6	7,7	3,54/5,25	11,4/1,69
		20	10,0	10,8	8,72/11,1	19,9/3,47
		25	12,3	14,0	18,1/21,2	30,9/5,98

Примечание. В числителе — скелет кроны (220), в знаменателе — хвоя (221).

раста кроны A_k . Далее рассчитываются кумулятивные показатели p_b и p_f по уравнениям (220) и (221) путем подстановки в них задаваемых и расчетных значений предыдущих колонок как независимых переменных.

Данные табл. 52 показывают, в какой мере определяющие факторы (входы в таблицу) объясняют изменчивость массы кроны как между деревьями, так и в пределах кроны по ее возрастным слоям. Подтверждается известная закономерность снижения массы кроны с возрастом у равновеликих по диаметру деревьев: в пределах одного класса бонитета деревья диаметром 12 см в возрасте 50 лет по отношению к возрасту 20 лет имеют массу кроны, меньшую в 6—10 раз, как в естественных сосняках, так и в культурах, как в пределах одного возрастного слоя, так и в кроне в целом. Независимо от класса бонитета, масса хвой равновеликих деревьев естественных сосняков по сравнению с культурами больше в 2—4 раза (для скелета кроны наоборот), как в кроне в целом, так и в пределах одного возрастного слоя. Возможная причина такого расхождения в том, что естественные сосняки имеют большую густоту, чем культуры того же возраста, вследствие этого равновеликие деревья в первом случае являются лидерами, а во вто-

Распределение фитомассы по возрастным слоям кроны в сомкнутых естественных 100-летних сосняках I класса бонитета бора Аман-Карагай (220—223) и Среднего Урала (Усольцев, 1997)

d, см	A _n (A _d), лет	d(d _к), см		Кумулятивные показатели массы кроны, кг	
		Аман-Карагай	Средний Урал	Аман-Карагай	Средний Урал
20	10	2,1	1,5	0,08/0,06	0,05/0,07
	20	5,2	2,8	1,02/0,45	0,29/0,26
	25	7,0	—	2,5/1,00	—/—
	30	—	4,5	—/—	1,09/0,68
	40	—	6,9	—/—	3,40/1,56
	50	—	10,3	—/—	9,48/3,27
	52	—	11,1	—/—	11,5/3,76
32	10	2,9	1,8	0,18/0,15	0,07/0,10
	20	6,7	3,3	2,12/1,09	0,44/0,39
	30	11,0	5,5	10,5/4,54	1,77/1,06
	40	—	8,7	—/—	5,75/2,48
	50	—	13,2	—/—	16,4/5,30
	60	—	19,5	—/—	43,1/10,6

Примечание. В числителе — ветви, в знаменателе — хвоя растений.

ром — кандидатами на отмирание. Расхождение в возрасте кроны в естественных сосняках и культурах при прочих равных условиях относительно невелико.

В предыдущем разделе показано, что при одних и тех же толщине ствола и радиальном приросте масса хвои у деревьев сосны на Среднем Урале на 18 % выше, чем в бору Аман-Карагай, что объяснялось наличием существенного атмосферного загрязнения (однако без видимых признаков деградации сосняков) на Среднем Урале. Следствие этого — пониженная продуктивность работы ассимиляционного аппарата. Сопоставление общей массы равновеликих деревьев в естественных сосняках названных регионов подтверждает эту тенденцию (табл. 53): общая масса хвои на Урале в 3—4 раза превышает таковую в бору Аман-Карагай. Если же сопоставить массу кроны по возрастным слоям, то соотношение будет обратное: в пределах одного возрастного слоя масса хвои равновеликих деревьев сосны на Урале в 2—

4 раза ниже, чем в бору Аман-Карагай. Вследствие того, что возраст кроны на Урале вдвое выше, чем в Аман-Карагае, при общей более высокой охвоенности крон в первом случае масса хвои “растягивается” вдоль по стволу на большее число лет.

* * *

Таким образом, подтверждается ранее установленная внутри- и межвидовая инвариантность зависимости массы листвы двух биологически близких пород — березы и осины, — произрастающих на территории от европейской части России до Японии, от диаметра ствола у основания кроны (пайп-модель) (Козлов, Соколова, 1984; Рождественский и др., 1991; Усольцев, Сальников, 1993; Усольцев, 1997). Выведенное уравнение (212) можно считать видовой характеристикой березы и осины на упомянутой территории. Применение зависимости (212) при формировании банка данных о фитомассе лесов дает возможность существенно снизить трудоемкость получения экспериментальных данных, ограничившись взятием до 60 модельных деревьев в древостоях разных возрастов и эколого-ценотических условий.

У двух биологически близких пород — ели и пихты — в пределах Среднего Урала, а также в культурах и естественных сосняках Тургайского прогиба инвариантность подтверждена на уровнях пайп-модели и продвинутом, учитывающем также прирост древесины ствола. Для естественных сосняков двух разных природно-климатических регионов — Среднего Урала и Тургайского прогиба — названная зависимость инвариантна на уровне пайп-модели, но специфична по регионам, когда учитывается прирост ствола. По-видимому, пайп-модель отражает лишь потенциальную влагообеспеченность хвои, а степень ее реализации отражается в приросте ствола, который при одинаковых площади заболони и массе хвои меньше в сосняках уральского региона, подверженного воздействию поллютантов.

Стратификация кроны по возрастным слоям позволила уточнить общие закономерности в оценке массы крон, показанные в разделе 6.3 на уровне пайп-модели: установлена более высокая охвоенность крон в естественных сосняках по сравнению с культурами в бору Аман-Карагай, как для дерева в целом, так и по отдельным возрастным слоям кроны. Сопоставление охвоенно-

сти крон естественных сосняков Аман-Карагая и Среднего Урала показало, что в первом из регионов общая масса хвои дерева в целом ниже, чем во втором, а масса хвои в пределах одного возрастного слоя, наоборот, выше вследствие меньшего возраста крон деревьев. Применение изложенного подхода позволило выявить не только внутри- и межрегиональные различия охвоенности крон сосны, обусловленные природными и антропогенными факторами, но также особенности распределения фитомассы по возрастным слоям кроны, определяемые в значительной степени общим возрастом последней.

На основе полученных результатов предстоит стратифицировать лесные площади Урала с привлечением физиологических методов по степени промышленных загрязнений и соответствующих им показателям продуктивности хвои по породам и конкретизировать связь пространственной динамики продуктивности лесов с уровнями антропогенных эмиссий.

ГЛАВА 7

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И ФИТОМАССЫ ЛЕСНОГО ПОЛОГА ПУТЕМ ЛАЗЕРНОГО ПРОФИЛИРОВАНИЯ

Экологический мониторинг и реализация экологических программ различного уровня сопряжены с изучением биологической продуктивности лесов (Усольцев, 1993, 1994, 1995а, б). 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, получаемой путем пассивного или активного зондирования земной поверхности в различных зонах волнового спектра.

Использование аэро- и космических снимков с довольно сложной процедурой их дешифрирования требует много средств и времени и обычно ограничено небольшими площадями. Альтернативой является аэрокосмическая технология зондирования, обеспечивающая получение широкого спектра характеристик растительного покрова в предельно сжатые сроки на обширных лесных площадях. Она включает, по меньшей мере, три основных направления:

- регистрацию спектрального отражения солнечной радиации (Рачкулик, Ситникова, 1981; Жирин, 1993);
- радиолокационное зондирование (Chauhan, Lang, 1990; Ranson, Smith, 1990; Ranson, Guoqing, 1992; цит. по: Жирин, 1993);
- лазерное зондирование.

С учетом основной целевой постановки настоящей работы — формирование банков данных о фитомассе лесов — наиболее перспективной представляется технология лазерного зондирования, позволяющая совмещать применение лазерных излу-

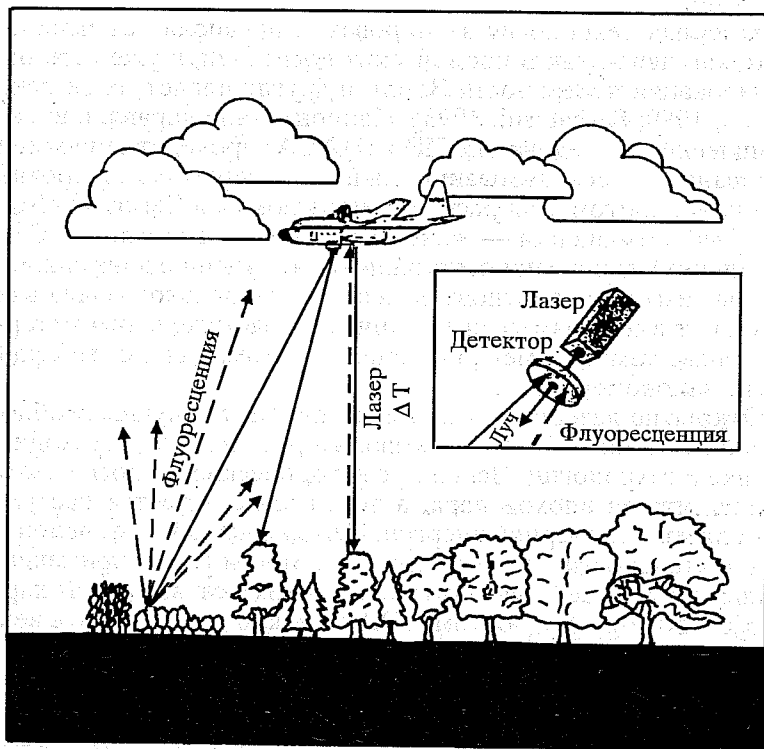


Рис. 68. Схема совмещенной на одном авианосителе технологии лазерного профилирования и регистрации наведенной лазером флуоресценции при исследовании лесного покрова (Chappelle et al., 1989)

чений различного функционального назначения (рис. 68), а именно:

- использование лазерных дальнометров для получения профилей, пространственных параметров лесного полога и связанных с ними количественных показателей биопродуктивности и запасов фитомассы лесов;
- регистрация наведенной лазером флуоресценции для идентификации видов растений и выявления физиологических стрессов в результате атмосферных загрязнений, засухи, дефицита элементов питания и др.;
- идентификация древесных пород по степени деполяризации лазерного сигнала лесным пологом.

Лазерная технология зондирования предполагает использование как авиа-, так и космических носителей, и уже есть опыт картирования поверхности Земли и других планет на ее основе (Bufton, 1989; Seshamani, 1993). Национальное управление аэрокосмических исследований США (НАСА) проводит широкие исследования по использованию данных лазерного зондирования для оценки фитомассы растительного покрова Земли (Nelson et al., 1988b). Эти оценки — часть обширной программы НАСА по глобальному выживанию, посвященной изучению динамики глобальных изменений. Основные аспекты глобального выживания включают в себя измерение количества растительного материала, а также темпы изменения запасов фитомассы и их географические закономерности.

Открытие лазеров — одно из величайших научных событий второй половины XX в. — символизирует 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 в. можно будет назвать веком лазеров (Басов, Катулин, 1989).

Впервые вопрос о квантовом взаимодействии между светом и средой рассмотрен в 1917 г. 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. Среда поглощает, рассеивает и излучает, 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 впервые теоретически сформулирована в 1940 г. 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. Первые лазеры появились

примерно через полвека (в 1960 г.), 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 находит 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 (твёрдого, 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 (электрическую, тепловую, световую, химическую, ядерную) 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 эффе́кт 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 непрерывного, 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 локаторы и дальномеры, анализаторы атмосферного загрязнения, голографическая диагностика качества материалов, контроль размеров и линейных перемещений, основанный на явлениях интерференции и дифракции и эффекта Допплера). Лазеры применяются также в военном деле, медицине, связи, информатике и других многочисленных отраслях.

При написании раздела автор уходит 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 для получения достоверной информации о структуре и фитомассе лесного полога.

7.1. СТАНОВЛЕНИЕ И СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ЛАЗЕРНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Бортовые радиолокационные и лазерные системы дают возможность оперативной оценки высот древостоя, 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 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 (Солдухин и др., 1976, 1977а,б, 1978, 1985). Цель их состояла в имитации (получении аналогов) профилограмм случайных верти-

кальных сечений древостоев, установлении связи характеристик профилограмм с таксационными показателями и оценке ошибок определения последних по данным профилограмм — без использования самолетного лазерного профилометра. На заключительном этапе получены предварительные результаты бортового лазерного профилирования лесного полога в ориентации на совмещение его с материалами традиционной аэрофотосъемки (Столяров, Солодухин, 1987).

7.1.1. НАЧАЛЬНЫЙ ЭТАП ЛАЗЕРНОГО И РАДИОЛОКАЦИОННОГО 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 представляют 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 (водная поверхность), то может быть получена информация о второй отражающей поверхности (земли под пологом или дна водного бассейна).

Дистанционные бортовые системы (профилометры) выполняют роль двоякого рода: 1) использование данных дистанционного зондирования для контроля других сенсоров и 2) извлечение полезной информации о ресурсах непосредственно из потока возвращенных сигналов. Пример первого приложения — 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.

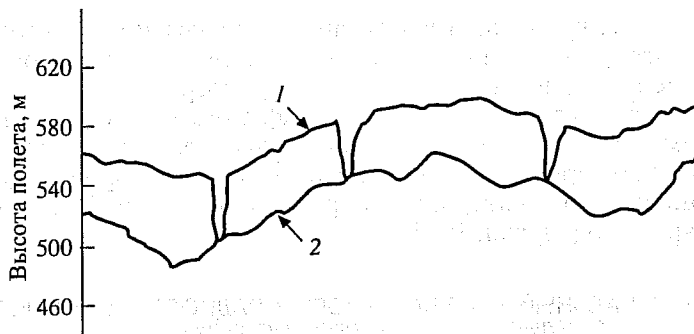


Рис. 69. Запись двойного следа, дающего профили лесного полога (1) и земной поверхности (2) (Aldred, Bonnrog, 1985)

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 высотометры, применяемые в качестве вспомогательного средства посадки самолетов, фактически (по понятным причинам) были специально предназначены для локализации 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. 69). 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 запаса стволовой древесины и фитомассы древостоя. Эта информация является основной при съемке лесного покрова и в 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 аэрофо-

тоснимков определение высоты в таких случаях сопровождается ошибкой $\pm 5-8$ м (Nielsen, 1971).

В начале 60-х годов 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 необходимо для определения масштаба СФГ-модели, используемой для измерения некоторых параметров дерева (например высоты, объема или фитомассы). В качестве вариантов рассматривалось использование сдвоенной камеры с известным базовым расстоянием, радарного высотомера и лазерного дальномера. Принцип сдвоенной камеры реализован в вертолетном варианте в Британской Колумбии (Lyons, 1967) и примерно в это же время Национальным исследовательским советом Канадской лесной службы разработан и позднее изготовлен низковысотный радарный высотомер с проникающим сквозь полог сигналом (Aldred, Sayn-Wittgenstein, 1968a; 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 низковысотного радарного высотомера обычно удовлетворяла требуемой точности ($\pm 2\%$ от высоты полета на 95 %-ом уровне) и обеспечивала устойчивое прохождение сигнала сквозь полог лесов северной части умеренной зоны (Nielsen, 1974a). Впервые радарный высотомер 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 заключалась в получении неустойчивых результатов отчасти вследствие устаревшей, ненадежной технологии радарной съемки. Возможность получения "двойного следа" от полога и земной поверхности исследована в Коста-Рике, но точность оценки высоты полога не была установлена. Причины неустойчивых результатов обусловлены техникой выборочного учета и совмещения данных, а также влиянием разреженности крон полога, которая не обеспечивала от-

ражения радарного сигнала достаточной мощности (Nielsen, Aldred, 1978).

В России проведены эксперименты по радиолокационной съемке лесопокрытых 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, 1988; Першиков, Анферов, 1988).

7.1.2. ПРИМЕНЕНИЕ ЛАЗЕРА НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ

В середине 60-х годов были начаты исследования с применением лазерных дальномерных 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. 70 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 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 испус-

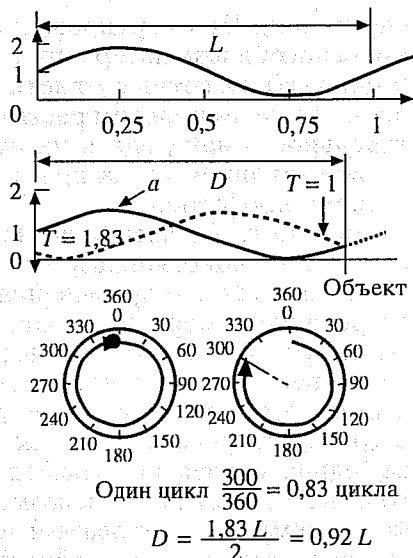
Рис. 70. Схема определения расстояния лазером непрерывного действия по фазовому сдвигу непрерывной волны (Link, Collins, 1981).

L — длина одного цикла, D — расстояние от сенсора до объекта, a — излученная волна

канием и возвращением сигнала, и соответствующее расстояние (см. рис. 70).

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 (Тоома, Tucker, 1973; Hibler, 1975; Kirby, Sutton, 1981).

Другое применение лазерного профилометра непрерывного действия состояло в картографировании различных категорий земной поверхности (открытого грунта, речной сети, микрорельефа, травяного покрова, зерновых культур, пашни, древостоев и т. д.) (Rempel, Parker, 1964; Link, 1969). В Австралии лазер использовали при изготовлении серии топокарт (масштаба 1:100 000) для контроля вертикальных отметок, полученных СФГ-способом. Применен непрерывный аргоновый лазер с длиной волны 488 нанометров (нм) ($1 \text{ м} = 10^9 \text{ нм}$). 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 (баро- и гиросенсоры, трехмерная микроволновая и инерциальная навигационная системы, в том числе с применением 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 (± 30 см) превышала уровень требований лесного хозяйства, однако сигнал достигал земли лишь в некоторых разрывах полога. Поэтому встречались участки протяженностью несколько сот метров без единого сигнала, отраженного от земной поверхности. На холмистой местности невозможно определить высотные отметки земли, а, следовательно, и высоту древостоя. Образец профиля смешанного хвойно-лиственного древостоя, полученного лазером непрерывного действия, показан на рис. 71 (Aldred, Bonnor, 1985).

Х. Арп с соавторами (Arp 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. Главная проблема — получение достаточного количества проникающих сигналов, отраженных от поверхности земли. В густых многоярусных тропических лесах “окон” в пологе существенно меньше, чем в лесах умеренной зоны.

7.1.3. ПРИМЕНЕНИЕ ИМПУЛЬСНО-ПЕРИОДИЧЕСКОГО ЛАЗЕРА

Более точное определение высотного профиля древостоя обеспечивается импульсно-периодическими лазерами, которые в конце 60-х годов начали применяться на авианосителях и в настоящее время преобладают при лазерном зондировании земной поверхности и лесного полога.

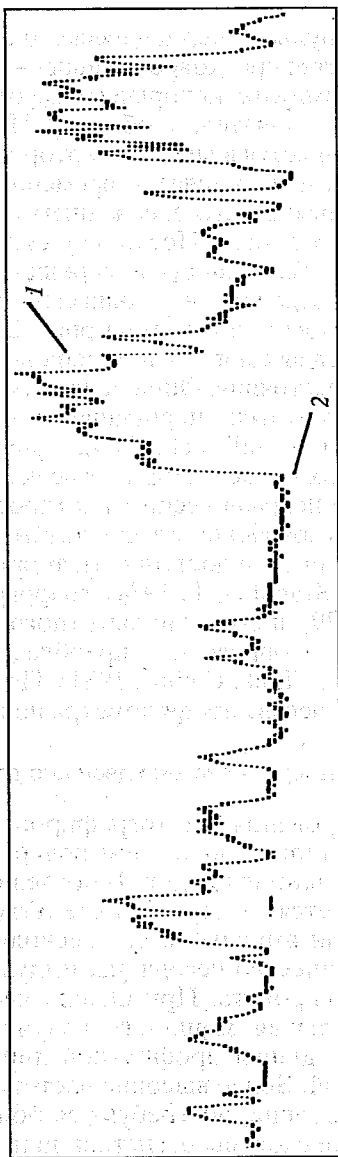


Рис. 71. Образец записи высотных отметок полого смешанного хвойно-лиственного древостоя (1) и поверхности земли (2), полученной лазерным профилометром непрерывного действия

7.1.3.1. Импульсно-периодический лазерный дальномер

Принцип работы импульсно-периодического лазерного дальномера прост. Генерируется кратковременный — от 5 до 10 наносекунд (нс) — лазерный импульс, который в виде относительно узкого луча передается от излучателя к объекту. Импульс отражается от объекта и возвращается в виде эхо, которое регистрируется приемным устройством. Измеряется временной промежуток между начальным импульсом и его отражением и через скорость света переводится на расстояние. Поскольку скорость света составляет около 300 000 км/с, точность измерения временного интервала должна быть в пределах 1 нс, эквивалентной расстоянию около 30 см. Принцип работы показан на рис. 72, 73. Чем четче распознаются пики передаваемого и возвращенного 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 его было успешным в различных областях: при разведке ледовых полей (Lowry, Brochu, 1975), топографическом картировании, дающем большую информацию в сравнении с топокартами (Ritchie, 1995), съемке микрорельефа и оценке доступности территорий (Collins, 1979; Link, Collins, 1981; Krabill et al., 1984), гидрографических исследованиях (Enabnit, 1979), получении высотного спектра океанских волн, позволяющего определить преобладающие высоту, длину и направление волн (Link, Collins, 1981). Пример использования такой системы в качестве профилометра показан на рис. 74.

7.1.3.2. 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 лазерный импульс отражается от двух и более объектов, и таким образом, один исходящий импульс имеет несколько отражений (см. рис. 72,6 и 75). 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 меньше число измерений. Более высокие частоты дают лучшее пространственное разрешение, но требуются большие затраты энергии и более сложные системы регистрации и обработки сиг-

Электронный архив УГЛТУ

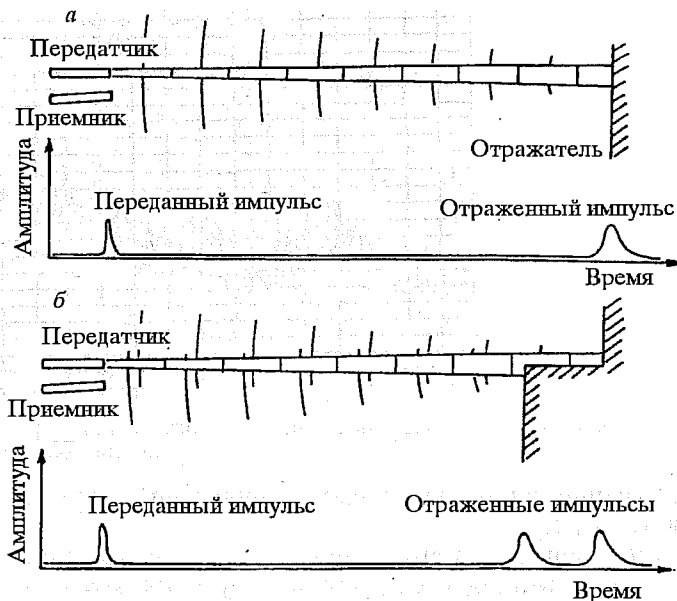


Рис. 72. Схема регистрации времени испускания и приема лазерного импульса: отражение энергии от отдельной плоской поверхности (а) и от двухуровневого объекта (б) (Aldred, Bonnor, 1985)

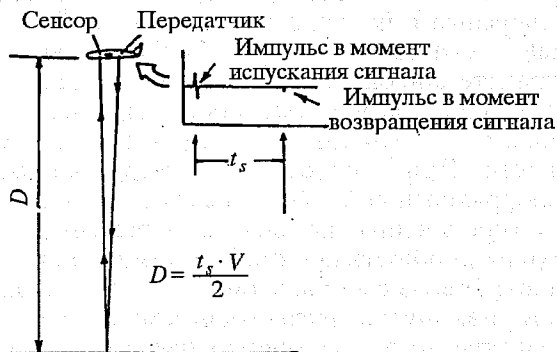


Рис. 73. Схема определения расстояния (D) до объекта импульсно-периодическим лазером (Link, Collins, 1981) (t_s — время, V — скорость света)

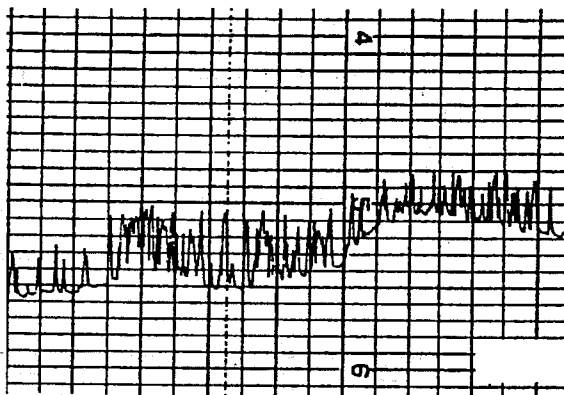
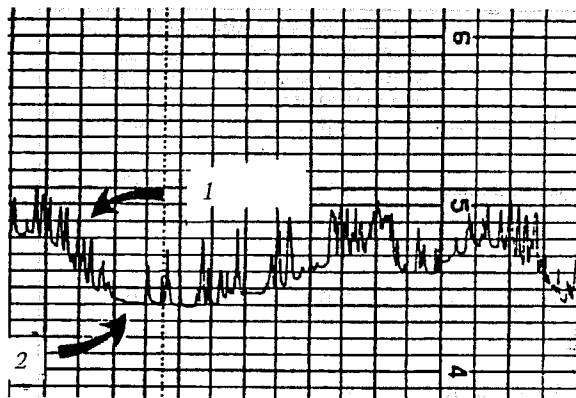


Рис. 74. Образец распечатки высотных отметок полога хвойного древостоя (1) ким лазерным профило

налов. 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 пологом 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. 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 съемке земной поверхности обычно ограничивается из соображений безопасности для зрения.

Наличие упомянутой яркости наземных объектов стимулировало развитие импульсно-периодического лазера двойного действия, позволяющего регистрировать не только расстояние до ближайшего объекта (вершин деревьев, водной поверхности) в инфракрасной области спектра (инфракрасный лазер), но и реги-



и подстилающей земной поверхности (2), полученной импульсно-периодическим (Aldred, Bonnor, 1985)

стрировать форму волны отраженного импульса (зеленый лазер) с помощью пропускающего дигитайзера (рис. 76), т. е. кодируются моменты пиков передачи и возвращения импульса и изменяющаяся амплитуда отраженного сигнала в целом (рис. 77).

Изложенный принцип впервые применен в батиметрии (измерении глубины водных бассейнов) в 1968 г. (Nickman, Hogg, 1969), для чего была сконструирована система, получившая название лидар (LIDAR — Light Detection and Ranging, т. е. световая локация). Система регистрировала первичное яркое отражение отдельного импульса от водной поверхности, после чего идентифицировался вторичный пик яркости, означающий 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 изложены Ф. Хоугом с соавторами (Hoge et al., 1980). Точность лазерных измерений в сравнении с гидрографическими замерами глубин с судна удовлетворяла требованиям.

У. Крейбил с соавторами (Krabill et al., 1984) исследовали возможность использования океанографического лидара НАСА для

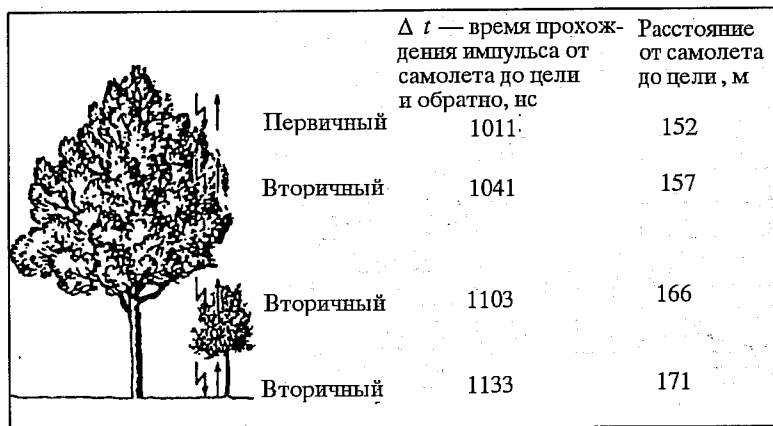


Рис. 75. Схема множественного отражения отдельного импульса от полога высотой 18 м (Nelson et al., 1988b)

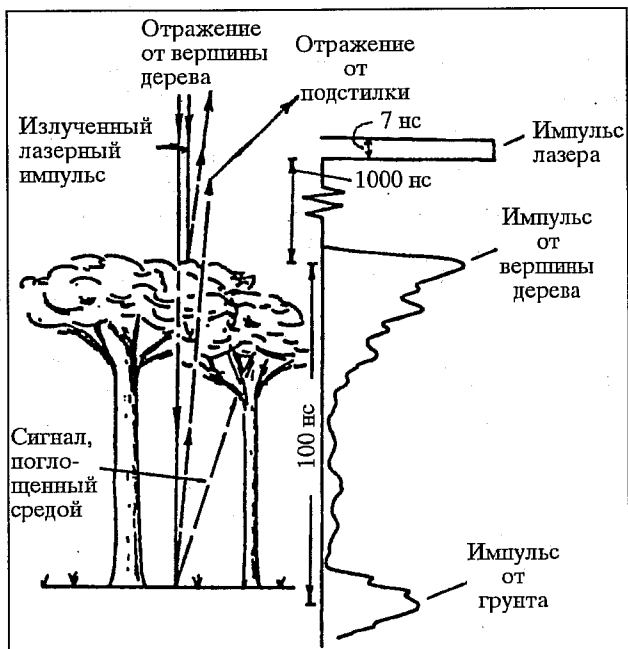
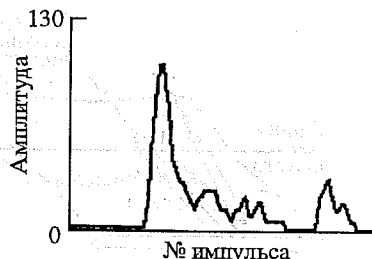


Рис. 76. Схема множественного отражения лазерного импульса от полога леса в зеленом и инфракрасном спектрах (Link, Collins, 1981)

Рис. 77. Образец записи импульса, отраженного от лесного полога, лидаром-батиметром КЦДЗ (по оси Y — энергия отраженного импульса, по оси X — время; левая часть сигнала получена от ближайшего объекта (лесного полога), правая — от более удаленных объектов (напочвенного покрова или поверхности земли) (Aldred, Bonnor, 1985)



топографического картирования водораздела близ Мемфиса (штат Теннесси). Отличительная особенность их исследования — попытка преодолеть влияние лесного покрова на точность профилирования. Они установили, что в зимних условиях (безлистное состояние) профилирование земной поверхности довольно надежно, поскольку около 40 % импульсов достигали земли. Однако в летних условиях (облиственное состояние) проникающая способность лазерных импульсов значительно хуже. Пропускающая способность хвойных летом 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, близки к высотным профилям, полученным СФГ-способом, со среднеквадратической ошибкой ± 12 — 27 см на открытой местности и ± 50 см — под пологом леса. Высказано мнение, что лучшая проникающая способность импульсов может быть обеспечена повышением частоты пульсаций и снижением высоты полета (Krabill et al., 1984).

Г. Шрайер с соавторами (Schreier et al., 1984) установили при картографировании земной поверхности в Канаде арсенид-галлиевым импульсно-периодическим лазером, что в 95 % всех лазерных измерений расхождение высотных отметок со значениями, полученными СФГ-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-папоротниковым покровом и характеризуют высоту последнего. Г. Шрайер с соавторами (Schreier et al., 1985) сообщили далее, что их лазер в ближней инфракрасной области спектра дал профили земной поверхности и лесного полога, позволяю-



Рис. 78. Схема растрового (а) и конического (б) сканирования (Link, Collins, 1981)

щие точно оценить высоту древостоя. Они осуществили измерение высоты и плотности полога в увязке с оценкой отражательной способности в ближней инфракрасной области для распознавания хвойных и лиственных пород с использованием приемов полуавтоматической идентификации.

Р. Нельсон с соавторами (Nelson et al., 1984) в лесных лиственных местообитаниях Пенсильвании, используя способность батиметрического лидара определять высоту полога, установили, что расхождения средних лазерных оценок высот деревьев с СФГ-результатами были в пределах 60 см, и лазерные оценки — более точные. 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.

7.1.4. 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, Elacki, 1981; Link, Collins, 1981) и коническое (линии сканирования круговые, симметричные относительно курса полета) (Link, Collins, 1981; Krabill et al., 1984) сканирование (рис. 78). Очевидное преимущество лазерных сканеров — воз-

возможность оперативнее получать информацию о больших площадях, а недостаток — повышенная сложность оборудования и методики обработки данных.

7.1.5. 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. Принцип работы позиционных систем и их разновидности не рассматриваются.

Из лазеров непрерывного действия можно отметить применявшийся в Санкт-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 передатчика 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 WREMAPS-II (Weapons Research Establishment for the Mapping) на базе непрерывного аргонового лазера с длиной волны 488 нм. При номинальной высоте полета 2000 м точность дальномеров ± 50 см, диаметр лазерного пятна 30 см (Link, Collins, 1981).

К лазерным системам одинарного действия, т. е. измеряющим 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 дальномеров $\pm 1,5$ 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 нс, угол расхождения луча 1,5 миллирадиан (мрад) (Link, Collins, 1981). Другая разновидность системы такого типа — импульсно-периодический неоновый лазер с длиной волны 540 нм Исследовательской лаборатории корпорации AVCO в Эверетте (США). Частота пульсаций от 1 до 100 Гц, продолжительность импульса 3 нс, угол расхождения луча 20 мрад (Hickman, Hogg, 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:

- длину волны лазера — близкую к инфракрасной;
- частоту импульсов — 5, 20, 80, 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. Датчик продольных и поперечных колебаний используется для контроля вертикальности лазерного луча и восстановления СФГ-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) (Aldred, Bonnor, 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 — неоновых и на алюмоиттриевом гранате с неодимом. Первый дает частоту пульсаций 400 Гц

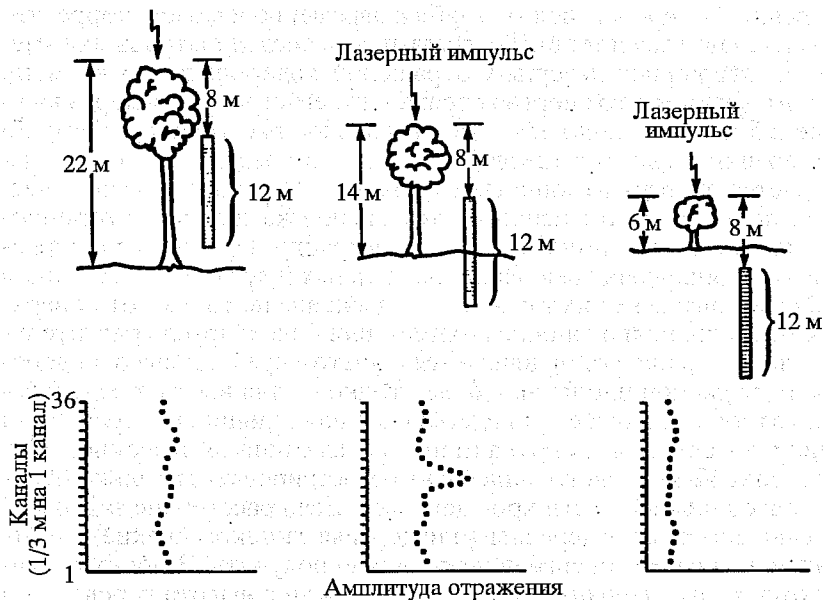


Рис. 79. Влияние различной высоты дерева на возможность регистрации поверхности земли (принято расстояние задержки 8 м, или 55 нс) (Nelson et al., 1984)

при длине волны 337 нм (Nelson et al., 1984), второй — 400 Гц при длине волны 532 нм (Nelson et al., 1988a, b). Система может работать в режимах сканирования и линейного профилирования и основана на принципе регистрации множественных отражений отдельного лазерного импульса (см. рис. 72, б и 75).

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

Электроника устроена так, что после регистрации начального отражения отдельного импульса делается задержка (рис. 79), после которой последовательно производятся остальные 36 из-

мерений. Задержка вводится заблаговременно и может корректироваться по ходу полета. Тридцать шесть последовательных измерений вторичных лазерных отражений кодированы по времени таким образом, что энергия отражения регистрируется через каждые 2,5 нс, 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 может 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, а более точно — для высот тех деревьев, которые как объект представляют наибольший интерес. Если задержка слишком коротка (или деревья слишком высокие), то в пределах 12-метрового окна будут регистрироваться только отражения от нижней части крон деревьев. Если расстояние задержки превышает высоту деревьев (или деревья слишком низкие), то отраженный от земли сигнал невозможно получить. В обоих случаях отсутствует сильное отражение от земли и высота деревьев по лазерным данным не будет рассчитана (см. рис. 79).

Поскольку число вторичных отражений импульса обычно не превышает трех, то в более поздних экспериментах с лидаром НАСА на базе алюмоиттриевого граната число каналов для регистрации вторичных отражений снижено с 36 до 8. Стали применяться и более низкие частоты (100—200 Гц) для 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 портик и направляется в 30,5-сантиметровый телескоп Кассегрэйна. Электронный сигнал получает от фотоумножителя 100-кратное линейное усиление и направляется в счетчик интервалов времени Хьюлетт Паккард-5360А с разрешающей способностью 100 пикосекунд (1 пкс = 10^{-10} с), что соответствует расстоянию 1,5 см. От набора трубок 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). Восьми-канальный мультистоп (точность 1 нс) используется для получения промежутков времени между выходом импульса и последовательными его отражениями от многоярусных наземных объектов, представленных обычно многоярусным пологом насаждения. Хотя разрешение отдельного 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 высота полога, применяется комбинация прямого отражения от полога (записанного счетчиком интервалов) и рассеянного отражения от поверхности земли (записанного 8-канальным мультистопом (Nelson et al., 1988a).

Из систем двойного действия можно упомянуть также бортовую лазерную систему Исследовательской лаборатории корпорации AVCO США на базе импульсно-периодического лазера на алюмоиттриевом 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 10 Гц, высоте полета 915 м и скорости 215 км/ч (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 получил распространение бортовой океанографический лидар, разработанный Канадским Центром дистанционного зондирования (КЦДЗ), работающий в двух активных диапазонах, он также относится к системам двойного действия. Бортовая система лидара КЦДЗ состоит из следующих компонентов:

- лидара-батиметра МКП;
- картографической камеры WILD RC-10;
- видеокамеры;
- инерциальной навигационной системы;
- пропускающего дигитайзера Tektronix R-7912;
- системы получения данных.

Лидар имеет следующие основные рабочие характеристики, перспективные с точки зрения лесохозяйственного применения:

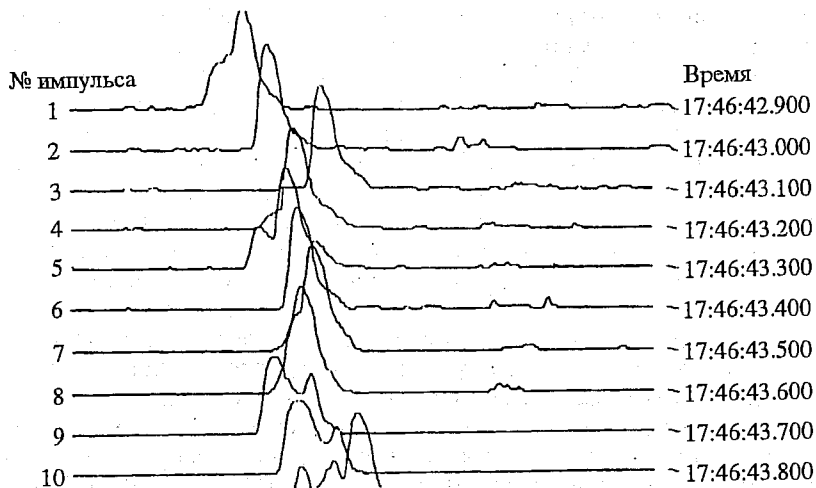


Рис. 80. Распечатка системой Лидар-Эхо серии из десяти (1—10) лазерных импульсов с интервалом 1/10 с (Aldred, Bonnор, 1985)

длину волны — 1064 нм (инфракрасный) и 532 нм (зеленый); частоту повторений импульса — 5 нс 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 PDP 11/23. Периферия системы — привод магнитной ленты, жесткий диск 60 Мбайт, разделенный на три тома, графический терминал Tektronix-4025 и принтер-плоттер Versatec. Система Лидар-Эхо предназначена 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. 77 представляет распечатку возвращенного импульса, а рис. 80 — последовательность импульсов с интервалом 1/10 с.

Поскольку использование инерциальной 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 произ-

водственного авиадальномера), для чего положение лазерного пятна фиксируется на видеозэкране. Видеозапись сопровождается регистрацией времени в десятых долях секунды, чтобы связать время видеозаписи с лазерными импульсами (Aldred, Bonnor, 1985).

Из лазерных сканеров (кроме упомянутого лидера НАСА) при съемках морского дна и лесного полога используется много-спектральный растровый сканер М-8 Мичиганского института исследований окружающей среды (США). Скорость сканирования — 60 пикселов/с, 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 нс, 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 алюмоиттриевом гранате с неодимом с длиной волны в ближней инфракрасной области спектра 1064 нм, предназначен для зондирования поверхности воды или полога древостоя. 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, 1981).

В целом по разделу 7.1 можно сделать следующие 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. Здесь не ставилась задача 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 — серьезная помеха для непрерывного светового лазерного луча. Хотя точность измерений

- (± 30 см) превышает уровень требований при лесотаксационных задачах, встречаются участки протяженностью несколько сот метров без единого сигнала, отраженного от земли под пологом леса.
3. Импульсно-периодические лазерные дальнометры одиарного действия (т. е. измеряющие расстояние только до одной отражающей поверхности), регистрирующие время испускания и возвращения 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 перспективны 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 земля) 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 — перспективное средство оперативного зондирования больших территорий, но сегодня пока не получили распространения из-за высокой сложности оборудования и методики обработки данных.

7.2. МЕТОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ЛАЗЕРНОЙ ОЦЕНКИ МАССООБРАЗУЮЩИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДРЕВОСТОЕВ

7.2.1. ИМИТАЦИЯ БОРТОВОЙ ЛАЗЕРНОЙ СЪЕМКИ В НАЗЕМНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАХ

Перечислим главные задачи наземных имитаций бортовой лазерной съемки:

- выявление основных массообразующих показателей древостоя, которые могут быть идентифицированы и квантифици-

рованы (т. е. определены числом и мерой) посредством лазерных сигналов;

- исследование наземной составляющей ошибки измерения, обусловленной структурой древостоя, но не технологией бортовой лазерной съемки (исследованию полной ошибки измерения будет посвящен раздел 7.2.2).

В. И. Солодухин с соавторами (1976) предваряют изложение результатов наземных имитаций бортовой лазерной съемки глоссарием некоторых специфических (принятых ими) терминов:

- профиль — сечение древостоя 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.

7.2.1.1. Исследование лазерных профилей, снятых на горизонтальной измерительной трассе

Эксперименты проводились на горизонтальной измерительной трассе (рис. 81) путем измерения расстояний до соответствующих точек кроны при перемещении лазерного дальномера, расположенного на специальной платформе, параллельно оси y с шагом 5—10 см, что обеспечивало получение профиля сечения кроны по 40—50 точкам (рис. 82). 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 (см. рис. 82), имеют некоторые несовпадения, формы огибающих обладают достаточным подобием в верхней части кроны (рис. 83), что дает возможность распознавать породы на профилограммах по форме сечений.

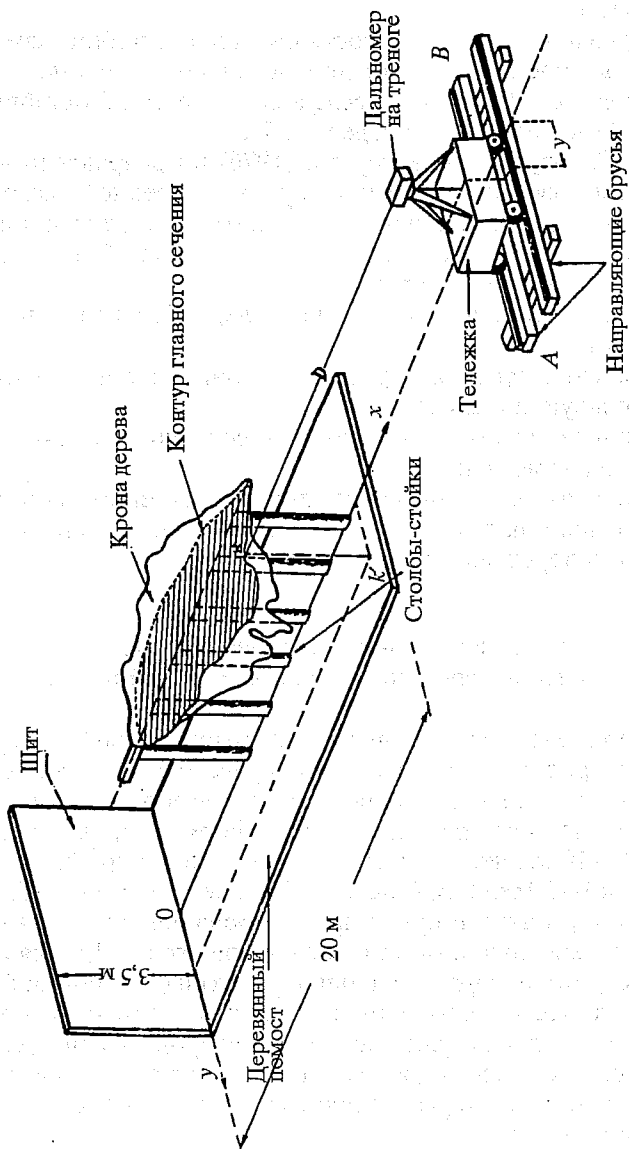


Рис. 81. Общий вид площадки для съемки профиля кроны (Солухин и др., 1976)

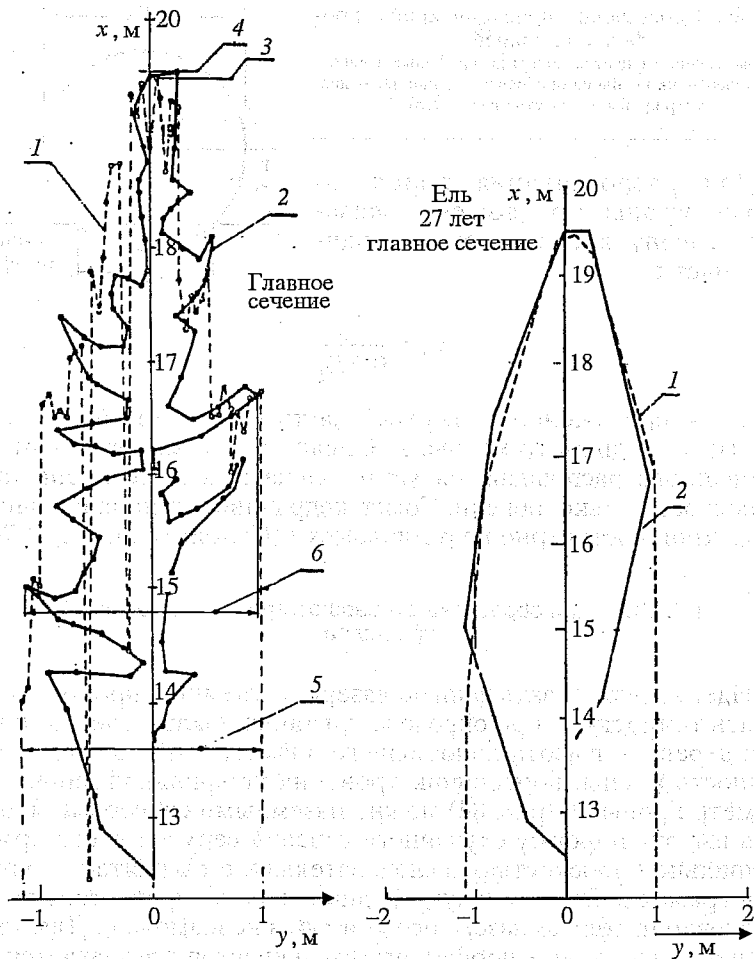
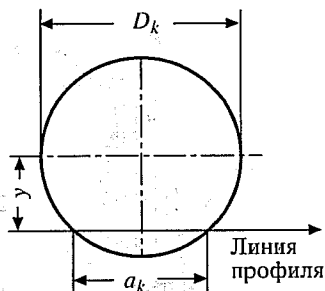


Рис. 82. Лазерная профилограмма и контур главного сечения ели 27 лет. 1 — лазерная профилограмма, 2 — профиль, обмеренный рулеткой, 3 и 4 — высота дерева, определенная соответственно по лазерной профилограмме и с помощью рулетки, 5 и 6 — наибольшая ширина сечения кроны, полученная соответственно по лазерной профилограмме и с помощью рулетки (Солодухин и др., 1976)

Рис. 83. Огибающие главного сечения ели 27 лет (Солодухин и др., 1976). 1 — измерение лазерным дальномером, 2 — измерение рулеткой

Рис. 84. 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)



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

$$K_b = \frac{l_{bo}}{0,5D_k}, \quad (226)$$

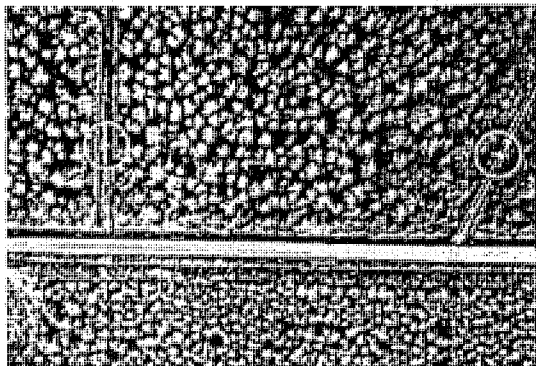
где l_{bo} — протяженность верхней части кроны в главном сечении, м; D_k — диаметр кроны, м. Однако возможность автоматизированного распознавания установлена в составе смешанных древостоев только для ели. Сосна, кедр и лиственница по выпуклости крон достоверно не различаются (Солодухин и др., 1976).

7.2.1.2. Съёмка и обработка стереофотограмметрических (СФГ) профилей

Идентифицировать данные лазерной съёмки 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. 84) 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 аэрофотосъёмки (Желудов, 1985) с применением высокоточных универсальных СФГ-приборов. Методика съёмки и обработки СФГ-профилей включает наземные, аэрофотосъёмочные и камеральные работы.

При наземных работах в древостое проводился ряд параллельных визиров, на концах которых выкладывались опознава-

Рис. 85. Оознавательные знаки на концах профиля (Солодухин и др., 1976)



тельные знаки *T*-образной формы с перекрестиями, ориентированными на створ профильной линии (рис. 85). Аэрофото-съемка 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 стереометрографе “Карл Цейсс”, модель *E* (Солодухин и др., 1976).

Полученные после дешифрования СФГ-профили (рис. 86) при полноте выше 0,6 имеют разрывы (например *II* шириной 5,2 м, см. рис. 86), 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. 54) (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 ее длине, занятой всеми кронами), невелика и средние арифметические поперечники крон на профильной линии мало отличаются от измеренных в натуре — от +4,5 % до -8,6 % (см. табл. 54).

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. 87). Расчет такой придержки, основанной на длине основания пика, показан на рис. 88 в виде распределения ответов “да” или “нет” путем сопоставления с натуральными данными в зависимости от длины основания пика *a*. Рис. 88 показывает, что пик является вершиной дерева, если длина его основания более 1,2 м. По числу профильных деревьев, определенному по критерию отбора пиков,

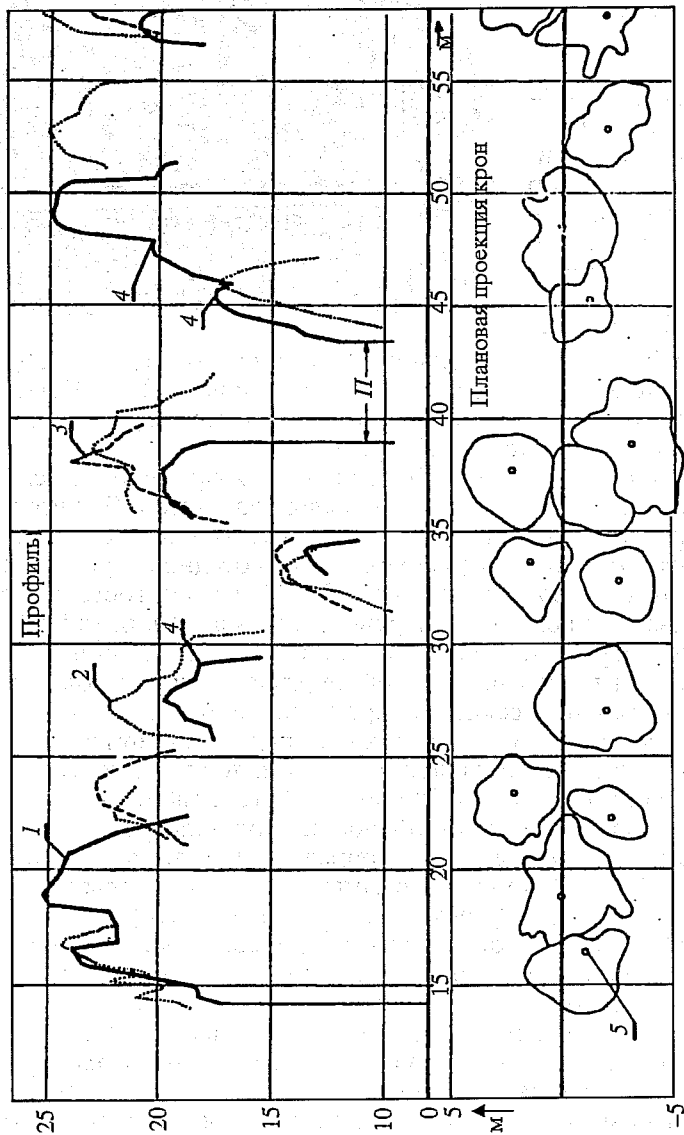


Рис. 86. Выкопировка из СФГ-профиля № 3.

1 — СФГ-профиль, 2 и 3 — профили главных сечений деревьев, расположенных соответственно справа и слева от профильной плоскости, 4 — примеры "угнетенных" пиков профилограммы, соприкасающихся с соседними пиками и находящихся в сравнении с ними значительно меньшую высоту, 5 — вершины деревьев на плане насаждения (Солодихин и др., 1976)

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

Показатель	Профиль		
	1	2	3
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	46,9/84,8
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 плоскостью 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/—

Примечание. В числителе — СФГ, в знаменателе — наземные.

устанавливается среднеарифметический поперечник кроны a_k (см. рис. 84, табл. 55)

$$a_k = D_k^2 - 4y^2, \quad (227)$$

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 соавторами (1976) предложили (исходя из зависимости (227)) теоретическое соотношение

$$D_k = (4/\pi) \cdot a_k \text{ или } D_k = 1,274 \cdot a_k. \quad (228)$$

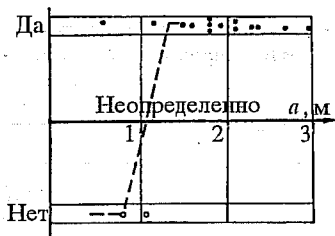
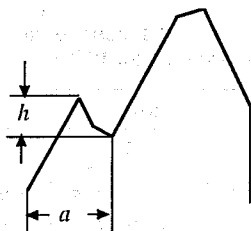


Рис. 87. Размеры "угнетенного" пика (h — высота, a — длина основания) (Солодухин и др., 1976)

Рис. 88. Диаграмма распределения ответов "да" и "нет" в зависимости от длины основания пика a при оценке, является ли пик вершиной дерева (Солодухин и др., 1976)

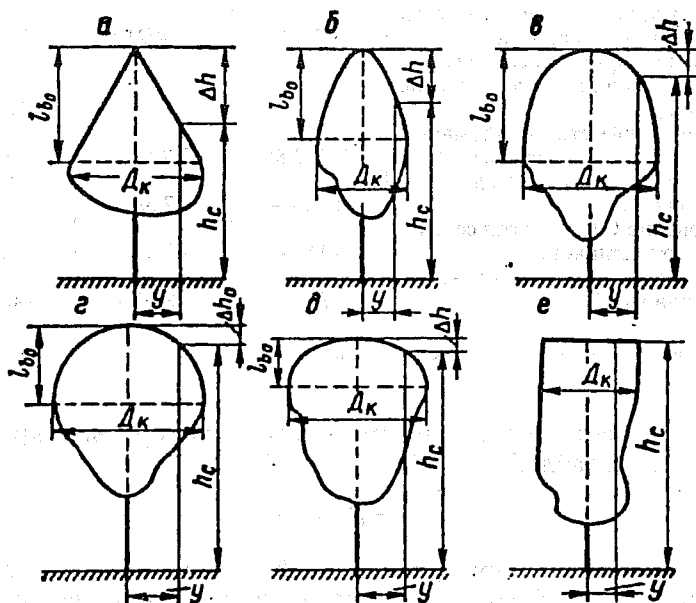


Рис. 89. Идеальные формы верхней части кроны:
 а — конусная, б — параболоидная, в — эллипсоидная, г — сферическая, д — эллипсоидная горизонтальная, е — цилиндрическая (Солодухин и др., 19776)

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

Измеряемая величина	Профиль		
	1	2	3
Число профильных деревьев ($n_{\text{пнк}}$), определенное по критерию отбора пиков	45	39	15
Суммарная длина участков (Σl_k), занятых кронами на профилограмме, м	109,1	127,1	46,9
Средний арифметический поперечник крон (м), определенный по формуле			
$a_k = (\Sigma l_k) : n_{\text{пнк}}$	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			
$D_k = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{\Sigma l_k}{n_{\text{пнк}}}$	3,08	4,15	4,0
Отклонение D_k от измеренного в натуре, %	+0,33	+0,48	-6,8

Расчет среднего диаметра крон с учетом соотношения (228) показывает (см. табл. 55), что расхождение расчетных показателей с фактическими невелико и не имеет систематического характера, что позволяет определять средний диаметр крон только по профилограмме, обходясь без картирования деревьев.

Отклонения среднеарифметической СФГ-высоты деревьев от фактической (см. табл. 54) на трех профилях колебались от +5,2 % до +9,0 %.

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

Чтобы формализовать получение значений высот деревьев по профилограмме, В. И. Солодухин с соавторами (1977б) вывели характерные сечения верхней части крон деревьев (рис. 89), согласно которым высота дерева h равна сумме высот двух случайных величин — h_c и Δh . Исходя из этого соотношения и математического ожидания величин h_c и Δh , выведены формулы, свя-

Таблица 56

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

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

зывают высоту дерева с высотой h_c и длиной верхней части кроны в ее главном сечении l_{bo} (см. рис. 89), которые приведены в табл. 56.

С учетом ошибок 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, сосняков — 10,7, кедровников — 10,0 и для лиственничников — 9,0 % (Солодухин и др., 1977б).

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

Высота древостоя и диаметр кроны — основные массообразующие показатели и для их расчета по профилограмме 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 редуционное число последней естественной ступени высоты (Моисеев, 1958)

$$\bar{h} = \frac{1}{3R} \sum_{i=1}^3 h_i, \quad (229)$$

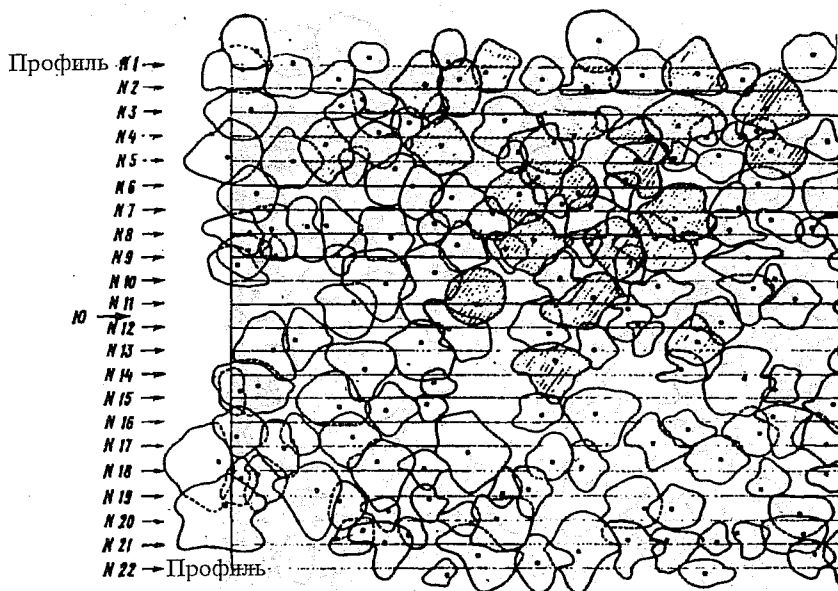
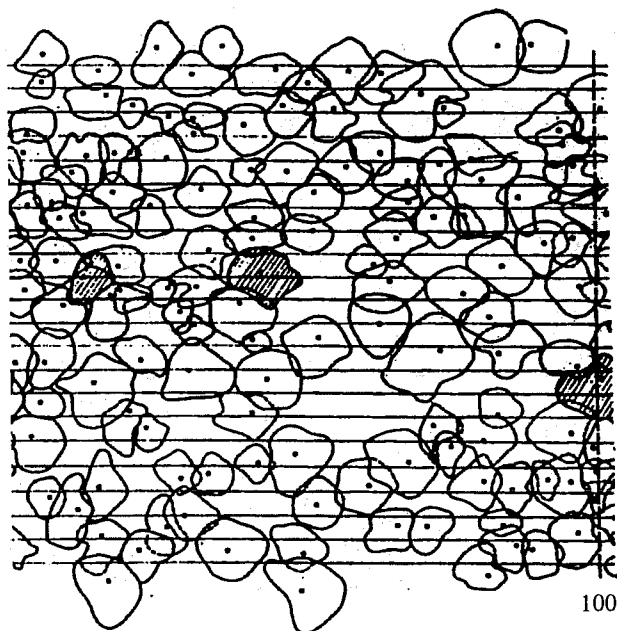


Рис. 90. Фрагмент плана крон пробной

где \bar{h} — средняя высота древостоя, м; $\sum_{i=1}^3 h_i$ — сумма трех самых

высоких сечений крон на профилограмме, м; $\bar{R}h$ — среднее редуционное число последней (самой высокой) естественной ступени высоты. Но поскольку количество пересечений крон 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 прошел по вершинным областям этих крон, повышается с увеличением объема профильной выборки и необходимо выявить минимальную протяженность профиля.

Исследования проведены (Солодужин и др., 1985) на пробной площади размером 600×44 м, заложенной в Вытегорском лесхозе Вологодской области. Состав 10С, возраст 64 года, густота 750 стволов/га. Профили заложены методом параллельных ходов, отстоящих один от другого на 2 м. По данным натуральных из-



площади (Солодухин и др., 1985)

мерений вычерчен план крон в масштабе 1:100; на нем выделены все кроны, относящиеся к самой высокой 10 %-й высотной группе (рис. 90). Вероятность пересечения профильной линией не менее трех крон деревьев, принадлежащих к этой высотной группе, определяется из соотношения

$$P_{x \geq 3} = \frac{n_{x \geq 3}}{22}, \quad (230)$$

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

Зависимости экспериментальной вероятности $P_{x \geq 3}$ и теоретической по закону Пуассона от длины профиля (рис. 91) 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.

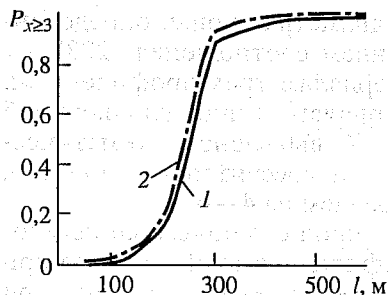


Рис. 91. Зависимость вероятности $P_{x \geq 23}$ от длины профиля l , м: 1 — экспериментальная вероятность, 2 — вероятность по закону Пуассона (Солодухин и др., 1985)

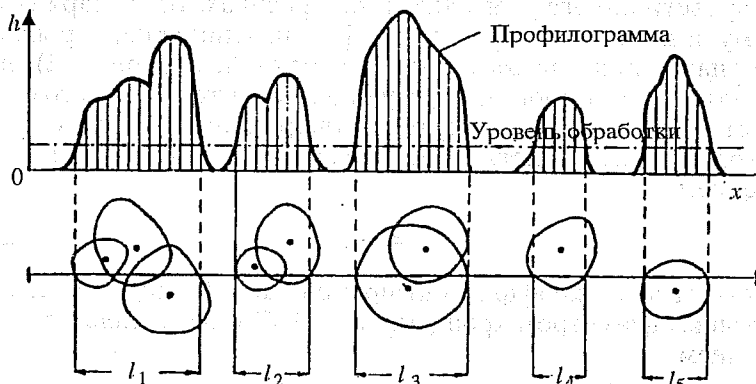


Рис. 92. Профилограмма и участки профильной линии, перекрытые кронами (Солодухин и др., 1976)

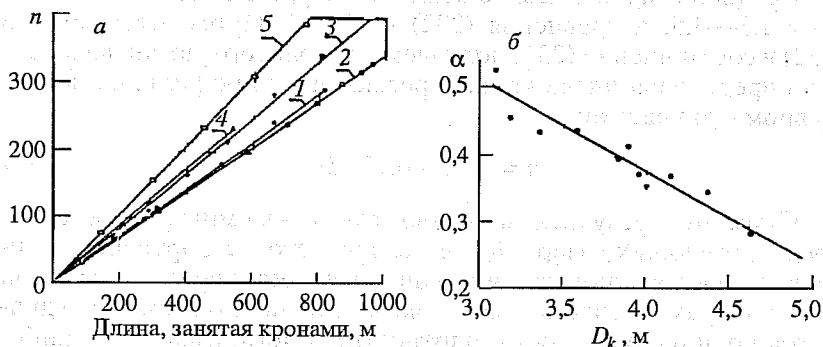


Рис. 93. Зависимости:

a — числа крон n , пересекающих профиль, от его длины, занятой кронами в разных профильных пробах (обозначены цифрами), b — углового коэффициента α (уравнение 232) от среднего диаметра кроны на профильной линии (Солодухин и др., 1976)

Отклонение среднего значения диаметра кроны, определенного по СФГ-профилю с применением соотношения (228), от фактического варьировало по материалам трех профилей (см. табл. 55) от +0,3 до -6,8 %. По материалам 11 профильных проб В. И. Солодухиным с соавторами (1976) выявлено систематическое занижение среднего диаметра крон, рассчитанного по (228), по отношению к фактическому в среднем на 4—6 %.

Определение среднего диаметра крон с использованием соотношения (228) по лазерному профилю возможно только при отсутствии перекрытия крон, которое имеет место лишь при сомкнутости полога менее 0,3, т. е. в рединах. Благодаря групповому размещению деревьев профильная линия перекрывается кронами лишь на отдельных участках $l_1 \dots l_5$ (рис. 92), при этом количество крон n , образующих один такой участок, колеблется от 1 до 15. Оно прямо пропорционально длине перекрытого кронами участка ($l, м$) (рис. 93, а) и определяется соотношением

$$n = \alpha \cdot l, \quad (231)$$

где α — угловой коэффициент прямой. Последний тесно связан со средним диаметром крон (см. рис. 93, б) и определяется соотношением

$$\alpha = -0,13D_k + 0,9. \quad (232)$$

Среднее квадратическое отклонение уравнения (231) составляет 1,3—3,5, а уравнения (232) — 0,009. Путем подстановки (232) в соотношение (231) получаем двухфакторную зависимость для определения числа крон, пересекающих профиль, на непрерывном его участке:

$$n = 0,9 \cdot l - 0,13 \cdot l \cdot D_k. \quad (233)$$

Суммируя результаты аэрофото- и наземных измерений, предшествующих 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 (Коковин, 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.

7.2.2. 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 7.2.2 посвящен анализу канадских исследований структуры лесного полога на базе бортового лидара КЦЦЗ (Aldred, Bonnor, 1985), а также работ исследователей США, выполненных на базе бортового лидара НАСА (Nelson et al., 1984, 1988a,b) и однопрофильного импульсно-периодического арсенид-галлиевого лазера (Ritchie et al., 1993a,b).

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;
- какова возможная точность определения расстояния до земли при идеальной проницаемости полога? (рис. 94).

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.

7.2.2.1. Объекты и методы

Система лидара КЦЦЗ. Система лидара КЦЦЗ проверялась на трех маршрутах в окрестностях Оттавы, подобранных с таким расчетом, чтобы были представлены четыре типа лесной

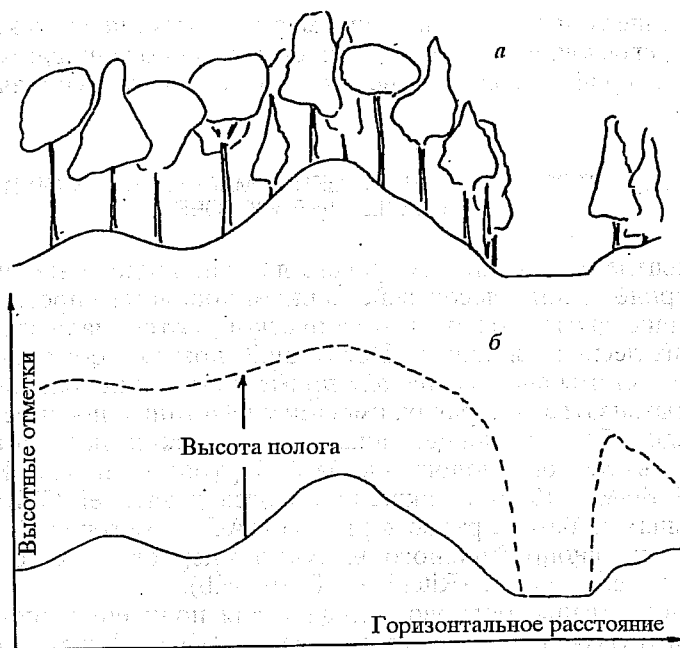


Рис. 94. Вертикальное сечение древостоя (а) и идеальный двойной профиль лесного полога и земной поверхности, иллюстрирующий точное определение высот древостоя (б) (Aldred, Bonnor, 1985)

растительности с плоским и пересеченным рельефами и с возможностью проверки влияния на точность съемки доли лиственных при летней и зимней съемках. В полетах с системой КЦДЗ записывались показатели навигационных сенсоров на бортовую систему получения данных, а сведения лазерные и 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 их часть просматривали на видеомониторе и наиболее типичные примеры распечатывали для последующего анализа. Для тестирования отдельных древостоев распечатывали серии отраженных импульсов (см. рис. 80).

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 на мониторе, иначе его не видно при дневном полете. Видеозапись тестовых полетов прокручивалась в обратном направлении и совмещалась с соответствующими 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. 95 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. 96), 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. Если трудности идентификации точек в полевых условиях делали полевые измерения невозможными, то получали СФГ-профиль (рис. 97) с помощью компьютерной системы графопостроения Стереокорд Канадской лесной службы. Путем использования СФГ-профиля заполнялись 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. 98 показано типичное отражение от открытого грунта. По оси x откладывается продолжительность возвращения импульса (нс), по оси y — амплитуда, или энергия отраженного импульса. Естественно, форма волны в этом случае простая, а импульс — корот-

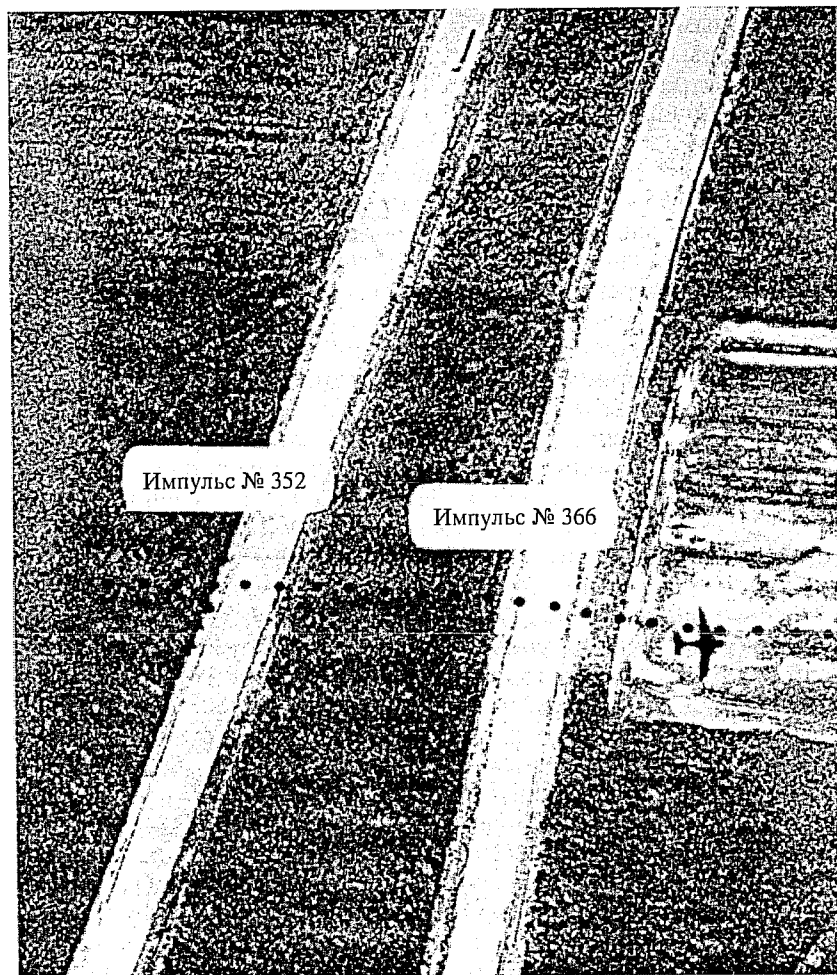


Рис. 95. Лазерный след на фотоснимке вдоль линии полета. Площадь лазерного пятна соответствует углу расхождения луча 10 мрад. Показан каждый второй сигнал (Aldred, Bonnор, 1985)

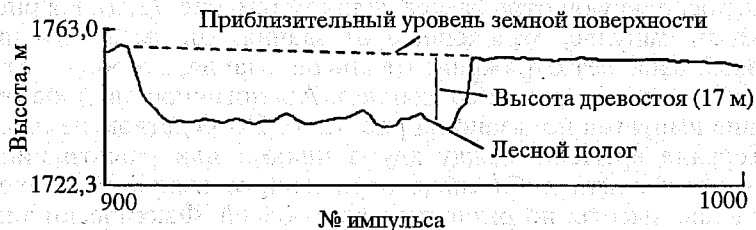


Рис. 96. Перевернутое изображение высотного профиля, полученного системой лидара-батиметра КЦДЗ (Aldred, Bonnор, 1985)



Рис. 97. Вертикальный СФМ-профиль отрезка маршрута, показанного на рис. 96 (Aldred, Bonnор, 1985)

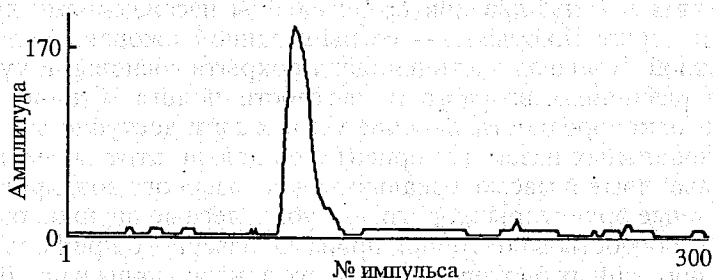


Рис. 98. Типичный лазерный импульс, отраженный от открытого грунта (Aldred, Bonnор, 1985)

кий, поскольку он отражается целиком (см. рис. 72, а). На рис. 99 показан импульс, отраженный от здания. Он имеет два пика: первый означает отражение от крыши здания, второй — от поверхности земли рядом со зданием. Аналогичное двойное отражение импульса показано на рис. 72, б. Посредством измерения интервала времени между двумя пиками или равнозначными точками фронта либо спада отраженного импульса получено значение высоты по разности двух уровней. Фактически значение высоты здания расходится с измеренным на земле или СФГ-способом в пределах 50 см. На типичных отражениях от полога лиственного древостоя в безлистном состоянии (рис. 100) и от полога хвойного древостоя (рис. 101) отчетливо виден двойной отраженный сигнал с различной энергией первого и второго импульсов. Проверяются расхождения 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 расстояний между фронтами импульса, хотя в сравнении с расстоянием между пиками он лишь незначительно лучше.

Система лидара НАСА. Данные дистанционного зондирования лесного полога, а также материалы наземной таксации получены на Голубой горе в Аппалачах (шт. Пенсильвания) (Nelson et al., 1984) и на юго-западе шт. Джорджия в опытном лесном массиве Международной бумагопроизводящей компании близ Бэйнбриджа (Nelson et al., 1988a,b). Основные типы леса на объектах в Пенсильвании представлены насаждениями дуба и кари, а в шт. Джорджия — сосны ладанной, ежовой, Эллиота и болотной. Большая часть площади покрыта сосновыми культурами различных возраста и 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 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. 102) отмечены рядом привязанных белых метеопаров и

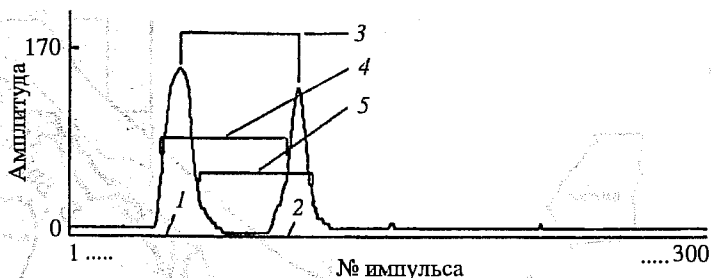


Рис. 99. Отражение лазерного сигнала от крыши здания (1) и от грунта (2) рядом с ним. Показано определение разности времени (3 — между пиками, 4 — между фронтами импульса, 5 — между спадами импульса) и разности высот по двойному отраженному сигналу. Разница во времени отражения соответствует высоте здания около 16 м (Aldred, Bonnор, 1985)

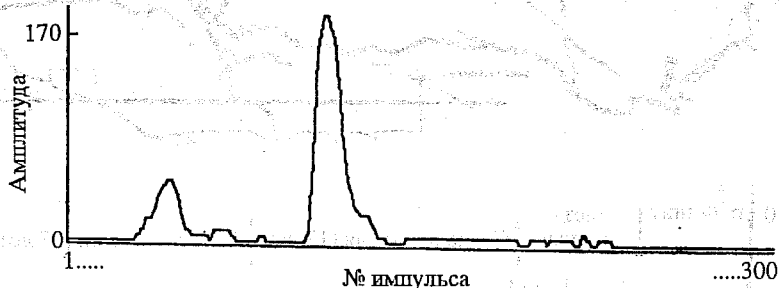


Рис. 100. Типичный импульс, отраженный от лиственного древостоя в безлиственном состоянии. Видно слабое отражение от полога и довольно сильное — от земли. Разница времени между пиками соответствует высоте полога около 20 м (Aldred, Bonnор, 1985)

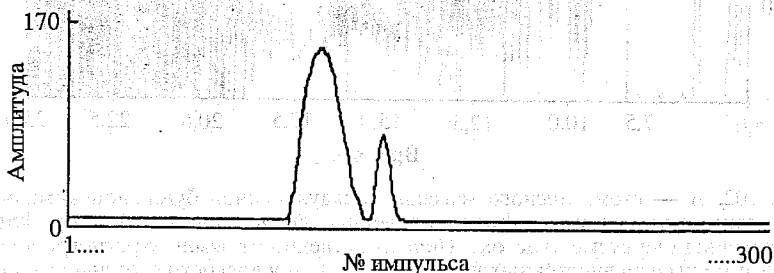


Рис. 101. Типичный импульс, отраженный от хвойного древостоя. Видно сильное отражение от полога и более слабое — от поверхности земли (Aldred, Bonnор, 1985)

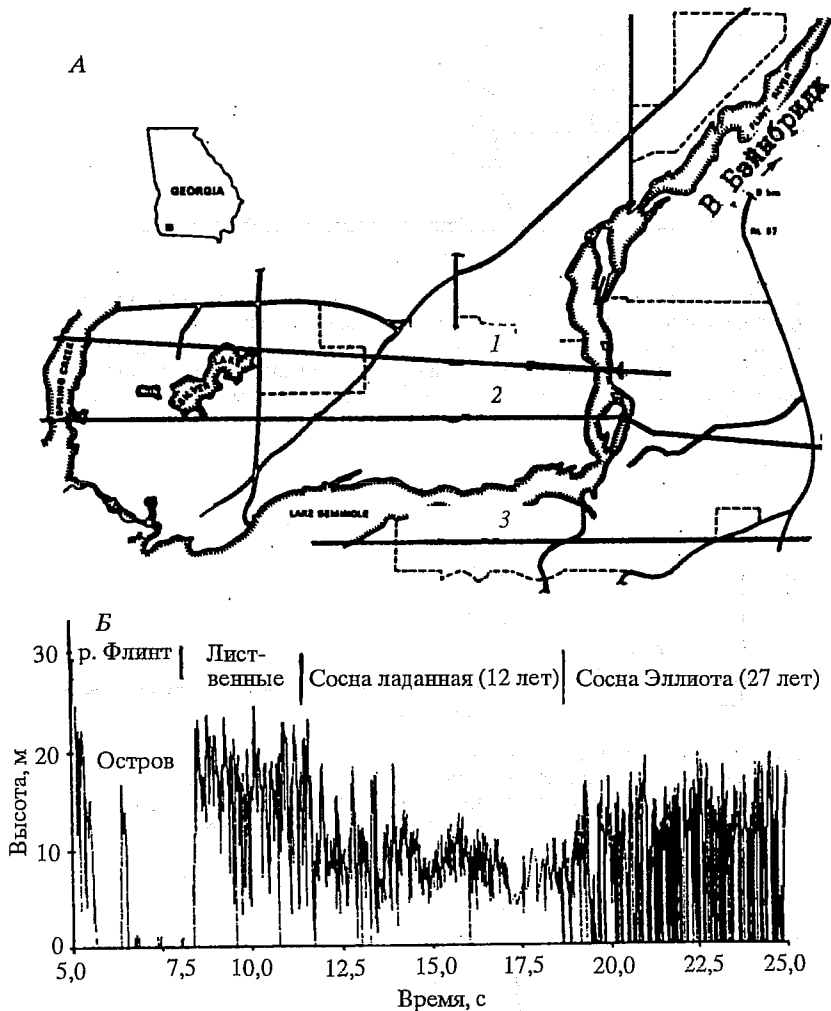


Рис. 102. А — схема лесного массива Международной бумажной компании; Б — данные лазерного профиля, полученные вдоль маршрута 1 над р. Флинт (выделенный на схеме участок). Непосредственно от земли зарегистрировано 0,5 % импульсов в лиственных древостоях, 1 % — в древостоях сосны ладанной и 27 % — в древостоях сосны Эллиота. Значимые наземные отражения импульсов, предварительно перехваченные пологом леса, получены в 17, 25 и 62 % случаев соответственно в лиственных, древостоях сосны ладанной и сосны Эллиота. Все маршруты (1—3) пройдены с востока на запад при скорости полета 100 м/с (Nelson et al., 1988a)

лентами флуоресцирующего оранжевого брезента, проложенного вдоль дорог и на открытых участках. Лазерные измерения проведены с высоты 150 м при скорости полета 100 м/с. Частота пульсаций лазера на маршрутах 1 и 3 была 200 Гц, на маршруте 2 — 100 Гц (Nelson et al., 1988a).

С помощью 35-миллиметровой маршрутной фотокамеры получено полное фотоизображение всех маршрутов. Для совмещения СФГ-данных с лазерными получены цветные фотоснимки. Номинальный масштаб составлял 1:1200, однако он существенно изменялся в связи с отклонением самолета от заданной высоты полета. На следующий день (около 9 ч) с высоты 1830 м проведена среднемасштабная фотосъемка (1:12 000) 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 Уэллопс. На графическое табло с высокой разрешающей способностью выводились данные счетчика интервалов (расстояние до точки отражения начального импульса) и данные мультистопа (расстояния до точек существенных вторичных отражений). Если существенное вторичное отражение получали от поверхности земли, оно регистрировалось в последнем ненулевом 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 непосредственной, поскольку 31 % импульсов от их общего числа (57 000) получены непосредственно от земли и 30 % — от земной поверхности, находящейся под лесным пологом. После оцифровки линии земли для каждого импульса рассчитывали высоту полога.

Зондирование лесного полога лидаром НАСА выполнено на более низких высотах и при меньшем размере светового пятна по сравнению с лидаром КЦДЗ, что давало предпосылки для более точной оценки массообразующих показателей лесного полога. Для реализации этих предпосылок организовали тщательную привязку лазерных профилей на местности с помощью навигационных ориентиров (шаров и брезентовых полос), 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, маршрута 2 (16,7 км) — десять и 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 инерциальной 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 представительством основных пород и высот древостоев в пределах породы.

Точность наземных и лазерных измерений оценена путем сравнения времени прохождения лазером контрольных точек, определяемого независимо друг от друга двумя различными исполнителями. Положение лазерных пятен вдоль маршрута в местах пересечения профилем видимых ориентиров определялось довольно точно. Сравнены моменты пересечения 14 надежных контрольных точек; средняя ошибка положения вдоль маршрута составила примерно 4 м (40 мс). Предполагалось, что ошибки наблюдений отсутствовали.

Труднее определить ошибку положения лазерного пятна поперек маршрута, равную суммарной ошибке положения контрольных точек и какой-то ошибке наблюдения. Использование фотоснимков и данных положения самолета 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 сегментов). Если ошибка буссоли (1°) 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 для того, чтобы 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 используются 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 сосны — болотной (Baldwin, Saucier, 1983), ладанной (Taras, Clark, 1975; Saucier, Clark, 1985), ежовой (Clark, Taras, 1976), Эллиота (Saucier, Clark, 1985) — и лиственных (Clark et al., 1985).

Из 125 заложенных пробных площадей 12 выбракованы из-за проблем с наземным контролем. Данные наземных измерений на каждой из оставшихся 113 проб, включающие оценки запасов и фитомассы древостоев, скоррелированы с соответствующими лазерными данными. В табл. 57 представлен неполный перечень наземных и лазерных показателей, определенных для каждой пробной площади.

7.2.2.2. Измерение высоты древостоя

7.2.2.2.1. Лазерная оценка высоты древостоя в произвольной точке профиля (система лидара КЦДЗ)

В имитационных экспериментах В. И. Солодухина с соавторами (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.

Таблица 57

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 (м) наибольшего дерева
Средняя высота полога (включая импульсы, отраженные от земли), м	Средняя высота деревьев, м
Стандартное отклонение высоты полога, м	Стандартное отклонение высоты дерева, м
Средняя высота полога (исключая импульсы, отраженные от земли), м	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, ежовой, болотной, Эллиота, лиственных, всех хвойных, всех деревьев
Модифицированная площадь профиля полога (высота полога за вычетом заданного предела исключения, проинтегрированная по длине пробы), м ² . Пределы исключения — 2, 5 и 10 м.	Фотодешифровочная оценка плотности полога

При тестовых полетах с лидаром КЦДЗ высота полета — в пределах 400—850 м при угле расхождения луча 5—20 мрад; диаметр светового пятна составлял в среднем около 6 м, изменяясь в пределах от 2 (400 м; 5 мрад) до 17 м (850 м; 20 мрад). Высота здания 16 м измерялась лидаром КЦДЗ с ошибкой в пределах ± 50 см. Если принять во внимание, что крыша здания представляет собой 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. 103); в-третьих, лазерное пятно накрывает 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 мень-

Лазерные импульсы

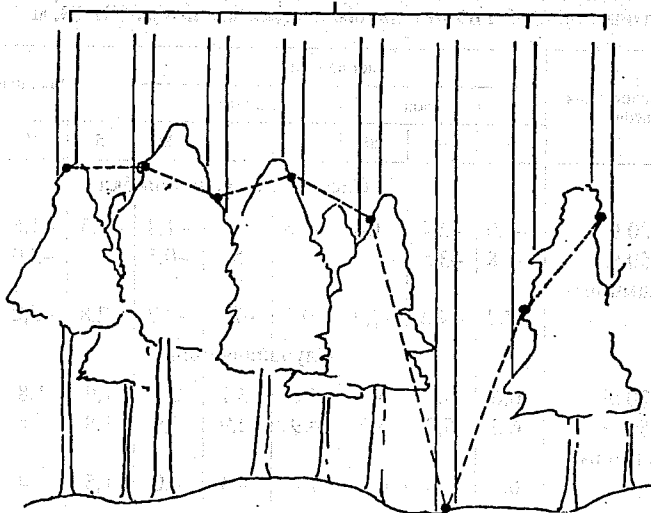


Рис. 103. Схема отражения лазерных импульсов от крон деревьев, показывающая занижение общей высоты профиля (пунктирная линия) (Aldred, Bonnor, 1985)

ше лазерное пятно, тем труднее его привязать в натуре к конкретному дереву.

Изложенные особенности являются источником ошибки, имеющей систематическую и случайную составляющие. В табл. 58 приведены систематические ошибки определения высоты древостоя в точке профиля, выраженные средней разностью между лазерным и полевым замерами. Систематическая ошибка для хвойных — 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 выявлено и в эксперименте с лиственными древостоями, однако величина ошибки в этом случае 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 тенденция ее снижения по мере увеличения угла

Таблица 58

Систематическая и случайная ошибки при измерении высоты древостоя в точке профиля по отдельным импульсам лазера КЦДЗ, м

Способ распознавания импульсов	Лиственные						Хвойные		
	с листвой			без листвы					
	5	10	20	5	10	20	5	10	20
Систематическая ошибка									
На пороге 20 %	-6,0	-2,4	-1,4	-6,6	-5,9	-1,8	-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 %	6,6	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

Примечание. 5, 10, 20 — угол расхождения луча, град.

расхождения луча примерно одинакова как в облиственном, так и в безлистном состоянии лиственных пород.

Случайная составляющая ошибки, выраженная как стандартное отклонение разности между лазерным и натурным замерами, незначительна у хвойных, но существенно больше — у лиственных (см. табл. 58). Это различие, вероятно, связано с более однородным строением полого исследуемых хвойных древостоев (культуры) по высоте и плотности, а также с возможностью довольно простого и точного замера высот в природе. 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 облиственном состоянии оказалась несколько большей, чем в безлистном (см.



Рис. 104. Зависимость коэффициента детерминации (а) и остаточного стандартного отклонения (б) уравнения (234) 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)

табл. 58). Тенденция снижения случайной ошибки с увеличением угла расхождения луча сохранилась.

В ходе предварительного анализа отдельных лазерных импульсов проверено несколько определителей высоты древостоя по форме волны импульса. Установлено, что определители “между пиками” и “между фронтами импульса” лучше, чем определители “между спадами импульса”.

В ходе последующей серии экспериментов исследован более широкий диапазон порогов определителя (от 1 до 100 % макси-

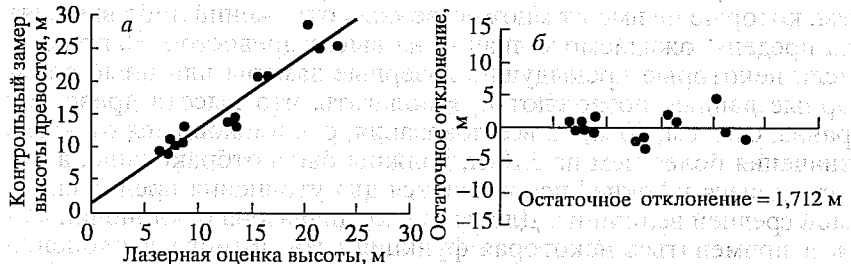


Рис. 105. Зависимость контрольной высоты древостоя (а) и остаточного отклонения (б) от измеренной лазером высоты по замерам множественных отражений импульса на пороге 85 %, выполненным в 17 древостоях различной высоты (Aldred, Bonnor, 1985).

$$Y = 1,13244 \cdot X + 1,22334, r^2 = 0,930$$

мальной высоты первого пика), чтобы выбрать из них оптимальный. Вся совокупность порогов проанализирована по данным множественных отражений импульса от 17 древостоев известной высоты как хвойных, так и лиственных. Рассчитано линейное регрессионное уравнение

$$H_k = a_0 + a_1 \cdot H_n, \quad (234)$$

где H_k и H_n — соответственно контрольный и лазерный замеры высоты полога, м. Регрессионный анализ позволил выявить скалярный 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. 104), которое оказалось равным 85 %, а порог 100 % (т. е. определитель “между пиками”) дал результат, близкий к оптимальному. Регрессионное уравнение, соответствующее порогу 85 % (рис. 105), показывает, что измеренная лазером высота древостоя в точке устойчиво меньше контрольной (на 2 м).

Для улучшения репрезентативности лазерных пятен на полог 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 кластерный метод не улучшает результат.

Для повышения точности определителей использовано несколько критериев отбраковки тех лазерных показателей 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 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 древостоев. Использование

тщательно подобранного “окна” может существенно улучшить результаты. По-видимому, необходима также отбраковка отраженных импульсов с единственным пиком, которые не дают информации о высоте древостоя. В любом случае такие импульсы необходимо учитывать для последующего анализа плотности полога.

7.2.2.2.2. Лазерная оценка средней высоты древостоя на профиле таксационного выдела (система лидара KLD3)

Когда методы идентификации импульсов разработаны, можно от анализа содержания информации отдельных импульсов перейти к анализу последовательности множественных импульсов на лесных площадях с относительно однородным пологом (таксационных выделах). Методика основана на анализе серии импульсов, отраженных от древостоя, выделенного на аэрофото-снимке. 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 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. 106—108).

Значения высот древостоя, полученные после обработки информации зеленого луча, наносились на диаграмму в виде вертикальных точечных линий (вниз от вершин крон). Линия, соеди-

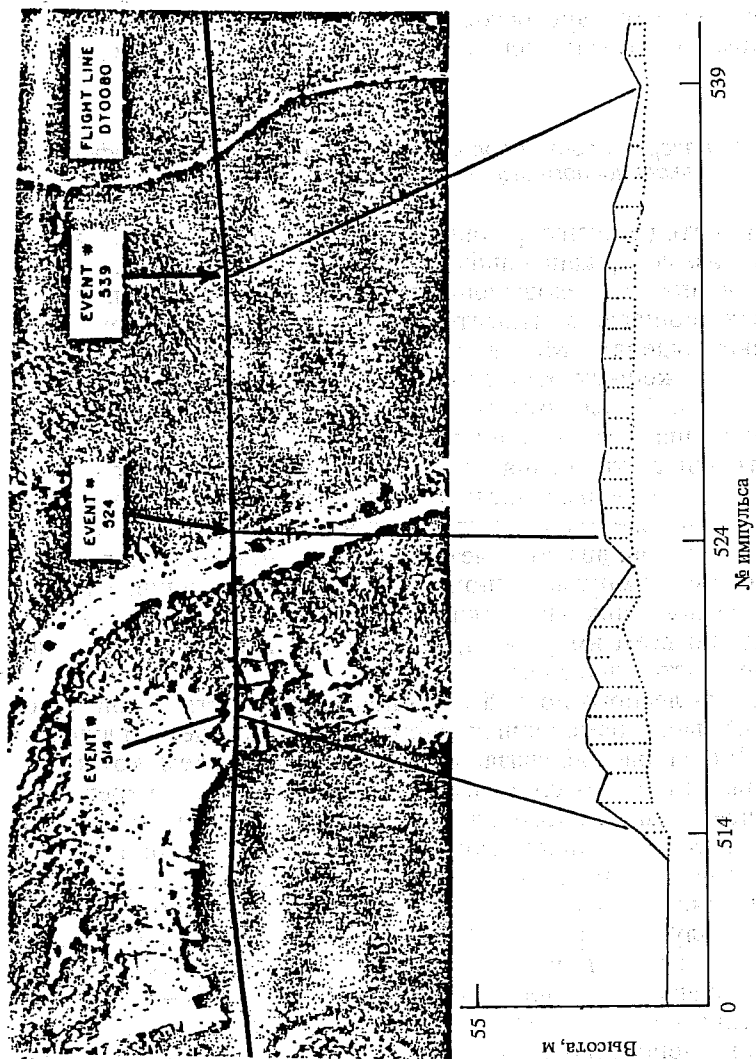


Рис. 106. Иллюстрация лазерного следа, нанесенного на маршрутный фотоснимок (вверху). Профили лесного полога и поверхности земли вдоль линии полета, построенные по измеренным лазером расстояниям от самолета до полога и по значениям высот древостоев, полученным после обработки множественных отраженных импульсов (внизу) (Aldred, Bollag, 1985)

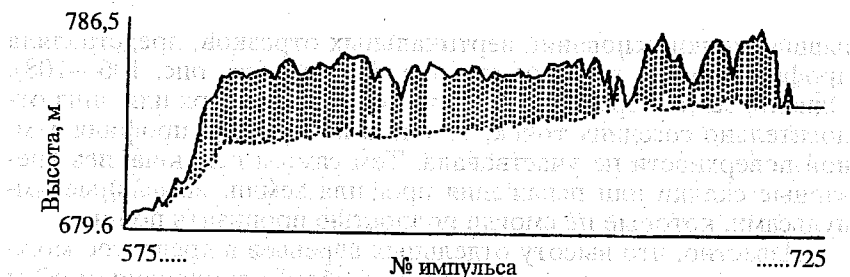


Рис. 107. Двойной профиль лиственного полога и земли, полученный по разности первого и последнего пиков отраженного импульса и по расстоянию от самолета до полога. Около 15 % импульсов не смогли пронизать полог (Aldred, Bonnor, 1985)

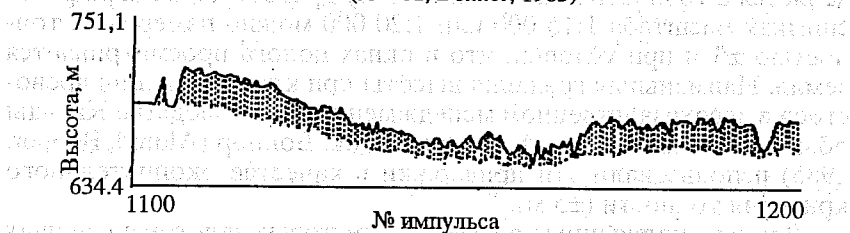


Рис. 108. Двойной профиль хвойного полога и земли, полученный по разности первого и последнего пиков импульса и по расстоянию от самолета до полога. Около 5 % импульсов не смогли пронизать полог (Aldred, Bonnor, 1985)

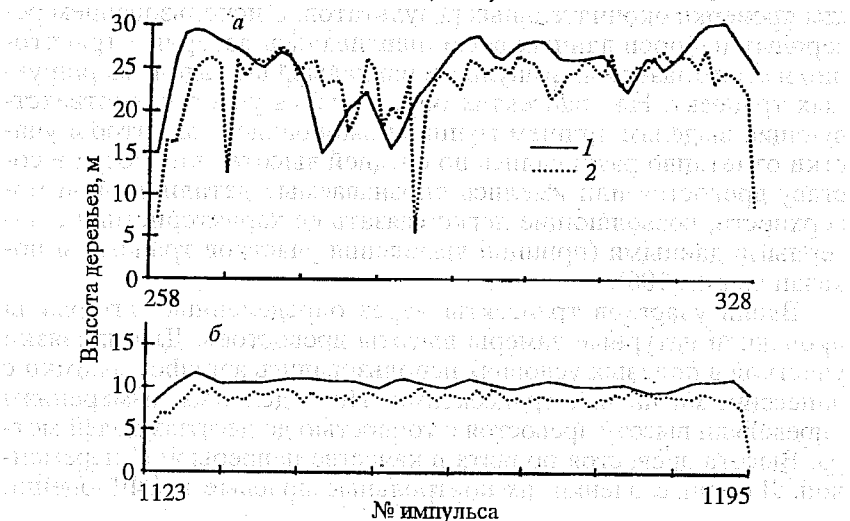


Рис. 109. Профили лиственного (а) и хвойного (б) древостоев, построенные по данным полевых (1) и лазерных (2) замеров (Aldred, Bonnor, 1985)

нявшая точки оснований вертикальных отрезков, представляла профиль земной поверхности под пологом (см. рис. 106—108). 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 пронизать полог.

Известно, что высоту отдельных деревьев в древостое можно измерить наземным или СФГ-способом с отклонением ± 2 м на доверительном уровне 95 % (Aldred, Lowe, 1978). Средняя высота древостоя по измерениям отдельных деревьев обычно определяется с точностью ± 3 —4 м. Высоту древостоев на аэрофотоснимках масштаба 1:15 000 или 1:20 000 можно измерить с точностью ± 5 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. Боннор (Aldred, Bonnor, 1985) использовали эти придержки в качестве окончательного критерия точности (± 5 м).

Данные, полученные в ходе двух тестовых залетов на первых двух этапах исследований, разделены на две части: одна из них использовалась для методических разработок и предварительной проверки лазерных данных, а вторая была зарезервирована для проверки окончательных результатов. С использованием резервных наборов данных восстанавливались лазерные траектории и серия лазерных импульсов накладывалась вдоль маршрутных трансект. На трансектах определялись участки, соответствующие выделам, причем границы выбирались так, чтобы участки отчетливо различались по средней высоте, плотности и составу древостоя или имелись опознаваемые детали земной поверхности, позволяющие легко связать ее характеристики с лазерными данными (принцип выделения участков трансекты показан на рис. 106).

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 древостоя с точностью до десятых долей метра. Высота древостоя принята в качестве непрерывной переменной. Лазерные оценки, их контрольные полевые и СФГ-оценки

Таблица 59
**Статистики точности оценки высоты древостоев
 по данным импульсно-периодического лазера КЦДЗ, м**

Показатель	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

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. 109 показано соотношение высот, замеренных лазером и в поле. После корректировки на величину средней систематической ошибки определены остаточные систематические ошибки (как средние величины смещения) для пяти значений угла расхождения луча и варьирование (как случайное отклонение) (табл. 59).

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 (см. табл. 59). Это эквивалентно точности $\pm 4,1$ м на доверительном уровне 95 %, что превышает уровень требуемой точности.

7.2.2.2.3. 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 оцен-

ки высоты отдельных деревьев, а не высоты полога в определенной точке профиля. Было взято несколько различных лазерных показателей, отражающих разные характеристики высоты лесного полога, чтобы установить, какая из них лучше для точного прогноза наземных оценок высот деревьев (Nelson et al., 1988a). Эти 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);
- 4) среднее значение наибольших лазерных оценок и среднюю высоту пробы.

Приведем лазерные характеристики высоты полога, рассчитанные для 20-метровых маршрутных сегментов (пробных площадей):

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, проходящие сквозь полог (прямо отраженные от земли исключаются).

МПП2 — 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.

Оказалось, что переменные по первой позиции, включающие первую... десятую наибольшие высоты, средние значения двух, трех и т. д. наибольших высот, дают по существу одинаковые результаты. Для первой позиции принято среднее значение трех наибольших определенных лазером высот. Эти показатели рассчитаны в зависимости от средних и наибольших высот 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 учитывающая импульсы, прямо отраженные от земли (СРНБЗ), объясняют большую часть изменчивости средней высоты деревьев, опреде-

ленной 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 верхушечным его побегом (рис. 110). Среднее значение трех наибольших определенных лазером высот лучше всего подходит для оценки наибольшей высоты деревьев на пробе, определенной наземной таксацией. Результаты расчета уравнений вида $Y = a_0 + a_1 X$ для этих переменных приведены в табл. 60 и показаны на рис. 111.

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 величинами высот деревьев, измеренных лазером и наземным способом. Оно 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, уменьшается. Эта закономерность замечена после стратификации 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 представлены главным образом хвойными (около 80 % проб содержали в своем составе более 70 % хвойных) 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 до-

Рис. 110. Распределение разностей между лазерными (СРНБЗ) и наземными замерами высот деревьев (Nelson et al., 1988b)

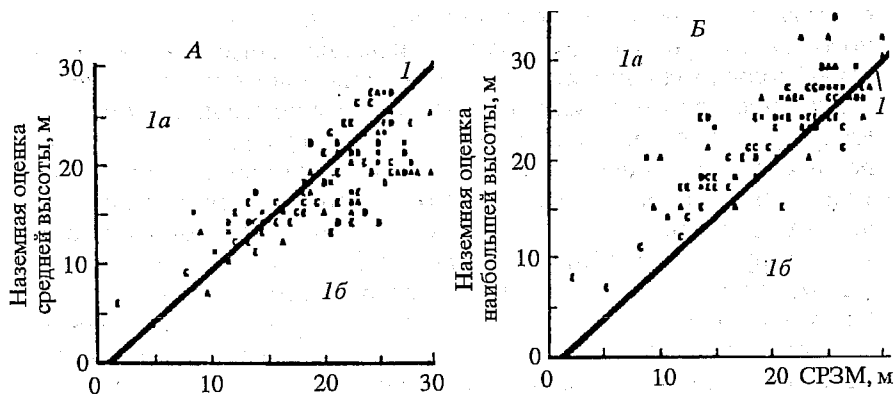
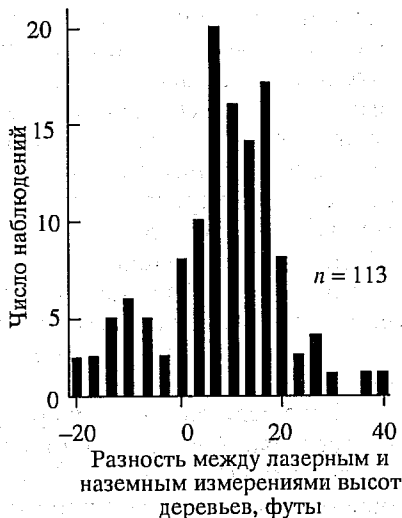


Рис. 111. Соотношение между средним значением трех наибольших определенных лазером высот (СРЗМ) и средней высотой деревьев по наземной таксации (А) и наибольшей высотой деревьев по наземной таксации (В); 113 наблюдений стратифицированы по плотности полога 0—20, 20—40, 40—60, 60—80 и 80—100 % импульсов, отраженных прямо от земли; I — линия равных наземных и лазерных оценок высот (Nelson et al., 1988a), Ia — занижение наземной оценки, Ib — завышение наземной оценки

Таблица 60
Линейные зависимости $Y = a_1 \cdot X + a_0$ между показателями высоты деревьев, полученными лазером и наземными измерениями

Порода	Наземная оценка средней высоты деревьев (з/п)							Наземная оценка наибольшей высоты (з/п)		
	СРЗМ (з/п)				СРНБЗ (з/п)			СРЗМ (з/п)		
	n	a_1	a_0	R^2	a_1	a_0	R^2	a_1	a_0	R^2
Сосна (итого)	85	0,689	4,496	0,65	0,771	6,106	0,65	0,726	8,459	0,68
В том числе										
ладанная	21	0,518	6,318	0,83	0,596	7,300	0,78	1,066	2,926	0,91
ежовая	11	0,366	11,64	0,74	0,476	11,34	0,83	0,352	18,31	0,75
Эллиота	36	0,951	-0,697	0,62	0,876	4,664	0,49	0,844	5,395	0,69
болотная	17	0,759	3,094	0,78	0,895	3,965	0,87	0,805	6,439	0,81
Лиственные и смешанные	28	0,505	7,231	0,62	0,570	8,596	0,57	0,705	10,28	0,66
Всего	113	0,639	5,308	0,64	0,720	6,809	0,63	0,711	9,098	0,66

Примечание. з/п — зависимая переменная, зп/п — независимая переменная, n — число наблюдений.

полнительных залетов (см. табл. 66, б в разделе 7.3.2.3), показала наличие существенных систематических занижений — на 27—29 %. Случайные отклонения составляли 4—5 %.

7.2.2.2.4. Оценка верхней высоты древостоев однопрофильным бортовым лазерным дальномером

Как показали недавние исследования Гидрологической лаборатории в Белтсвиле (США) (Ritchie et al., 1993a,b), высота полога в пределах пробной площади может быть достаточно точно оценена с помощью обычного импульсно-периодического лазерного дальномера при высоте полета 100—300 м и скорости полета 50—100 м/с. Использован арсенид-галлиевый диодный лазер с частотой пульсаций 4000 в секунду на длине волны 904 нм. При этом интервалы между последовательными импульсами на местности по линии полета составляли 0,012—0,025 м при точности отдельного измерения 5 см. Показания дальномера привязывались к местности с помощью видеосъемки (60 кадров в секунду) и корректировались показаниями гироскопа и акселерометра, а также данными геопозиционной спутниковой системы.

Показания высоты полога в пределах выдела усреднялись путем объединения их в блоки по 5—8 импульсов и сопоставлялись с наземными измерениями высот 10 наибольших деревьев,

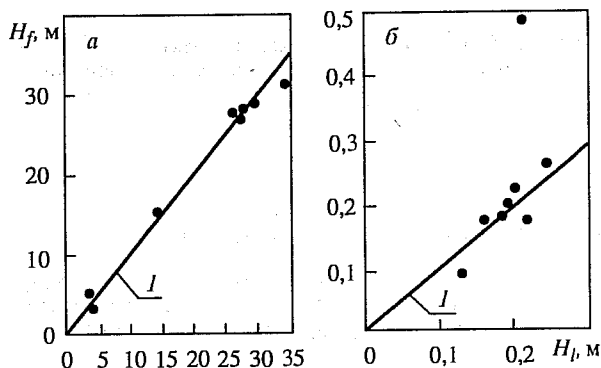


Рис. 112. Соотношение между лазерными (H_l) и наземными (H_g) измерениями верхней высоты лесного полога, выполненными в штатах Миссисипи (а) и Аризона (б); I — линия равных наземных и лазерных оценок высоты полога (Ritchie et al., 1993a)

произвольно взятых на выделе. Для сопоставления брали 5, 10 и 15 % наибольших значений лазерных замеров на выделе. При 5- и 10 %-х выборках расхождение между наземными (H_g) и лазерными (H_l) измерениями недостоверны на уровне $t_{0,01}$ (рис. 112). Древостой в шт. Миссисипи, представленные сосняками с примесью лиственных (см. рис. 112, а) характеризовались относительно равномерной горизонтальной структурой, а в шт. Аризона (см. рис. 112, б) маршруты проходили по горной полупустынной местности, покрытой куртинами кустарника. В последнем случае наземные измерения иногда приходилось выполнять в стороне от маршрута полета, и, видимо, поэтому расхождение наземных и лазерных данных во втором случае намного больше ($R^2 = 0,75 < 0,98$).

7.2.2.3. 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).

7.2.2.3.1. Оценка плотности полога лидаром КЦДЗ

При оценке плотности полога древостоев системой лидара КЦДЗ применены тот же подход и те же переменные, что и при измерении высоты древостоев. Проанализированы следующие переменные (рис. 113):

- 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 древостоя).

Контрольные данные плотности полога определяли СФГ-способом (рис. 114) путем кумулятивного измерения перекрытых кронами длин участков профильной линии (трансекты) и де-

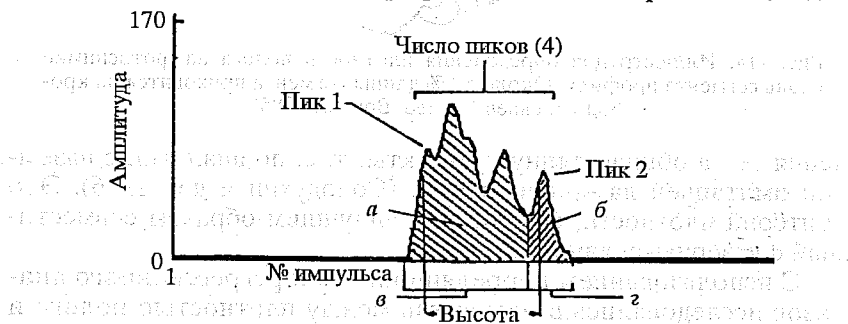


Рис. 113. Множественное отражение импульса с некоторыми характеристиками, используемыми при оценке плотности полога (Aldred, Bonnor, 1985).

Площадь отражения: *а* — пологового, *б* — наземного; отражение: *в* — полога, *г* — земли

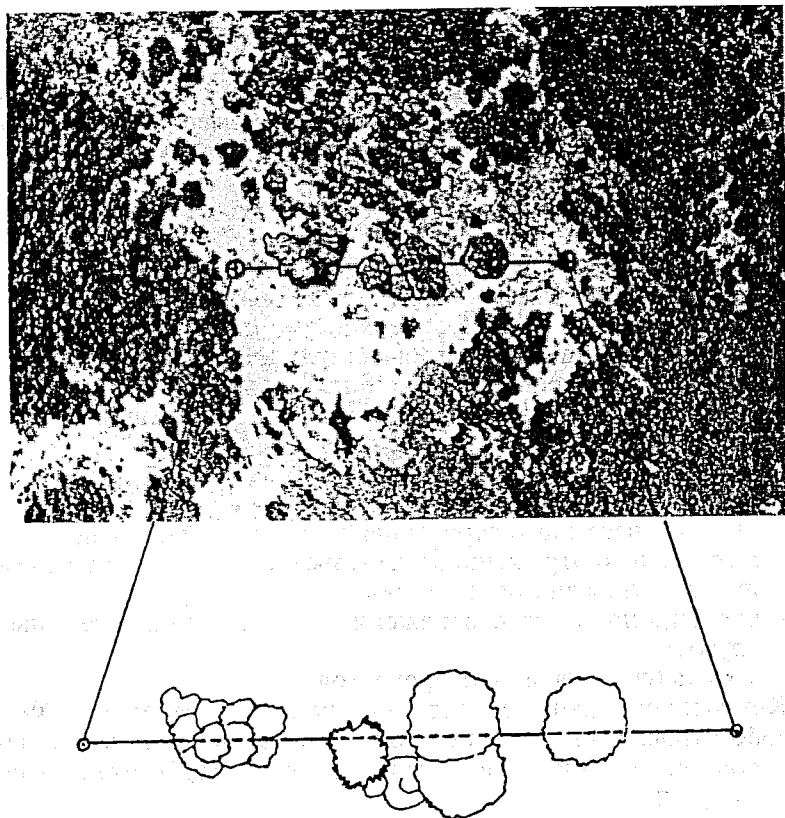


Рис. 114. Иллюстрация определения плотности полога на фотоснимке вдоль сегмента профиля. Около 50 % длины сегмента приходится на кроны деревьев (Aldred, Bonnog, 1985)

ления 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 анализов исследовались взаимосвязи между плотностью полога и лазерными переменными. Уравнения связи оценивали по “наилучшей подгонке”, характеризуемой стандартной ошибкой регрессии и коэффициентом детерминации. Наилучшие моде-

ли всегда включали в качестве переменных величин процент одиночных импульсов и среднюю амплитуду отраженного от земли импульса. Установлено, что чем выше процент одиночных импульсов, тем ниже плотность полога; чем слабее отражение от земли, тем плотнее полог.

Характеристики полученных регрессионных моделей связаны с углом расхождения луча. В табл. 61 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—4 и 9 статистически 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 $\pm 15\%$ от фактической в течение 95 % времени полета (95 %-й доверительный интервал).

Выполнена также 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 %-ми классами плотности полога (табл. 62). 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 КЦДЗ можно считать удовлетворительной. В пределах одного класса плотности (90) из 29 древостоев 26 правильно идентифицированы по плотности полога, что составило вероятность 89 %. Поскольку древо-

Таблица 61

Характеристика моделей плотности погода, использующих данные лидара КЦДЗ

Угол расхождения луча, мрад	Номер 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

Таблица 62

Матрица парного сопоставления оценок плотности (по пяти классам) погода, 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	26	35
Всего	2	2	9	19	29	61

Таблица 63

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

Число переменных			
1	2	3	4
Маршрут 1			
$\frac{+3^*}{0,53}$	$\frac{-4, +6}{0,60}$	$\frac{-4, +6, -1}{0,62}$	$\frac{+3, +6, +5, -1}{0,62}$
Маршрут 2			
$\frac{+3}{0,45}$	$\frac{-4, +6}{0,62}$	$\frac{-4, +6, +2}{0,63}$	$\frac{+3, +6, +5, +2}{0,65}$

* (+), (-) — соответствующие знаки регрессионных коэффициентов.
 Примечание. В числителе — № переменных, в знаменателе — R^2 .

стои отбирались по методу случайной выборки, пять классов плотности представлены не одинаково, особенно — класс плотности 90.

7.2.2.3.2. Оценка плотности полога лидаром НАСА

Плотность полога определяли на аэрофотоснимках, где по привязочным маркерам обозначали линию 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 — количеством пар последовательных импульсов, в которых расстояние от самолета до кроны различалось более, чем на 5 мс;
- 2 — отношением количества импульсов, достигших земли, к общему числу импульсов, отраженных от кроны;
- 3 — отношением количества импульсов, где высота дерева не зарегистрирована по форме волны, к общему количеству импульсов, отраженных от кроны;
- 4 — отношением количества импульсов, где высота зарегистрирована по форме волны, к общему количеству импульсов, отраженных от кроны;
- 5 — отношением количества импульсов, где высота деревьев слишком мала, чтобы зарегистрировать отражение от земли (выбрано слишком большое расстояние задержки), к общему количеству импульсов, отраженных от кроны;
- 6 — площадью профиля полога — площадью профиля между линией верхней границы полога и линией рельефа;
- 7 — отношением количества импульсов, отраженных прямо от земли плюс отраженных от земли под пологом, к общему числу импульсов;
- 8 — разностью между максимальной и средней (с учетом импульсов, отраженных прямо от земли) лазерными оценками высоты деревьев, деленной на максимальную оценку;
- 9 — произведением переменных 7 и 8.

Результаты регрессионного анализа приведены в табл. 63 отдельно для двух полетных маршрутов на горе Голубая в Пенсильвании (Nelson et al., 1984). В регрессионном анализе

задействовано девять переменных, но поскольку 91 % изменчивости, объясняемой этими девятью переменными, приходится лишь на четыре переменные, то общее число включенных переменных (см. табл. 63) 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 крон. В такой же степени информативна 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 перехватывают лазерные импульсы в более высоких точках полога.

7.2.2.3. Оценка плотности полога однопрофильным бортовым лазерным дальномером

В этом случае, имея замеры высот деревьев с интервалом 1,2—2,5 см по линии полета с улучшенной привязкой и коррекцией (Ritchie et al., 1993 a,b), получили возможность оценивать плотность полога по величине коэффициента вариации лазерных значений высот: чем меньше сомкнутость полога, тем выше изменчивость снимаемых значений. Наибольшими показателями изменчивости характеризовались несомкнувшиеся сосновые молодняки с высотой 1,3—1,4 м (73—93 %), а наименьшими — сомкнутые спелые сосняки с высотой 10—21 м (33—37 %). Дополнительной характеристикой плотности служит отношение среднего значения измеренных высот к максимальному, взятому в объеме 5 % от максимальных замеренных значений: в первом случае оно составило 0,30—0,31, а во втором — 0,69—0,73.

7.2.2.4. Оценка породного состава

Для определения породного состава по лазерным данным (лидар КЦДЗ) 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:

Градации	Критерий
X	Преимущественно хвойные (75 % 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 распределяли согласно трем градациям состава и сравнивали их с данными распределения 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 получен от переменной 5 (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 различным углом расхождения луча. В качестве контроля эти участки идентифицировались по породному составу СФГ-способом с проверкой в натуре. Результаты лазерной идентификации древостоев по породному составу представлены в табл. 64. Только в 46 древостоях (обведенная диагональ в табл. 64) из 120 имели место совпадения оценок, что составило 38 %, чуть выше вероятности случайного 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 оценки лучше.

Распознавание хвойных и лиственных в зимнее время довольно надежно можно осуществить с помощью обычного лазерного дальномера с частотой пульсаций 4000 в секунду, по величине коэффициента вариации и по отношению средней заме-

Таблица 64

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

Градация	Лазерные оценки породного состава			Итого
	Лиственные	Смешанные	Хвойные	
Лиственные	8	35	12	55
Смешанные	5	32	8	45
Хвойные	3	11	6	20
Всего	16	78	26	120

ренной высоты к максимальной (Ritchie et al., 1993a,b). Лиственные древостои характеризуются максимальным значением первого из показателей и минимальным — второго, а хвойные — наоборот. Однако распознавание хвойных и лиственных в безлистном состоянии проще делать визуально или по фотоснимкам.

Большие возможности для распознавания пород имеют лазерные системы при исследовании эффекта деполяризации отраженного сигнала в ИК-зоне спектра (Kalshoven, Dabney, 1988, 1990) и в исследовании явления вынужденной флуоресценции (Hoge et al., 1983; Chappelle, Williams, 1987), краткая информация о которых будет дана в главе 8.

В целом по разделу 7.2 можно сделать следующие 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 установления 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 от-

- дельного 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 от 2—5 до 10—15 м систематическое занижение высоты древостоя в точке системы КЦДЗ у лиственных сокращается от 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 6,5 до 5,0 м, а у хвойных — с 1,8 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 названном выше диапазоне остаточная систематическая ошибка изменяется в пределах от -2,1 до +1,1 м, случайная — от 2,3 до 1,8 м, а среднеквадратическая — от 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 113 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 шести маршрутам общей протяженностью 70 км показали систематическое занижение высоты полога в среднем на 4 м (27—29 %). Более точные несмещенные лазерные оценки можно получить для верхних высот древостоя бортовым импульсно-периодическим дальномером (арсенид-галлиевый ла-

- зер) с улучшенной коррекцией исходных данных по гироскопу, акселерометру и геопозиционной спутниковой системе с соотношением замеренных и фактических данных на уровне $R^2 = 0,75—0,98$.
9. Оценка плотности полога системой КЦДЗ не выходит за пределы $\pm 15\%$. Однако при идентификации плотности полога по пяти грациям 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 колебался от 0,66 до 0,90 и был связан с диаметром светового пятна. Наилучший результат ($R^2 = 0,90$) дала регрессионная модель при угле расхождения луча 5 мрад.
10. 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 крон. Коэффициент детерминации связи между лазерными и наземными оценками составил 0,60. Ориентировочное ранжирование древостоев по плотности можно осуществить с помощью обычного дальномера с высокой частотой пульсаций по показателю изменчивости замеров высот и по отношению средней высоты к максимальной.
11. Оценка породного состава системой лидара КЦДЗ по трем грациям (хвойным, лиственным и смешанным) 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 %).

7.3. МЕТОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ЛАЗЕРНОЙ ОЦЕНКИ ФИТОМАССЫ ДРЕВОСТОЕВ

7.3.1. ВЫВОД ОЦЕНОЧНЫХ РЕГРЕССИОННЫХ МОДЕЛЕЙ

С помощью регрессионного анализа можно определить связь с наиболее информативными лазерными переменными не только массообразующих показателей (высоты, плотности полога, диаметра крон и др.), но и самих показателей массы и объема на единице площади древостоя.

Сравнительно отработанная в практике лесоустройства технология дешифрирования аэрофотоснимков предполагает составление и последующее использование “аэротаблиц” запаса стволовой древесины, определяемого по его связи с дешифровочными показателями (например со средней высотой и сомкнутостью полога). При этом берется средняя высота только господствующих и согосподствующих деревьев (близкая к верхней высоте древостоя), а в расчете сомкнутости учитываются деревья только основного полога (Avery, Burkhart, 1983) (см. приложение 18).

Обычно основой таблиц служат многофакторные регрессионные уравнения. Для основных лесообразующих пород северо-запада России такие уравнения составлялись с привлечением в качестве определяющих факторов различных дешифровочных показателей в разных сочетаниях: средней высоты и сомкнутости полога; средней высоты, сомкнутости полога и среднего диаметра кроны и т. д. (Дмитриев и др., 1974; Сухих и др., 1976; Любимов, 1976; Вавилов, 1979; цит. по: Лесотаксационный..., 1984). В. И. Березиным (цит. по: Общесоюзные..., 1992) для сосновых насаждений рассчитано подобное трехфакторное уравнение ($R^2 = 0,769$) и для его практического применения предложена трехходовая номограмма. Если “аэротаблица” составляется только по дешифровочным таксационным показателям, то она включает систематическую ошибку, обусловленную субъективизмом дешифровщика, и непригодна для использования другими специалистами. Для всеобщего пользования необходима таблица, составленная по наземным замерам массообразующих показателей и дополненная тестовыми аэрофотоснимками для тренировки дешифровщика (Avery, Burkhart, 1983).

В конце 20-х годов Р. Хугерсхоф (цит. по: Sprig, 1960) предложил определять запас стволовой древесины как функцию площади вертикального профиля лесного полога (рис. 115), хотя при этом наблюдались значительные ошибки. С развитием технологии лесоинвентаризации на базе аэрофотоснимков появилась возможность измерять площадь вертикального профиля по стереоизображению полога на снимке (Sprig, 1960) и предполагалось, что названный дешифровочный показатель в качестве независимой переменной в уравнении запаса древесины объединяет в себе совокупный эффект высоты полога, его сомкнутости и среднего диаметра крон, опосредующего степень "неровности" верхней линии профиля.

Д. Смит (Smith, 1969) измерял площадь профиля полога сонового древостоя на аэрофотоснимке, используя стереоплоттер Келша (оценка высот деревьев) и точечный денситометр с апертурой 0,1×3,5 мм (оценка плотности фотоизображения). Полученные два показателя в совокупности давали более адекватное значение площади профиля, а следовательно — запаса древесины (рис. 116).

Г. Маклин и Дж. Мартин (Maclean, Martin, 1984) для оцифровки оптической плотности снимка применили сканирующий микроденситометр Photomation P-1700 с микролинзами, обеспечивающими размер пиксела 50 мкм, а также стереоплоттер Kern PG-2 с терминалом оцифровки данных. Поскольку стереоплоттер не регистрирует микроокна в пологе (рис. 117), площадь профиля корректировали по данным денситограммы путем вычитания площади микроокон. Скорректированную площадь профиля, деленную на его длину (m^2/m), использовали как независимую переменную в оценочном уравнении запаса стволовой древесины, выраженного в логарифмических единицах (рис. 118). Как следует из рис. 118 и 119, названная полулогарифмическая зависимость видоспецифична вследствие различия пород по соотношениям линейных размеров кроны и ствола. Сделан вывод, что доля остаточного варьирования оценок (12—25 %) может быть снижена дополнительными наземными измерениями на пробных площадях, однако это ведет к существенному удорожанию лесоинвентаризационных работ (Maclean, Martin, 1984).

Метод оценки запасов древесины по площади вертикального профиля полога получил дальнейшее развитие в работе Г. Маклина и У. Крейбила (Maclean, Krabill, 1986) с использованием

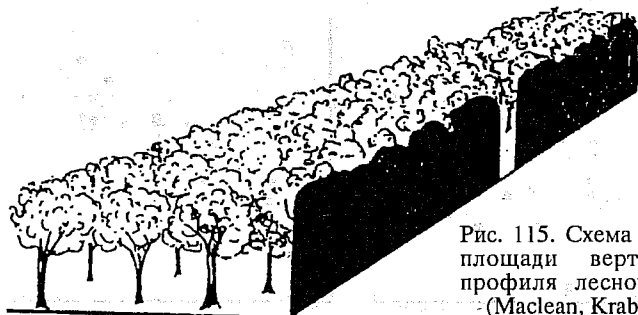


Рис. 115. Схема получения площади вертикального профиля лесного полога (Maclean, Krabill, 1986)

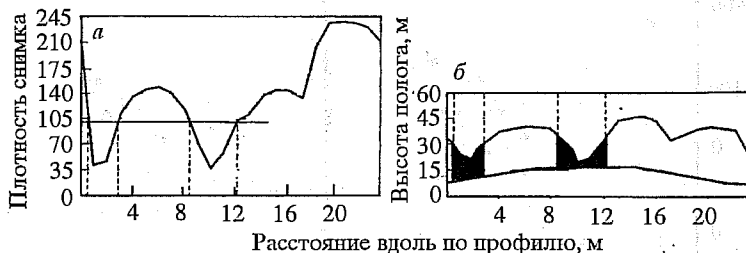


Рис. 116. Совмещение профилей полога, полученных посредством микроденситометра (а) и стереоплоттера (б). Заштрихованные области соответствуют микроокнам, обозначенным плотностью снимка, меньшей 100 (Maclean, Martin, 1984)

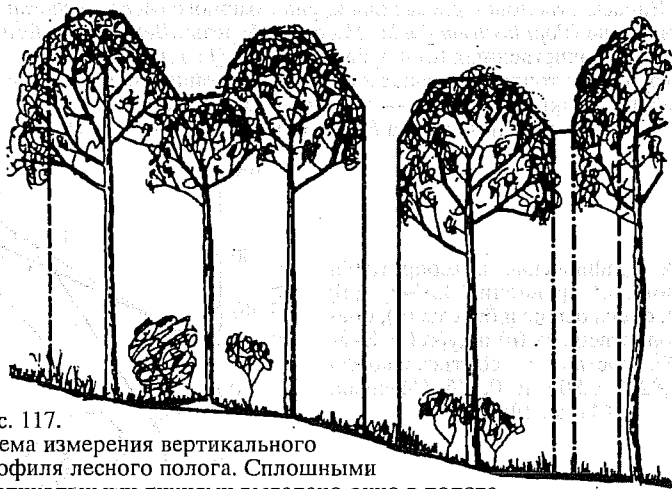


Рис. 117. Схема измерения вертикального профиля лесного полога. Сплошными вертикальными линиями выделено окно в пологе, а штрих-пунктирными — микроокно, не регистрируемое стереоплоттером (Maclean, Martin, 1984)

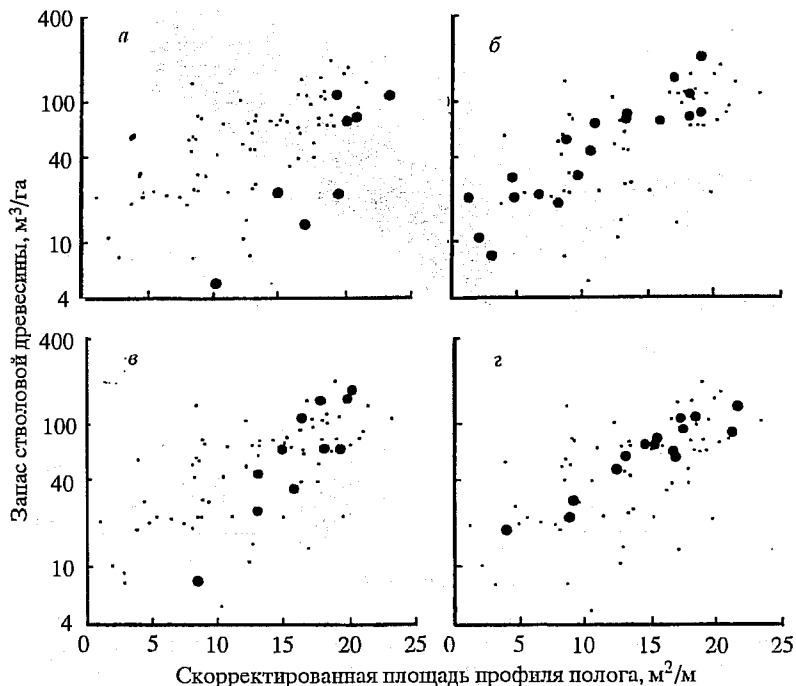
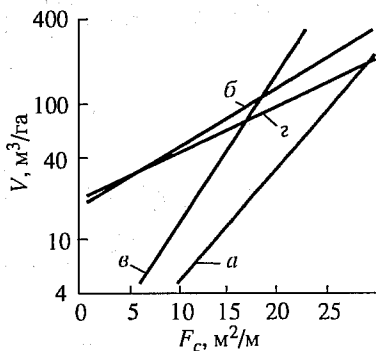


Рис. 118. Запасы ствольной древесины клена сахарного (*Acer saccharum* Marsh.) (а), смеси осины (*Populus tremuloides* Michx.) и березы (*Betula papyrifera* Marsh.) (б), смеси твердолиственных (в) и дуба красного (*Quercus rubra* L.) (з), обозначенные крупными точками, и запасы остальных хвойных и лиственных пород, обозначенные мелкими точками — в зависимости от скорректированной площади профиля полога F_c , m^2/m (Maclean, Martin, 1984)

Рис. 119. Графическая интерпретация регрессионных уравнений $\ln V \sim F_c$ для клена (а), смеси осины и березы (б), смеси твердолиственных (в) и дуба (з). Значения R^2 составили соответственно 0,754; 0,821; 0,805 и 0,876 (Maclean, Martin, 1984)



бортового лидара НАСА. Рассчитаны уравнения зависимости ликвидного запаса стволовой древесины, измеренного наземным способом, от площади профиля древесного полога, вычисленной по данным лазерного профиля. Уравнение имело вид

$$\ln V = a_0 + a_1 F, \quad (235)$$

где V — древесный запас, м³/га; F — площадь профиля древесного полога, м². И снова установлено, что при учете видового разнообразия, т. е. при разделении древостоев сосны ладанной и лиственных пород R^2 повысились на 15—20 % (они составляли 0,90). Было показано также, что модифицированный профиль полога 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 оправданно, когда в процессе наземной таксации введены ограничения экономической доступности, минимальной высоты или минимального диаметра дерева. Теоретически применение модифицированного профиля неприемлемо, когда рассматриваются общий наземный (а не ликвидный) запас или общая надземная фитомасса. Однако практически небольшой диапазон исключения может служить в качестве маскировки шума, наведенного кустарниками или подростом, которые не учитывались при полевых работах.

Р. Нельсон с соавторами (Nelson et al., 1988a) проверили несколько уравнений (связывающих наземные показатели с лазерными переменными), а также несколько лазерных переменных высоты деревьев и лазерных переменных сомкнутости полога, чтобы выявить, какие из них лучше для оценки фитомассы и запаса древостоя. На основе этой предварительной работы для дальнейшего исследования отобраны шесть лазерных переменных высоты деревьев и один показатель сомкнутости полога — переменная 9 (см. раздел 7.2.2.3.2).

Однако лазерные характеристики полога не дают информации о распределении стволов по диаметру на высоте груди d — 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 как функции лазерной оценки средней высоты древостоя H . Из 13 различных моделей, которые отражают связь D и H , проверенных Р. Куртисом (Curtis, 1967), наиболее простой и эффективной оказалась логарифмическая кривая

$$H = a_0 + a_1 \ln D, \quad (236)$$

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

При условии постоянства полндревесности (видового числа) стволов запас V на гектаре определяется так называемым видовым цилиндром (Кофман, 1986), т. е. величиной $D^2 \cdot H$:

$$V = a(D^2 \cdot H). \quad (237)$$

Уравнение (237) после логарифмирования приобретает вид

$$\ln V = a_0 + a_1 \ln D + a_2 \ln H \quad (238)$$

и после подстановки в (238) вместо $\ln D$ переменной H из выражения (236) Р. Нельсон с соавторами (Nelson et al., 1988a,b) предложили уравнение

$$\ln V = a_0 + a_1 H + a_2 \ln H, \quad (239)$$

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

Уравнение (239) по существу представляет модификацию аллометрической функции. Однако последняя при низких полнотах дает существенное завышение по отношению к эмпирическим показателям и более корректно запас рассматривается как функция высоты и полноты древостоя одновременно (Терсков, Терскова, 1980). Поскольку плотность полога после высоты — вторая наиболее информативная массообразующая переменная, Р. Нельсон с соавторами (Nelson et al., 1988a,b) предложили продвинутую зависимость

$$\ln V = a_0 + a_1 H + a_2 C, \quad (240)$$

(где C — сомкнутость (плотность) полога), которая по существу представляет собой модификацию уравнения (235). Уравнения (239) и (240) использованы и для оценки фитомассы древостоев

P (т/га), включающей общую надземную массу без листвы в свежем состоянии.

Путем подстановки в уравнения (239) и (240) проверено шесть различных лазерных характеристик дерева (см. раздел 7.2.2.3.2). Уравнением (240) 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 (см. раздел 7.2.2.3.2, переменные 7 и 8) они были перемножены (переменная 9).

7.3.2. ПРОВЕРКА ПРИГОДНОСТИ РЕГРЕССИОННЫХ МОДЕЛЕЙ

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

Эффективность уравнений (239) и (240) (проверено 12 моделей — 2 уравнения \times 6 лазерных характеристик высоты полога) оценена путем сравнения теоретических и фактических значений запаса и фитомассы древостоев по линейным соотношениям

$$V_T = a_0 + a_1 \cdot V_{\text{ф}}, \quad (241)$$

$$P_T = a_0 + a_1 \cdot P_{\text{ф}}, \quad (242)$$

где V_T и $V_{\text{ф}}$ — соответственно теоретические и фактические значения общего запаса, м³/га; P_T и $P_{\text{ф}}$ — соответственно теоретические и фактические значения надземной фитомассы древостоя в свежем состоянии без листвы, т/га. Из 113 пробных площадей сформирована случайная выборка из 75 проб (обучающая совокупность) для расчета уравнений (239) и (240). Затем эти регрессии сопоставлены с проверочной совокупностью проб из остальных 38, т. е. использованы соотношения (241) и (242), чтобы дать количественное выражение ошибок прогноза фитомассы и запаса древостоя на площадях, не включенных в регрессионный анализ. Результаты такого сопоставления приведены в табл. 65, где

Таблица 65

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

№ уравнения	Независимая переменная	Среднее фактическое	Среднее теоретическое	O _p , %	R ²	O _m	Скаттер, %***	
							±10	±25
Общий запас древесины								
(240)	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
(239)	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 надземная фитомасса в свежем состоянии								
(240)	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
(239)	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

* В этих колонках ед. изм. — м³/га.

** В этих колонках ед. изм. — т/га.

*** Пояснения см. в тексте.

R^2 — коэффициент детерминации уравнений (241) и (242); O_+ — отклонение как разность среднего теоретического значения минус среднее фактическое, деленная на среднее фактическое; O_{III} — среднеквадратическое отклонение

$$O_{\text{III}} = \sqrt{SSE/(n-2)}, \quad (243)$$

где SSE — сумма квадратов отклонений. Скаттер представляет второй способ оценки отклонений теоретических значений относительно фактических. Например, для общего запаса (модель (240), СРЗМ — первая строка таблицы) 13,2 % теоретических значений находились в пределах ± 10 % отклонения от фактических значений.

Результаты анализа большинства из 12 моделей очень близки, ни одна модель не выделяется (см. табл. 65). Такое единообразие результатов не является неожиданным, поскольку лазерные характеристики высоты полога тесно коррелируют между собой. Например, у четырех переменных, характеризующих площадь профиля полога (СРН, МПП2, МПП5, МПП10), коэффициенты корреляции превышают 0,95. Так же коррелируют между собой две переменные, непосредственно отражающие фактические высоты деревьев — СРЗМ и СРНБЗ.

При отборе лучшей модели принимались во внимание четыре критерия:

- 1) минимизация расхождения между средним теоретическим и средним фактическим значениями фитомассы, т. е. минимизация процента ошибки;
- 2) максимизация надежности линейного соотношения между теоретическими и фактическими значениями фитомассы;
- 3) минимизация стандартного отклонения, что снижает доверительный интервал и диапазон прогноза относительно линии регрессии между фактическими и теоретическими значениями;
- 4) минимизация скаттера, т. е. разброса теоретических значений относительно фактических наземных показателей.

Модель, которая оказалась лучшей по большинству перечисленных критериев, признана наиболее полезной. Ей стала вторая (по порядку, см. табл. 65) модель, включающая в качестве независимой переменной лазерную оценку средней высоты пробы СРН. В целом для прогноза запаса и фитомассы древостоя

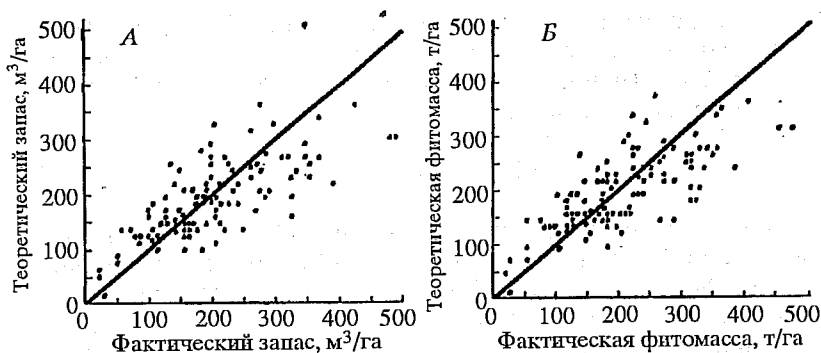


Рис. 120. Соотношение между теоретическими и фактическими значениями запаса (А) и фитомассы (Б) для 113 пробных площадей. Теоретические значения рассчитаны по уравнениям (244) и (245); показаны линии равных теоретических и фактических значений (Nelson et al., 1988a)

уравнение (239) более точное в сравнении с (240). После показателя СРН лучшими по большинству критериев были лазерные оценки МПП2 и МПП5.

Полезность названных трех переменных означает, что общая масса и запас древостоя зависят от площади 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 у основной части остальных лазерных переменных приемлемые результаты, они менее точны и (или) дают больший разброс данных. На рис. 120 показано соотношение между теоретическими и фактическими значениями фитомассы и запаса, определенными по уравнению (239) с использованием в качестве независимой лазерной переменной высоты СРН (все 113 пробных площадей). Уравнения (239) (см. рис. 120) характеризовались следующими константами и коэффициентами детерминации:

$$\ln V = 3,6102 + 0,0347(\text{СРН}) + 0,4481(\ln \text{СРН}); R^2 = 0,53; (244)$$

$$\ln P = 3,6383 + 0,0260(\text{СРН}) + 0,5118(\ln \text{СРН}); R^2 = 0,54; (245)$$

Две из шести лазерных переменных в двух оценочных уравнениях (239) и (240) дают неприемлемые результаты — среднее значение трех наибольших определенных 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.

Для обеспечения повторяемости полученных результатов выполнен дополнительный анализ (Nelson et al., 1988a), в ходе которого сформированы новые обучающая и проверочная совокупности пробных площадей (75 и 38 соответственно) случайным отбором из 113 проб. Из 38 тестовых пробных площадей предыдущего варианта 30 вошло в новую обучающую совокупность из 75 проб. Результаты показали, что (как и ранее) большинство результатов анализа моделей близки между собой. С использованием четырех упомянутых выше критериев уравнения (239) с переменными СРН и МПП2 снова оказались лучшими как по величине ошибки прогноза, так и по степени разброса данных. Расхождения между теоретическими и фактическими значениями возросли с 0,66 до 2,6 % и с 0,35 до 2,0 % для запаса и фитомассы соответственно (см. табл. 65, модель (239), СРН). Доля варьирования, объясненная теоретическими значениями запаса и фитомассы в новой проверочной совокупности, возросла до $R^2 = 0,58$ и $R^2 = 0,64$ соответственно с полученных при первом тестировании $R^2 = 0,53$ и $R^2 = 0,54$ соответственно (см. табл. 65). 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 древостоев. Однако локальное варьирование остается очень высоким. 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 фактической, рассчитанной по наземным измерениям.

7.3.2.2. Проверка моделей по данным, полученным при дополнительных залетах

Для проверки уравнений (244) и (245) на других массивах экспериментальных данных по тем же маршрутам (см. рис. 102), но в иной последовательности выполнены в двух повторностях дополнительные залеты по маршрутам: 1 (средний), 2 (северный), 3 (южный). Скорость полета 100 м/с, частота пульсаций лазера на маршруте 1 — 100 Гц (отражения импульсов через 1 м); а на маршрутах 2 и 3 — 200 Гц (отражения импульсов через 0,5 м) (Nelson et al., 1988b).

Для каждого из шести залетов (три маршрута, по два залета в каждом) вдоль линии полета определяли запас и фитомассу древостоев. Регистрировались не все импульсы, а только отдельные, приходящиеся на каждый 11-й метр линии полета. Они давали лазерные оценки высоты полого СРН (см. раздел 7.2.2.3.2), подставляемые в (244) и (245), так что оценки запаса V и фитомассы P приходились на каждый 11-й метр. Полученные значения V и P суммировались и рассчитывались средние величины и их отклонения по каждому залету.

Одиннадцатиметровый лаг установлен по результатам двух специальных исследований. В первом из них изучали влияние размера лазерной пробы на точность оценок фитомассы. Иными словами, устанавливали, сколько последовательных импульсов необходимо для расчета средней величины СРН. Результаты показали, что по мере уменьшения числа лазерных импульсов, учтенных при расчете величины СРН, снижались стандартные ошибки определения фитомассы древостоев. Поэтому, чтобы минимизировать изменчивость оценок запаса и фитомассы, для расчета СРН в уравнениях (244) и (245) использован только один лазерный импульс.

Во втором исследовании рассматривалось влияние автокорреляции на изменчивость оценок фитомассы. Предполагалось,

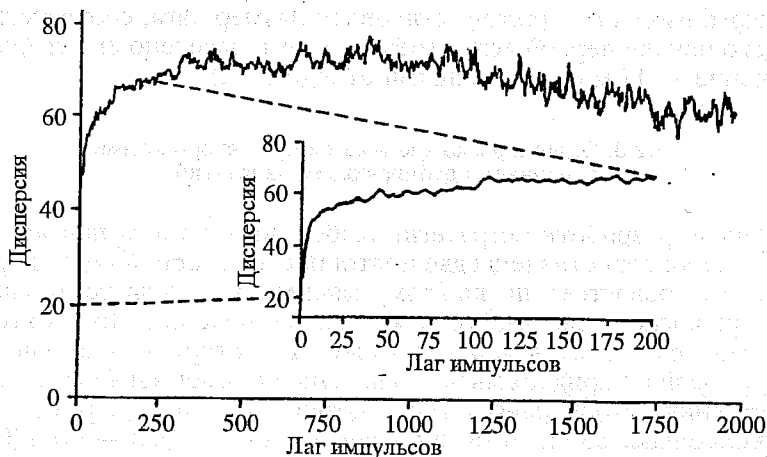


Рис. 121. Полувариограмма, показывающая изменение дисперсии лазерной оценки высоты дерева по мере увеличения расстояния (лага) между регистрациями импульсов (Nelson et al., 1988b)

что измерения высот по двум соседним отражениям импульсов коррелированы, поскольку они относятся скорее всего к одной и той же кроне. 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 можно получить с помощью метода полувариограммы (Trangmar et al., 1985; Warrick et al., 1986), которая представляет собой диаграмму зависимости видимой дисперсии от расстояния между замерами (лага наблюдений) (рис. 121). 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 (см. рис. 121). 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 установлен размер лага, соответствующего началу первой асимптоты, а затем выведено его среднее значение — 11 м (с колебаниями от 6 до 21 м).

7.3.2.3. Оценка расхождений между повторностями (основным и дублирующим залетами)

После разработки стратегии выборочного учета при лазерной съемке сопоставлены две повторности лазерной оценки 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 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. 66, а.

Данные табл. 66, а 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 невоспроизводимые схемы выборочного учета нежелательны (Cottam et al., 1953). Как видно из табл. 66; а, расхождения между двумя повторностями одного маршрута находятся в пределах 3—6 %.

Оценки запаса и фитомассы древостоев, полученные по лазерным данным, Р. Нельсон с соавторами (Nelson et al., 1988b) сопоставляли далее с наземными: Для расчета последних использована случайная подвыборка пробных площадей наземной таксации, первоначально примененных для вывода уравнений (244) и (245). Все таксационные пробные площади приведены к условиям трансект 1А, 2А и 3А, но ни одна из них — к трансектам 1Б, 2Б и 3Б. Эти наземные оценки фитомассы и запаса смещены (см. табл. 66, б) 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.

Таблица 66

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

Маршрут или повторность	Число выборочных импульсов	Запас, м ³ /га			Фитомасса, т/га			Высота, м		
		\bar{X}	σ	O., %	\bar{X}	σ	O., %	\bar{X}	σ	O., %
Между повторностями каждого маршрута (<i>а</i>)										
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	
Между объединенными повторностями и наземными данными (<i>б</i>)										
Лазер — по А	2454	154,0	4,1	8,0	164,0	4,3	7,9	10,5	0,30	28,5
Лазер — по Б	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	—

Примечание: \bar{X} — среднее значение, σ — стандартное отклонение.

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 составляют примерно 1/3 от отклонений между наземными оценками вследствие высокой интенсивности выборочного учета вдоль лазерных трансект. Лазерные оценки в табл. 66, *б* 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 22 (200 Гц). Табл. 66, *б* 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

Таблица 67

Значения средних запаса и фитомассы и оценки остаточного разброса данных для стратифицированных по породам и нестратифицированных показателей с использованием уравнения (239) и СРН в качестве независимой лазерной переменной (75 проб)

Зависимая переменная	Фактическое значение X	Теоретические значения							
		без стратификации				со стратификацией			
		\bar{X}	O, %	Скаттер		\bar{X}^*	O, %	Скаттер	
				±10 %	±25 %			±10 %	±25 %
Запас, м ³ /га Фитомасса, т/га	201,2	190,8	5,14	20,0	52,0	192,8	4,15	19,2	56,0
	214,7	205,4	4,42	20,0	57,3	206,1	3,98	22,6	58,6

* Взвешенное по числу наблюдений в каждой породе: $192,8 = [(172,7)(11) + (268,6)(11) + (174,9)(36) + (194,8)(17)] : 75$.

оценке не деструктивно с точки зрения оценки фитомассы и запаса, поскольку этот эффект легко устраняется путем моделирования.

7.3.2.4. 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 КЦДЗ близка к вероятности случайного совпадения.

В экспериментах с лидаром НАСА задача лазерной оценки состава не ставилась, а основное внимание уделено влиянию разделения выделов по породам на точность лазерной оценки фитомассы. Модель (239), хорошо подобранную с точки зрения точности и остаточного разброса данных, протестировали, чтобы 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. 67.

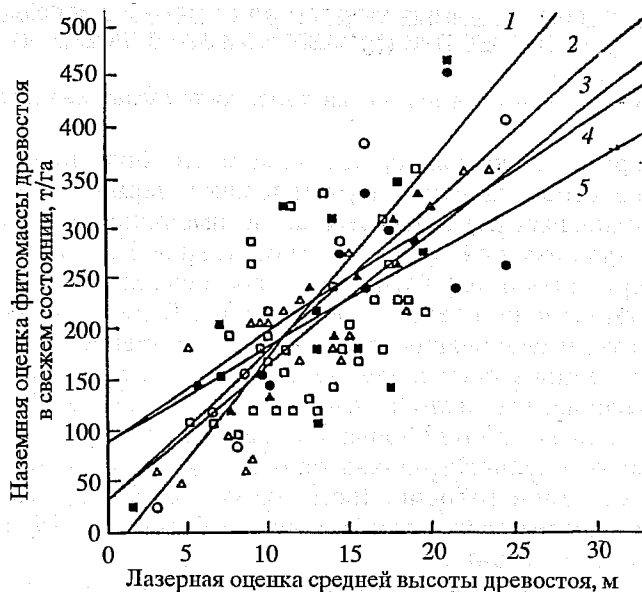


Рис. 122. Зависимость наземной оценки фитомассы древостоя от лазерной оценки средней высоты полога СРН.
 1 — сосна ладанная, 2 — сосна болотная, 3 — смешанные лиственные, 4 — сосна ежовая, 5 — сосна Эллиота (Nelson et al., 1988a)

Стратификация по породам лишь незначительно повышает точность (на 1,0—0,4 %) оценки и снижает разброс прогнозируемых значений (см. табл. 67). 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. 122) свидетельствует о бесполезности стратификации хвойных пород юга США для улучшения оценок фитомассы. Предыдущая работа Г. Маклина и У. Крейбила (Maclean, Krabill, 1986) предполагает, что стратификация имеет смысл на площадях с большим участием лиственных пород.

7.3.3. РЕГРЕССИОННЫЕ МОДЕЛИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ФИТОМАССЫ ДРЕВОСТОЕВ ПРИ ИХ ЛАЗЕРНОМ ЗОНДИРОВАНИИ

7.3.3.1. Оценка средних показателей фитомассы древостоев

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 (стволу, скелету кроны, хвое). В разделе приведены результаты исследований, выполненных в древостоях саксаула белого и черного, сосны, ели, березы и осины Урало-Казахстанского региона, где было заложено соответственно 75*, 75*, 93, 27, 50 и 30 (всего 350) пробных площадей в широких возрастных и эколого-ценотических диапазонах со взятием модельных деревьев по ступеням толщины (всего около 5000). Характеристика объектов исследований опубликована (Усольцев, 1988а; Усольцев и др., 1993, 1994в).

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

$$\ln(P_o/G) = 0,4260 + 0,8750\ln H; R^2 = 0,640; \quad (246)$$

$$\ln(P_r/G) = -0,8648 + 1,5258\ln H; R^2 = 0,635; \quad (247)$$

и черного

$$\ln(P_o/G) = 0,4348 + 1,2483\ln H; R^2 = 0,709; \quad (248)$$

$$\ln(P_r/G) = -1,1318 + 2,5373\ln H; R^2 = 0,627, \quad (249)$$

где P_o и P_r — соответственно общая и товарная масса (с диаметром среза более 2 см), т/га; G — сумма площадей проекций крон, тыс. м²/га; H — средняя высота древостоя, м. Для черносаксауль-

* Использованы материалы Казахского лесостроительного предприятия по фитомассе саксаульников.

ников получена также модель для оценки общей зеленой массы (побеги последних 1—2 лет с диаметром 2—3 мм) $P_{оз}$, т/га:

$$\ln(P_{оз}/G) = -0,4159 - 0,8843 \ln H - 2,4885(\ln H)^2; R^2 = 0,598. (250)$$

Уравнения (246)—(250) объясняют от 60 до 71 % общей изменчивости фитомассы саксаула, приходящейся на единицу площади проекций крон. Они проверены Казахским лесохозяйственным предприятием при устройстве саксаульников в 1984 г. по СФГ-методу и по обычной наземной технологии на площади 100 тыс. га. Отклонения при оценке запасов не превышали 7 % (Усольцев, 1988а).

Насаждения лесообразующих пород лесной зоны (Урала и Северного Казахстана) образуют сомкнутые древостои, 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 (239) (Nelson et al., 1988а,b), а также аллометрическая функция. Результаты их расчета в сравнении с экспериментальными данными приведены на рис. 123. Расчет уравнений, аналогичных (239), для остальных фракций фитомассы дал существенно более низкие значения R^2 для массы скелета кроны (68—78 %) и неприемлемо низкие — для массы листвы (хвои) (0,4—4,2 %). Поэтому при их последующем расчете введены три модификации:

во-первых, для гармонизации, т. е. согласования между собой различных фракций фитомассы применен рекурсивный принцип;

во-вторых, массу хвои вводили в уравнение не в абсолютном, а в относительном выражении, в процентах к массе стволовой древесины;

в-третьих, в уравнения включены блоковые фиктивные переменные (Дрейпер, Смит, 1973), характеризующие видовую принадлежность древостоя: $X_1 = 0, X_2 = 0, X_3 = 0$ — 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 (В. Усольцев, А. Усольцев, 1996, в)

Рис. 123. Зависимость массы стволовой древесины сосны (а), ели (б), осины (в) и березы (г) в абсолютно сухом состоянии Урало-Казахстанского региона от средней высоты древостоев.

I — линия регрессии $\ln P_s = 0,3115 - 0,0580H + 1,9559 \ln H$; $R^2 = 0,872$; II — то же, $\ln P_s = 0,2230 + 1,5111 \ln H$; $R^2 = 0,874$ (см. табл. 68). Цифрами обозначена густота древостоев, тыс. экз/га

$$\left. \begin{array}{l} \text{I.} \quad \ln P_s = f(X_1, X_2, X_3, H, \ln H) \\ \text{II.} \quad \ln P_b = f(X_1, X_2, X_3, \ln H, \ln P_s) \\ \text{III.} \quad \ln(P_f/P_s) = f(X_1, X_2, X_3, \ln H, \ln H \ln P_b) \end{array} \right\}, \quad (251)$$

где P_s , P_b и P_f — соответственно фитомасса стволов, скелета кроны и хвои в абсолютно сухом состоянии, т/га.

При расчете уравнений (251) оказалось, что по массе стволов нет различий между сосной и елью ($t = 1,5 < t_{0,5} = 2$), а также между березой и осиной ($t = 0,7 < t_{0,5} = 2,0$). Поэтому из четырех выборок скомплектовано две (хвойные и лиственные). В этом случае различие между двумя группами пород достоверно ($t = 8,0 > t_{0,5} = 2,0$). Для хвойных лучший результат показало уравнение вида (239), а для лиственных — аллометрическое, приведенные в табл. 68 отдельно. При расчете уравнений для массы скелета кроны и массы листвы (хвои) видовая принадлежность древостоя оказалась значимой для всех пород: t -критерий констант a_1 , a_2 и a_3 составил от 2,7 до 7,9 $> t_{0,5} = 2,0$.

Из рис. 123 видно, что при одной и той же высоте древостоя фитомасса стволов прямо пропорциональна густоте. Поэтому в качестве второго приближения рассчитаны регрессионные модели общего вида

$$\ln P_i = f(X_1, X_2, X_3, H, \ln H, \ln N, \ln H \cdot \ln N). \quad (252)$$

Результаты расчета моделей (252) показали (см. табл. 68), что и в этом случае нет достоверного различия по массе стволов между сосной и елью ($t = 1,0 < t_{0,5} = 2$), а также между березой и осиной ($t = 1,3 < t_{0,5} = 2$). Различие 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. 68. При расчете продвинутых (включающих не только H , но и N) уравнений для остальных фракций фитомассы видовая принадлежность древостоя также оказалась значи-

Таблица 68

Характеристика уравнений, выражающих зависимость надземной фитомассы древостоев (P_i) от определяющих факторов*

Константы, независимые переменные и R^2	Первое приближение $P_i = f(H)$ для зависимых переменных			
	$\ln P_i$		$\ln P_i$	$\ln(P_i/P_s)^{***}$
	Хвойные	Лиственные		
a_0	0,3115	0,2230	-0,3622	5,5318
$a_1(X_1)$	0	0	<u>0,2228</u> 2,7	<u>0,7150</u> 7,9
$a_2(X_2)$	0	0	<u>0,3770</u> 4,5	<u>-0,6094</u> 6,8
$a_3(X_3)$	0	0	<u>0,2038</u> 2,8	<u>-0,3850</u> 5,4
$a_4(H)$	<u>-0,05805</u> 5,0	0	0	0
$a_5(\ln H)$	<u>1,9559</u> 16,2	<u>1,5111</u> 23,3	<u>0,5590</u> 4,9	<u>-1,7611</u> 14,9
$a_6(\ln N)$	0	0	0	0
$a_7(\ln H \ln N)$	0	0	0	0
$a_8(\ln P_s)$	0	0	<u>0,2660</u> 3,5	0
$a_9(\ln P_b \ln H)$	0	0	0	<u>0,1453</u> 5,2
R^2	0,872	0,874	0,724	0,821

Константы, независимые переменные и R^2	Второе приближение $P_i = f(H, N)$ для зависимых переменных			
	$\ln P_i$		$\ln P_i$	$\ln(P_i/P_s)^{***}$
	Хвойные	Лиственные		
a_0	-2,0713	-2,3375	1,8544	7,1990
$a_1(X_1)$	0	0	<u>0,0893</u> 1,2**	<u>0,6233</u> 7,3
$a_2(X_2)$	0	0	<u>0,3720</u> 5,2	<u>-0,6974</u> 8,2
$a_3(X_3)$	0	0	<u>0,2569</u> 4,1	<u>-0,4743</u> 6,9
$a_4(H)$	<u>-0,0417</u> 2,6	<u>-0,0417</u> 2,6	0	0

Константы, независимые переменные и R^2	Второе приближение $P_i = f(H, N)$ для зависимых переменных			
	$\ln P_s$		$\ln P_b$	$\ln(P_f/P_s)^{***}$
	Хвойные	Лиственные		
$a_5(\ln H)$	<u>2,6177</u> 12,2	<u>2,6177</u> 12,2	<u>-1,1048</u> 5,0	<u>-2,2165</u> 13,5
$a_6(\ln N)$	<u>0,7544</u> 6,7	<u>0,7544</u> 6,7	<u>-0,6871</u> 5,8	<u>-0,5442</u> 4,3
$a_7(\ln H \ln N)$	<u>-0,1582</u> 3,2	<u>-0,1582</u> 3,2	<u>0,0877</u> 2,3	<u>0,1248</u> 2,7
$a_8(\ln P_s)$	0	0	<u>0,8493</u> 9,1	0
$a_9(\ln P_b \ln H)$	0	0	0	<u>0,1161</u> 3,9
R^2	0,933	0,933	0,800	0,844

*В числителе — значения констант, в знаменателе — их значимость по Стьюденту.

** Константа значима на уровне t_{01} .

*** P_f/P_s — масса листвы, отнесенная к массе стволов, %.

мой для всех пород. Исключение составила константа a_1 (сопоставляющая сосну и ель по массе скелета кроны), значимость которой оказалась равной 1,2 (уровень t_{01}) (см. табл. 68).

Как было показано, легко идентифицируемым массообразующим показателем древостоя 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 (252) дополняется третьим массообразующим показателем — диаметром кроны D_k (м). При ее расчете, кроме экспериментальных данных H 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 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

$$\ln P_s = -2,0365 + \frac{1,5988}{13,4} \ln H + \frac{0,6988}{11,0} \ln N + \frac{0,7189}{4,0} \ln D_k; \quad (253)$$

$$R^2 = 0,981$$

объясняет 98 % общей изменчивости массы стволовой древесины, тогда как двухфакторное уравнение (252) — 93 %, а однофакторное (239) — 87 % (см. табл. 68). Судя по величине критерия Стьюдента в уравнении (253), вклад диаметра кроны в объяснение общей изменчивости фитомассы стволов наименьший в сравнении с H и N , а при расчете соответствующего уравнения для остальных фракций — практически нулевой ($t = 0,58—0,76 < t_{05} = 2$). Но поскольку при расчете последних учитывается P_s , 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 полога, предлагаются двухфакторные уравнения

$$\ln P_s = 0,8300 + \frac{2,4680}{12,6} \ln H - \frac{1,0503}{5,7} \ln D_k; \quad R^2 = 0,911; \quad (254)$$

$$\ln P_b = -0,8953 - \frac{0,1752}{2,3} \ln H \ln P_s + \frac{0,5267}{2,2} \ln P_s + \frac{1,2120}{5,8} \ln D_k;$$

$$R^2 = 0,719; \quad (255)$$

$$\ln(P_f/P_s) = 6,4219 - \frac{3,2911}{11,8} \ln H + \frac{0,9441}{3,3} \ln D_k + \frac{0,2848}{3,5} \ln H \ln P_b;$$

$$R^2 = 0,874. \quad (256)$$

При лазерном зондировании лесного полога второй по информативности переменной после высоты древостоя является вертикальная площадь полога F древостоя (уравнение 235), или

ее модификация — сомкнутость (плотность) C полога (уравнение 240). Поэтому в качестве окончательного варианта оценочных моделей фитомассы уравнения (254)—(256) дополнены третьей независимой переменной — показателем сомкнутости полога C , экспериментальные значения которой взяты одновременно с показателями D_k на упомянутых пробных площадях Аман-Карагайского бора. Получены следующие регрессионные модели (Усольцев, Логинов, 1997):

$$\ln P_s = 0,484 + 1,958 \ln H - 0,845 \ln D_k + 1,086 \ln C; \quad (257)$$

$$R^2 = 0,975; SE = 0,147;$$

$$\ln P_b = 0,466 + 0,902 \ln D_k + 0,294 \ln P_s; \quad (258)$$

$$R^2 = 0,712; SE = 0,330;$$

$$\ln(P_f/P_s) = 1,941 - 2,465 \ln H + 1,060 \ln D_k + 0,183(\ln H \ln P_b); \quad (259)$$

$$R^2 = 0,890; SE = 0,309,$$

действительные для естественных сосняков и культур островных боров Тургайского прогиба. Коэффициент детерминации уравнения (257) для массы стволов значительно выше, чем в (254), благодаря включению в него третьего массообразующего показателя. Все константы значимы на уровне t_{05} и выше. При одних и тех же значениях высоты, сомкнутости полога и среднего диаметра крон достоверного различия культур и естественных сосняков по показателям фитомассы не выявлено ($t = 0,3 \dots 1,6 < t_{05} = 2,0$).

Путем последовательного табулирования цепочки уравнений (257)—(259) получена табл. 69. Ее анализ показывает, что при постоянных высотах полога и средних диаметрах крон фитомасса всех фракций закономерно снижается по мере уменьшения сомкнутости полога, а при постоянных диаметрах крон и сомкнутости — возрастает: при 3-кратном повышении высоты полога увеличение по массе стволов — 9-кратное, по массе ветвей — 2-кратное, а по массе хвои составляет всего 10 %. При постоянных высоте и сомкнутости полога с увеличением среднего диаметра крон масса стволов закономерно снижается, а масса хвои и ветвей — возрастает. Это обусловлено снижением густоты, синхронным с увеличением среднего диаметра крон, при

Таблица 69

Зависимость фитомассы сосняков Амап-Карагайского бора от высоты полога (H), его сомкнутости (C) и среднего диаметра кроны ($D_k = 1-3$ м)

$H, м$	Фитомасса стволов, ветвей и хвои, т/га (соответственно верхняя, средняя и нижняя цифры)								
	$C = 0,9$			$C = 0,7$			$C = 0,5$		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
4	21,8	12,2	—	16,6	9,2	—	11,5	6,4	—
	3,9	6,2	—	3,6	5,7	—	2,1	5,1	—
	7,1	9,3	—	5,3	6,9	—	3,6	4,7	—
6	48,3	26,9	—	36,8	20,5	—	25,5	14,2	—
	5,0	7,8	—	4,6	7,2	—	4,1	6,5	—
	7,0	9,4	—	5,2	7,0	—	3,5	4,7	—
8	84,9	47,2	33,5	64,6	36,0	25,5	44,8	24,9	17,7
	5,9	9,2	12,1	5,4	8,5	11,1	4,9	7,7	10,0
	7,0	9,7	11,7	5,2	7,1	8,6	3,4	4,8	5,7
10	131,0	73,1	51,9	100,0	55,7	39,5	69,4	38,6	27,4
	6,7	10,5	13,7	6,2	9,7	12,7	5,5	8,7	11,4
	7,1	10,0	12,2	5,2	7,4	9,0	3,5	4,9	6,0
12	—	104,0	74,2	—	80,0	56,5	—	55,2	39,2
	—	11,7	15,2	—	10,8	14,0	—	9,7	12,6
	—	10,4	12,8	—	7,6	9,4	—	5,0	6,2

прочих равных условиях. При этом наименьшие значения D_k (и наибольшие густоты) соответствуют естественным соснякам, а наибольшие D_k (и наименьшие густоты) — культурам.

7.3.3.2. Оценка предельных показателей фитомассы древостоев

Приведенные в главе 5 модели предельных показателей фитомассы древостоев могут быть использованы при условии, если известны значения числа стволов на 1 га, получить которые при дистанционном зондировании лесов довольно сложно. В этой связи представляет интерес моделирование предельных показателей фитомассы в связи с высотой (а не густотой) лесного насаждения.

На каждом этапе онтоценогенеза древостоя имеется определенный биологический предел не только густоты, но и высоты древостоя. В рамках этого биологически обусловленного преде-

ла имеется некоторый диапазон варьирования высот, который зависит от добротности условий произрастания и определяет варьирование запасов наличного древостоя. Таким образом, мы приходим к упомянутому выше третьему типу колоколообразной кривой в структурно-функциональной организации лесных экосистем, описывающей изменение фитомассы древостоев в связи с условиями местообитания (Кузьмичев, 1985). Как отмечалось, кривые этого типа — результат комбинации двух противоположных монотонных трендов: возрастающей кривой массы среднего дерева с улучшением условий роста и соответствующим увеличением высоты древостоя в статике и убывающей или выпуклой кривой изменения числа стволов.

Если при расчете моделей предельных показателей фитомассы древостоев по их густоте в качестве исходной концепции использовано “правило 3/2”, которое часто рассматривается как один из наиболее общих принципов биологии растительных популяций (White, 1980), то при моделировании названных показателей по высоте древостоев в качестве исходной концепции может служить так называемый закон Эйхгорна. В 1902 г. при составлении ТХР сомкнутых пихтовых древостоев немецким лесоводом Ф. Эйхгорном установлено, что “...общая фитомасса есть функция только высоты древостоя без учета его возраста и класса бонитета”, т. е. “...одной определенной высоте для всех классов бонитета и возраста соответствует одна и та же общая фитомасса древостоя” (Eichhorn, 1902, S. 59). затем Ф. Эйхгорн показал наличие названной закономерности в древостоях бука обыкновенного (Eichhorn, 1904), а позднее Е. Герхардт подтвердил ее для ели и сосны (Gerhardt, 1909). С тех пор эта зависимость известна как продвинутый закон Эйхгорна, получивший многократное эмпирическое подтверждение и интерпретированный позднее как проявление закона аллометрии (Weihe, 1961; Thomasius, 1963; Кофман, 1986)

$$V = a \cdot H^b, \quad (259)$$

где a — константа начального роста, b — аллометрическая константа. Однако закон Эйхгорна не является альтернативой “правилу 3/2”, а напротив, как показал Г. Б. Кофман (1986), названные две концепции связаны между собой функционально. Иными словами, в основе закона Эйхгорна заложен все тот же принцип самоизреживания древостоев.

Расчет моделей предельных показателей фитомассы в связи с высотой древостоя, как и расчет предельных густотных трендов (см. главу 5), выполнен на зональном уровне на примере елово-пихтовых экосистем Северной Евразии, представленных 400 пробными площадями (см. приложение 8). Основу расчета составляет известная рекурсивно-регрессионный принцип, т. е. последовательная цепочка взаимосвязанных многофакторных уравнений. Как и при расчете предельных густотных трендов, названная цепочка состоит из четырех звеньев, каждое из которых представляет отдельный этап статистико-регрессионного анализа региональных различий. Если последние два из названных четырех этапов — $V = f(A, N, D, H)$ и $P_i/V = f(A, N, D, H)$ — идентичны таковым, рассмотренным в разделах 5.4 и 5.5 и представленным соответственно уравнениями (210) и (188), то первые два специфичны при расчете предельных траекторий фитомассы в связи с высотой древостоев. Это рекурсивные зависимости максимальных значений массобразующих показателей N_{\max} от средней высоты и возраста и D_{\max} — от средней высоты, возраста и густоты древостоев: $N_{\max} = f(A, H) \rightarrow D_{\max} = f(A, H, N)$. Рассмотрим каждую из них отдельно.

7.3.3.2.1. Траектории верхних пределов густоты в связи с высотой и возрастом древостоев

В разделе 7.3.3.1 при расчете усредненных трендов фитомассы древостоев в связи с их средней высотой по существу использованы закон Эйхгорна (260) и его модификация (239). Чтобы выйти на описание предельных трендов фитомассы в связи с высотой древостоя воспользуемся общей концепцией закона Эйхгорна, а также трактовкой В. В. Кузьмичевым (1985) третьего типа колоколообразной кривой продуктивности. Как упоминалось, одна из составляющих этой интегральной кривой продуктивности — убывающая кривая изменения числа стволов на 1 га в связи с высотой древостоя. В нашем случае это должна быть кривая для предельного числа стволов на 1 га. Такие кривые для нескольких древесных пород Калифорнии показаны Л. Рейнеке (Reineke, 1933) с тем отличием, что предельная густота рассматривалась в связи со средним диаметром, а не со средней высотой древостоя (рис. 124), и кривая называлась эталонной (reference curve), а не линией самоизреживания. Наличие такой кривой

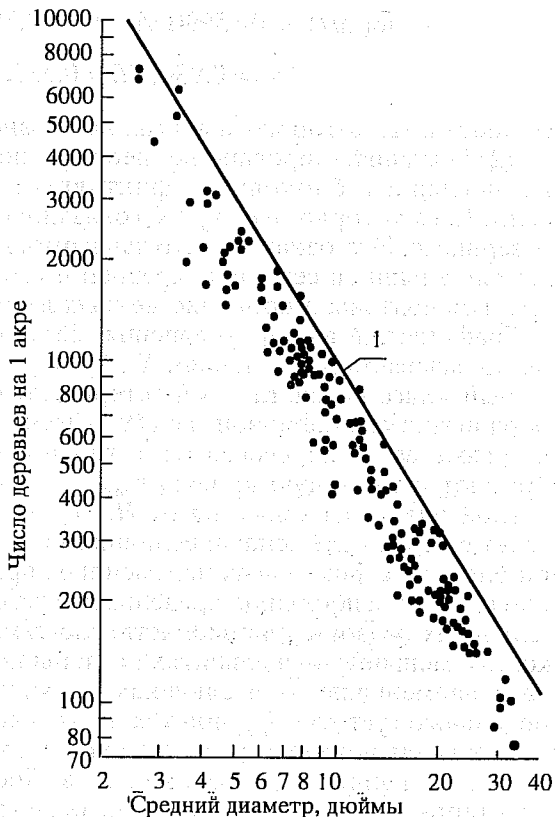
Рис. 124. Зависимость числа деревьев на 1 акре в древостоях пихты великолепной (*Abies magnifica* A. Милграу) от среднего диаметра.

1 — эталонная кривая, соответствующая густоте 1000 экз/акр при $D = 10$ дюймов (Reinecke, 1933)

подтверждается и нашим исследованием предельных траекторий в разрезах 5.2 и 5.3. В этом можно убедиться, развернув рис. 54, б и 55, б на 90° , т. е. поменяв местами оси координат: линия предельной густоты в зависимости от высоты среднего дерева проходит по верхнему пределу соответствующего поля рассеяния данных.

Для описания зависимости $N_{\max} \sim H$ в пределах класса возраста отбирались 2—4 максимальных значения N_{\max} в древостоях разной средней высоты. Их анализ показал, что левые ветви кривых $\ln N_{\max} \sim \ln H$ отклоняются от кривой самоизреживания, которая аналогична эталонной линии $\ln N_{\max} \sim \ln D$ на рис. 124. Зависимость $\ln N_{\max} \sim \ln H$ является специфичной для каждой возрастной группы и описывается уравнением скорее параболы, чем прямой линии. В итоге рассчитано уравнение:

$$\ln N_{\max} = -21,4314 + 0,6033X_1 + 0,3815X_2 - 0,5923X_5 + 21,0188 \ln A - 4,1973(\ln A)^2 - 7,1963 \ln H +$$



$$1,4046(\ln H)^2 + 0,8599(\ln A)^2 \ln H - 0,7639 \ln A (\ln H)^2; \quad (261)$$

$$R^2 = 0,930; SE = 0,357,$$

все константы которого значимы на уровне t_{05} и выше. Уравнение (261) специфицировано по шести регионам путем кодирования последних блоковыми фиктивными переменными (см. табл. 27), из которых две (X_3 и X_4) оказались статистически не достоверными. Это означает, что зависимость $N_{\max} = f(A, H)$ — общая для ельников северной, средней и южной тайги и для пихтарников подзоны широколиственных лесов (рис. 125, а).

Графический анализ уравнения (261) после его табулирования по задаваемым значениям X_1, X_2, X_5, A и H показывает, что каждый класс возраста A характеризуется в логарифмических координатах специфичной параболической (выпуклой) кривой, их правые ветви пересекаются и точки пересечения при $\Delta A \rightarrow 0$ образуют огибающую кривую $N_{\max} \sim H$, которая является предельной для задаваемых высот H . Их относительная иерархия может быть прослежена по величинам констант уравнения (261) при блоковых фиктивных переменных: при одних и тех же значениях A и H наибольшие предельные густоты N_{\max} имеют место в ельниках подзоны широколиственно-темнохвойных лесов, несколько меньшие — в ельниках подзоны широколиственных лесов и наименьшие — в ельниках таежной зоны. Наименьшие предельные густоты N_{\max} при тех же условиях в пихтарниках характерны для подзоны средней и южной тайги, а наибольшие — для подзоны широколиственных лесов. Последние в то же время характеризуются наименьшими предельными густотами N_{\max} по отношению к ельникам подзон широколиственных и широколиственно-темнохвойных лесов и находятся на одном уровне с таежными ельниками.

7.3.3.2.2. Траектории верхних пределов диаметра среднего дерева в связи с высотой, возрастом и густотой древостоев

Максимальное значение диаметра среднего дерева D_{\max} изменяется не только в связи с возрастом и густотой древостоев, как это имело место в уравнении (208), но также в связи с их средней высотой H . Поэтому на втором этапе анализа для получения исходных данных к расчету траекторий максимальных значений D_{\max} все экс-

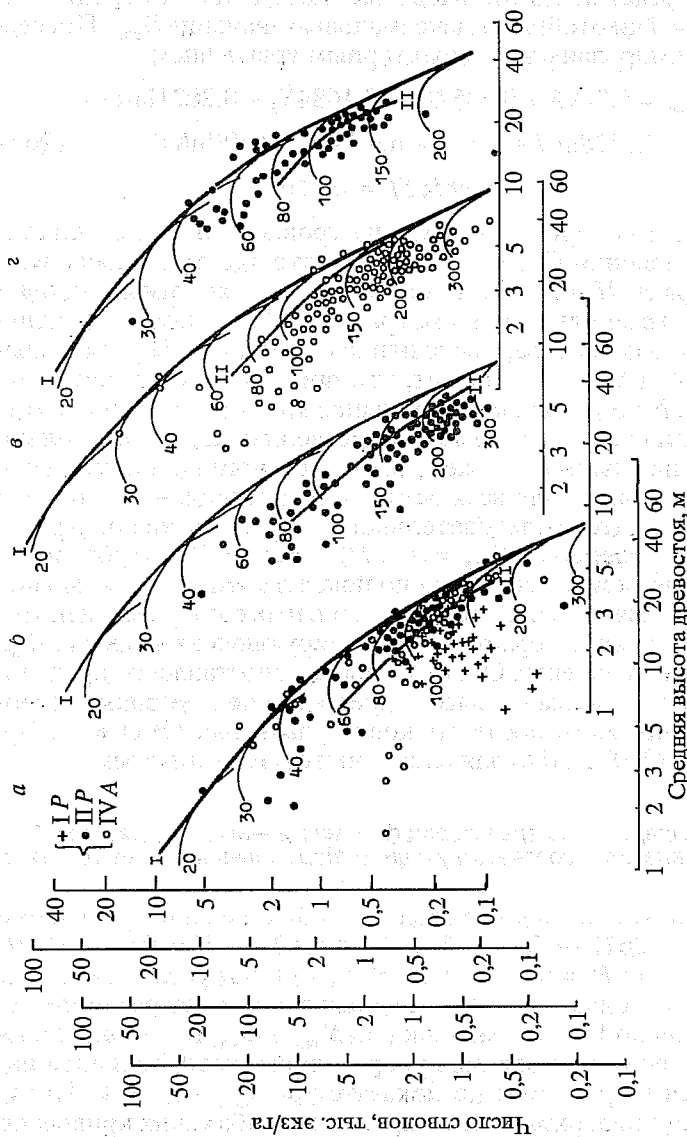


Рис. 125. Положение кривых $N_{\max} = f(A, H)$, полученных табулированием уравнения (261) по задаваемым значениям возраста (показан цифрами, лет) и средней высоты елово-пихтовых древостоев, относительно полей распределения всех экспериментальных данных, разделенных по подзонам:
 а — сланки северной, средней и южной тайги и пихтарники подзоны широколиственных лесов, б — сланки подзоны широколиственно-темнохвойных лесов, в — сланки подзоны широколиственных лесов, г — пихтарники средней и южной тайги. / — предельная отгибающая $N_{\max} \sim H$; // — траектории $N \sim H$ нормальных еловых и пихтовых древостоев, взятые из соответствующих ГХР (показания в тексте)

периментальные данные для ели и пихты, сгруппированные по регионам, распределены в трехходовые (по A , N и H) матрицы и из каждой их ячейки отобраны максимальные значения D_{\max} . Последние аппроксимированы многофакторным уравнением

$$\ln D_{\max} = 0,2693 + 0,1057X_2 + 0,1684X_3 + 0,2021\ln A + \\ + 0,2728\ln H + 0,1193(\ln H)^2 - 0,03619(\ln N)^2; \quad (262)$$

$$R^2 = 0,985; SE = 0,110,$$

все константы которого значимы на уровне t_{05} и выше. Анализ констант уравнения (262) показывает, что все три определяющих фактора A , H и N вносят статистически значимый вклад в объяснение изменчивости диаметра D_{\max} . Из блоковых фиктивных переменных достоверное влияние на величину D_{\max} оказывают только X_2 и X_3 . Это означает, что при условии равенства величин A , H и N по регионам наибольшее значение D_{\max} приходится на пихтарники подзоны широколиственных лесов, несколько меньшее — на ельники той же подзоны и минимальное значение D_{\max} является общим для всех остальных регионов — IP , PP , PA и PIP . В результате последовательного табулирования рекурсивной системы уравнений $N_{\max} = f(A, H)$ (261) $\rightarrow D_{\max} = f(A, H, N)$ (262) различия между регионами по показателям D_{\max} накладываются на различия по показателям N_{\max} и в итоге получаем некоторую промежуточную иерархию результирующих кривых для D_{\max} по зональному градиенту. Окончательное сопоставление предельных кривых фитомасса — высота древостоя по подзонам (регионам) можно провести после стыковки уравнений (261) и (262) с уравнениями (210) и (188) для елово-пихтовых древостоев.

7.3.3.2.3. Предельные траектории фитомасса—высота древостоя и их сопоставление с соответствующими "нормальными" траекториями

В результате последовательного табулирования уравнений $N_{\max} = f(A, H)$ (261) $\rightarrow D_{\max} = f(A, H, N)$ (262) $\rightarrow V = f(A, N, D, H)$ (210) $\rightarrow P_i/V$ или $P_i = f(A, N, D, H, P_i/V, V)$ (188) различия между регионами по показателю D_{\max} накладываются на различия по N_{\max} , различия по V — на различия по N_{\max} и D_{\max} и, наконец, различия по регионам по величине переводного коэффициента накладываются на различия по показателям N_{\max} , D_{\max} и V . Полученная в итоге иерархия результирующих огибающих кривых по

регионам показана на рис. 126. Анализ кривых показывает, что, как и в иерархии предельных огибающих фитомасса—густота, по траекториям фитомасса—высота также подтверждается общая закономерность профиля продуктивности, однако она выражена менее четко. Так, если для стволовой древесины траектории фитомасса—густота имели убывающую последовательность по регионам $IVP, IVA \rightarrow ШP \rightarrow IP, ПP \rightarrow ПА$ (см. рис. 57, в), то траектории фитомасса—высота для той же фракции имеют последовательность — $ШP, IVP, IVA \rightarrow IP, ПP \rightarrow ПА$ (см. рис. 126, б), т. е. во втором случае траектории делятся на меньшее число более укрупненных градаций. Если для массы корней траектории в первом случае имели убывающую последовательность — $IVP, IVA \rightarrow ШP \rightarrow ПP \rightarrow IP \rightarrow ПА$ (см. рис. 57, е), то во втором — $ШP \rightarrow IVP \rightarrow IVA \rightarrow ПP, IP \rightarrow ПА$ (см. рис. 126, а), т. е. во втором случае подзоны $ШP$ и IVP поменялись местами. Если для массы хвои в первом случае имеет место последовательность $IVP, IVA \rightarrow ШP \rightarrow ПP \rightarrow ПА \rightarrow IP$ (см. рис. 57, д), то во втором — $ШP, IVP \rightarrow IVA \rightarrow ПP \rightarrow IP \rightarrow ПА$ (см. рис. 126, в), т. е. во втором случае общая закономерность профиля продуктивности в некоторой степени нарушается. Эта тенденция сохраняется и по траекториям для массы ветвей: в первом случае имеем последовательность $IVP, IVA \rightarrow ШP \rightarrow ПP \rightarrow ПА, IP$ (см. рис. 57, з), а во втором — $ШP, IVP \rightarrow IVA \rightarrow ПP, IP \rightarrow ПА$ (см. рис. 126, г).

Огибающие результирующие кривые (траектории) представляют собой геометрическое место точек пересечения левых ветвей (а не правых, как было показано на рис. 61 для соотношения $P_i \sim N$) колоколообразных кривых $P_i \sim H$ по классам возраста, положение которых относительно экспериментальных данных фитомассы для ельников подзоны широколиственных лесов показано на рис. 127.

Из анализа рис. 126 и 127 следует, что предельные показатели фитомассы во всех регионах повышаются по мере увеличения высоты древостоя и достигают максимума при высоте 40—50 м в возрасте 200—300 лет. Эти предельные значения близки к соответствующим значениям фитомассы, выведенным по уравнению самоизреживания (см. табл. 46), и превышают в 1,5—1,7 раза соответствующие верхние пределы, даваемые по зональному градиенту Н. И. Базилевич и Л. Е. Родиным (1967). Числовые значения верхних пределов фитомассы в зависимости от высоты древостоя приводятся в табл. 70.

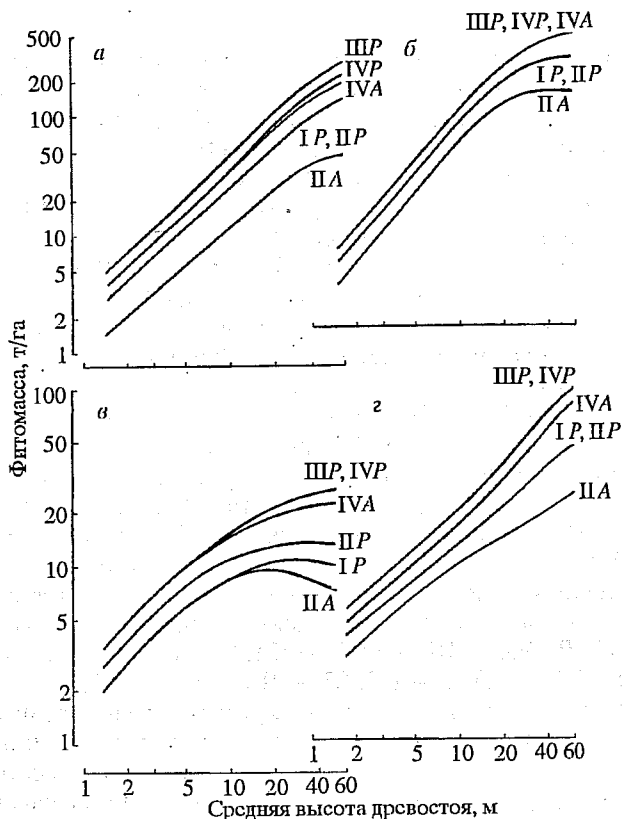


Рис. 126. Относительное положение предельных огибающих $P_i \sim H$ для массы корней (а), стволов (б), хвои (в) и ветвей (г) в абсолютно сухом состоянии ельников и пихтарников разных регионов (пояснения в тексте)

Соотношение предельных и “нормальных” траекторий $N \sim H$ для разных подзон показано на рис. 125, где “нормальные” кривые взяты из соответствующих ТХР: для таежных ельников и пихтарников подзоны широколиственных лесов (Лесотаксационный..., 1986; табл. 5.1.12), для ельников широколиственно-темнохвойных лесов (Нормативные..., 1984; табл. 41), для ельников широколиственных лесов (в) (Нормативно-справочные..., 1987; табл. 3.2.6) и для таежных пихтарников Сибири (г)

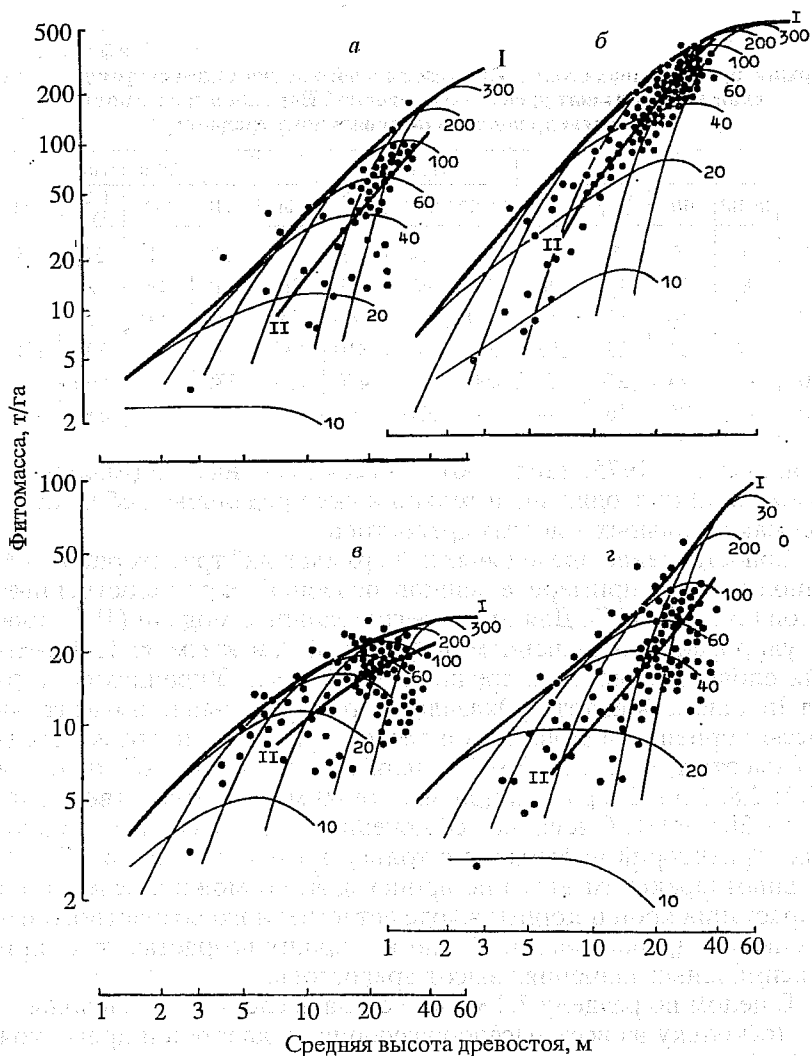


Рис. 127. Колоколообразные кривые $P_i \sim H$ для массы корней (*a*), стволов (*б*), хвои (*в*) и ветвей (*г*) в абсолютно сухом постояном ельнике подзоны широколиственных лесов разных возрастов (показаны цифрами, лет), полученные последовательным табулированием системы рекурсивных уравнений (261), (262), (210) и (188), и их положение относительно экспериментальных данных.

I — предельная огибающая кривая $P_i \sim H$, *II* — “нормальные” траектории $P_i \sim H$, полученные путем совмещения моделей (188) с ТХР полных слесых древостоев среднегорного пояса Украинских Карпат *Iv* класса бонитета

Таблица 70

Верхние пределы показателей фитомассы в абсолютно сухом состоянии (т/га) еловых и пихтовых древостоев Северной Евразии в зависимости от высоты древостоев по зональному градиенту

H, м	Хвоя				Надземная масса				Общая масса			
	IP, ПП	ПП	IVP, IVA	ПА	IP, ПП	ПП	IVP, IVA	ПА	IP, ПП	ПП	IVP, IVA	ПА
2	4	5	5	3	18	24	23	13	22	31	30	15
5	8	10	11	6	50	67	65	36	60	90	80	40
10	12	16	17	9	110	150	140	75	135	190	170	90
20	14	21	22	10	220	340	310	145	270	440	390	170
30	14	24	25	9	290	460	430	180	375	610	560	210
40	—	25	26	—	—	530	500	—	—	730	660	—

(Ход роста..., 1975; табл. 100). Во всех регионах “нормальные” траектории проходят значительно ниже предельных, сближаясь при максимальных высотах древостоев.

Сопоставление предельных и “нормальных” траекторий $P_i \sim H$ выполнено на примере ельников подзоны широколиственных лесов (см. рис. 127). Для этого регрессионные модели (188) протабулированы по значениям A, H, N, D и V , взятым из ТХР полных еловых древостоев среднегорного пояса Украинских Карпат IV класса бонитета. Оказалось, что предельные показатели массы корней, стволов, хвои и ветвей при одной и той же средней высоте древостоев (7 м) превышают “нормальные” значения в 2,5; 2,8; 1,5 и 2,2 раза, а при высоте 40 м — соответственно на 50, 10, 30 и 90 %. Очевидное сближение предельных и “нормальных” траекторий наблюдается только по массе стволов. По остальным фракциям этого не происходит, возможно, вследствие разрастания крон и корней в ходе естественного возрастного изреживания древостоев, особенно в старших возрастах, т. е. при максимальных значениях высот древостоев.

В целом по разделу 7.3 можно сделать следующие 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. установлено, что данной высоте древостоя для всех значений классов бонитета и возраста соответствует одна и та же общая фитомасса

- древостоя. Это положение, известное как закон Эйхгорна, позднее интерпретировано с теоретических позиций как проявление закона аллометрии и получило многократное эмпирическое подтверждение. Поскольку две концепции — “правило $3/2$ ” и закон Эйхгорна — функционально взаимосвязаны, основу последнего составляет все тот же принцип самоизреживания древостоев.
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 полога, 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 полога остается еще некоторая доля не учтенного 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 повысило 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 находятся в пределах ± 10 % от фактических наземных определений. Большая часть этого разброса объясняется варьированием диаметров ствола. Поскольку последние не могут быть непосредственно измерены с помощью бортового вертикально ориентированного лазера, можно ожидать, что проблемы устранения этого локального варьирования сохраняются 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 выявлены различия в массе стволов между сосной и елью, а также между березой и осиной 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 (ствола, скелета кроны, хвои) 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) — 98 %.
 9. Использование закона Эйхгорна и методологии систем рекурсивных уравнений позволило выйти на новый уровень анализа экспериментальных данных фитомассы и оценки их предельных запасов при лазерном зондировании лесопокрытых площадей.
 10. Применение разработанной методологии и полученных результатов в технологии бортовой лазерной съемки даст возможность оценить степень использования ресурсного потенциала лесопокрытых площадей и приходную часть потенциально возможного стока атмосферного углерода.

* * *

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 по-

казало 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 — двоякого 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 — 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 природным разнообразием лесов. Лазер измеряет только высоту и плотность древостоя, а о распределении стволов по диаметру можно судить лишь предположительно. Поэтому 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 объяснять до 98 % общего варьирования фитомассы, то низкая точность на уровне выдела связана пока с низким уровнем технологии съемки.

Во-вторых, при лазерном зондировании лесов в других регионах коэффициенты регрессионных моделей, 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, будут иметь место смещения, в которых сказываются те же факторы, что проявляются в снижении точности объемных таблиц при изменении лесорастительных условий.

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 инерциальной 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 составляет порядка 12 см (Krabill, Martin, 1987). Интеграция данных ГПС с лазерными автоматизирует процедуру наземной привязки линии полета и избавляет 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 древостоя 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 лазеров пока более эффективна в сочетании с СФГ-методом.

Экономическую эффективность новой технологии обеспечивает повышение точности результатов и снижение трудоемкости в сравнении с затратами на дешифрирование. Объем полевых

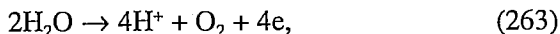
ГЛАВА 8

ЛАЗЕРНАЯ ОЦЕНКА КАЧЕСТВЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛЕСНОГО ПОЛОГА

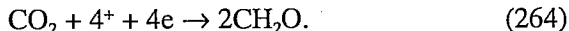
8.1. ОЦЕНКА ПОРОДНОГО СОСТАВА И СТРЕССОВЫХ СОСТОЯНИЙ ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМ ПО НАВЕДЕННОЙ ЛАЗЕРОМ ФЛУОРЕСЦЕНЦИИ (НЛФ) ХЛОРОФИЛЛА

8.1.1. ФОТОСИНТЕЗ И ФЛУОРЕСЦЕНЦИЯ ХЛОРОФИЛЛА

Флуоресценция хлорофилла связана с фотосинтезом — основной реакцией, происходящей в растении. Физиологи давно изучают это явление, чтобы разгадать его секреты. Фотосинтез совершается в клетке растения, внутри хлоропластов под воздействием света. Его конечный результат — превращение двуокиси углерода и воды в глюкозу и кислород. Фактически эта реакция представляет собой сплошную восстановительно-окислительную цепочку, в которой участвует множество промежуточных компонентов. На одном конце цепочки идет разложение воды с выделением кислорода



а на другом ее конце двуокись углерода превращается в глюкозу

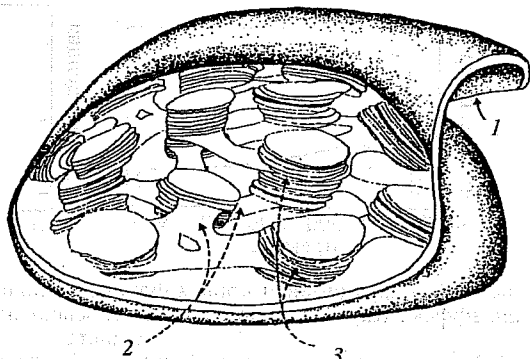


Электронный транспорт между окислительным и восстановительным звеньями цепочки реакций обеспечивается своеобразными электронными насосами, называемыми фотосистемами. Они представляют собой кластеры нескольких сотен молекул хлорофилла, заключенных в тилакоид — мембрану липидов и протеинов (рис. 128), и действуют подобно антеннам, которые улавливают и поглощают кванты света.

Хлорофилл *a* — первичный поглотитель лучистой энергии. Absорбируя свет, его молекула возбуждается до определенного

Рис. 128. Схема хлоропласта с тилакоидной мембраной, образующей замкнутое пространство внутри хлоропласта.

1 — внешняя мембрана, 2 — строма-тилакоид, 3 — грана-тилакоид (Rosema et al., 1992)



энергетического уровня. Когда она возвращается на основной уровень, энергия возбуждения

либо тратится на химические реакции фотосинтеза, другие биохимические системы растения, выделяется в виде тепла, либо рассеивается в виде флуоресценции. В зеленом листе, оптимально функционирующем при относительно слабой освещенности, распределение поглощенных квантов может быть следующим: 84 % — на фотосинтез, 14 % — на тепло и 2 % — на флуоресценцию (Rosema et al., 1992).

Б. Коком (Кок, 1965) установлено, что величина флуоресценции при фотосинтезе обратно пропорциональна эффективности и скорости фотосинтеза. Если реакция фотосинтеза затормаживается (например какими-то химическими агентами), то в тепло и флуоресценцию переходит большая часть энергии возбуждения (например гербициды полностью блокируют поток электронов). В этом случае выделения тепла и флуоресценция могут вырасти в 5—6 раз. Таким образом, интенсивность флуоресценции хлорофилла *a* в растении является функцией эффективности фотосинтеза в предположении, что концентрация молекул остается неизменной. Чем более эффективен фотосинтетический процесс, тем слабее флуоресцентный отклик. Это соотношение позволяет использовать флуоресценцию в качестве дистанционной оценки критерия жизнеспособности растения.

8.1.2. ПЕРЕХОДНОЕ И УСТОЙЧИВОЕ СОСТОЯНИЯ ФЛУОРЕСЦЕНЦИИ

Физиологи растений применяют весьма специфичную методологию, основанную на анализе переходных состояний флуоресценции, имеющих место при внезапном освещении адаптиро-

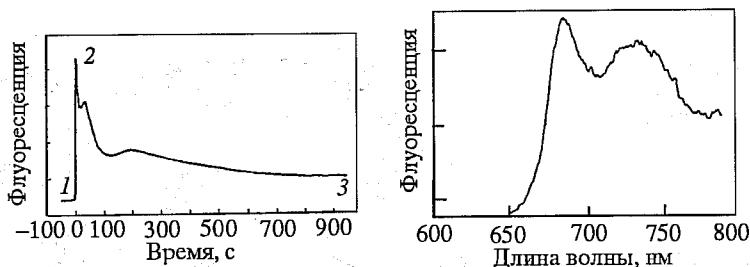


Рис. 129. Индукционная кривая флуоресценции в относительных единицах, или эффект Каутского, при внезапном освещении адаптированного к темноте листа.

1, 2, 3 — соответственно начальный (F_0), пиковый (F_{max}) и устойчивый (F_s) уровни флуоресценции (Rosema et al., 1992)

Рис. 130. Пример НЛФ-спектра в относительных единицах, полученного на стационарном лесном объекте в Гардерене. Видны два частично перекрывающихся пика, центры которых соответствуют 685 и 730 нм (Rosema et al., 1992)

ванного к темноте листа. В этом случае кривая флуоресценции напоминает затухающую осциллограмму (рис. 129). Лишь спустя 10—20 мин флуоресценция переходит в устойчивое состояние. Эта ее динамика во времени известна как *индукционная кривая флуоресценции*, или эффект Каутского. Разные участки кривой отражают различные этапы реакции фотосинтеза — начальный (быстрая флуоресценция) и последующий (замедленная флуоресценция). Эффект Каутского — частный случай более общего явления переходных состояний флуоресценции как результата изменений актинического освещения (Rosema et al., 1992).

При дистанционном зондировании использование такой методологии невозможно, поскольку конечная цель здесь — ускоренная съемка обширных площадей на значительном удалении от земли. Поэтому невозможно обеспечить энергию, достаточную для актинического возбуждения. Более того, нет времени для регистрации переходных состояний флуоресценции (эффекта Каутского). Цель дистанционного зондирования — регистрация устойчивого состояния флуоресценции, имеющей место в естественных условиях освещения. Установлено (Chappelle et al., 1989), что лучше всего для возбуждения и синхронной регистрации флуоресценции хлорофилла подходит импульсно-периодический азотный лазер Moletron UV/22 с длиной волны 337 нм и частотой пульсаций 30 Гц. Уровень освещения лазером может

быть достаточно низким, при этом не должно происходить каких-либо изменений в фотохимическом состоянии растения. Лазер используется лишь в качестве “аналитического” начала для апробации фотосинтетического аппарата.

Важным вопросом является характер связи НЛФ-измерений с лабораторными физиологическими экспериментами. В условиях постоянного естественного света НЛФ-измерения эквивалентны уровню устойчивого состояния индукционной кривой (F_d) (см. рис. 129), достигаемого при тех же условиях освещения листа, предварительно адаптированного к темноте. Предполагается, что в темноте НЛФ-измерения эквивалентны начальному уровню флуоресценции (F_0) индукционной кривой. Вследствие кратковременности лазерного импульса (10—20 нс) необходимые эффекты обусловлены только состоянием фотосистемы. В стрессовом состоянии растения электронный поток фотосинтеза затормаживается и наблюдается соответствующее повышение уровня флуоресценции в устойчивой фазе. В то же время подавляется переходный всплеск флуоресценции и снижается ее пиковый уровень (F_{max}). Таким образом, физиологи, регистрирующие пиковую флуоресценцию (F_{max}) и специалисты по дистанционному зондированию, работающие в области устойчивой флуоресценции (F_d), могут наблюдать противоположные эффекты одного и того же явления и получать противоречивые результаты (Rosema et al., 1992).

Лазерный луч возбуждает фотосинтез в точке касания с листовой так же, как и видимая часть солнечной радиации (процессы усвоения и превращения солнечной энергии в химическую, необходимую для преобразования атмосферного CO_2 в углеводы). Импульсно-периодические лазеры, используемые в качестве источников света для возбуждения фотосинтеза и наведения флуоресценции в интактном растении, имеют очевидные преимущества. Они излучают мощный когерентный свет высокой степени монохроматичности с диапазоном длин волн, обеспечивающим получение максимального количества флуоресцентных полос. Азотный лазер на волне 337 нм стимулирует флуоресценцию хлорофилла *a* и других пигментов, обеспечивая тем самым многополосный флуоресцентный спектр, повышающий информационное наполнение сигнала НЛФ. Компоненты, которые порождают флуоресцентные полосы, иные, чем полосы, вызванные хлорофиллом *a*, не только вызваны факторами, изменяю-

щими жизнеспособность растения, но и имеют концентрации и состояния, специфичные для данного вида растения. Генетическая структура различных видов растений обуславливает неодинаковую эффективность их фотосинтеза, а также количество и концентрацию флуоресцирующих пигментов. Генетические различия отражаются в полных флуоресцентных спектрах растений, что дает возможность на основе спектральных различий дифференцировать и идентифицировать различные виды (Chappelle, Williams, 1987).

8.1.3. ИДЕНТИФИКАЦИЯ ДРЕВЕСНЫХ ПОРОД ПО ФЛУОРЕСЦЕНТНЫМ СПЕКТРАМ

Имеются два разных типа фотосистем, условно обозначаемые как 1-я и 2-я, которые участвуют последовательно в переносе электронов. Флуоресценция — результат деятельности в основном фотосистемы 2, но какая-то ее часть исходит из фотосистемы 1. Флуоресцентный спектр растительности приходится примерно на красную и ближнюю инфракрасную области спектра, между 650 и 770 нм (рис. 130). Можно наблюдать две частично перекрывающиеся полосы флуоресценции с максимумами при 685 и 730 нм. Первая полоса — результат деятельности хлорофилла *a* в фотосистеме 2. Относительно происхождения второй полосы мнения расходятся, но предположительно источник ее — фотосистема 1 (Rosema et al., 1992).

Исследования НЛФ лесного покрова на базе океанографического лидара НАСА начаты в 80-х годах на о. Уэллопс, входящем в систему обеспечения полетов в Годдарском центре космических полетов НАСА. До этого лидар НАСА применялся для распознавания и картирования нефтяных разливов в океане, измерения КПД спектральной конверсии флуоресценции нефти и картирования фотопигментов в морском фитопланктоне. По маршруту полетов с лидаром собирали образцы листьев некоторых преобладающих видов и исследовали их на лабораторном лазерном спектрофлуорометре (Hoge et al., 1983).

На рис. 131 показаны спектры четырех видов растительности: верхний спектр получен на базе лазера 422 нм, а нижний — на базе лазера 532 нм. В спектрах флуоресценции, наведенной на волне 422 нм, наблюдаются два основных пика эмиссии флуоресценции хлорофилла 685 и 730 нм, которые характеризуют актив-

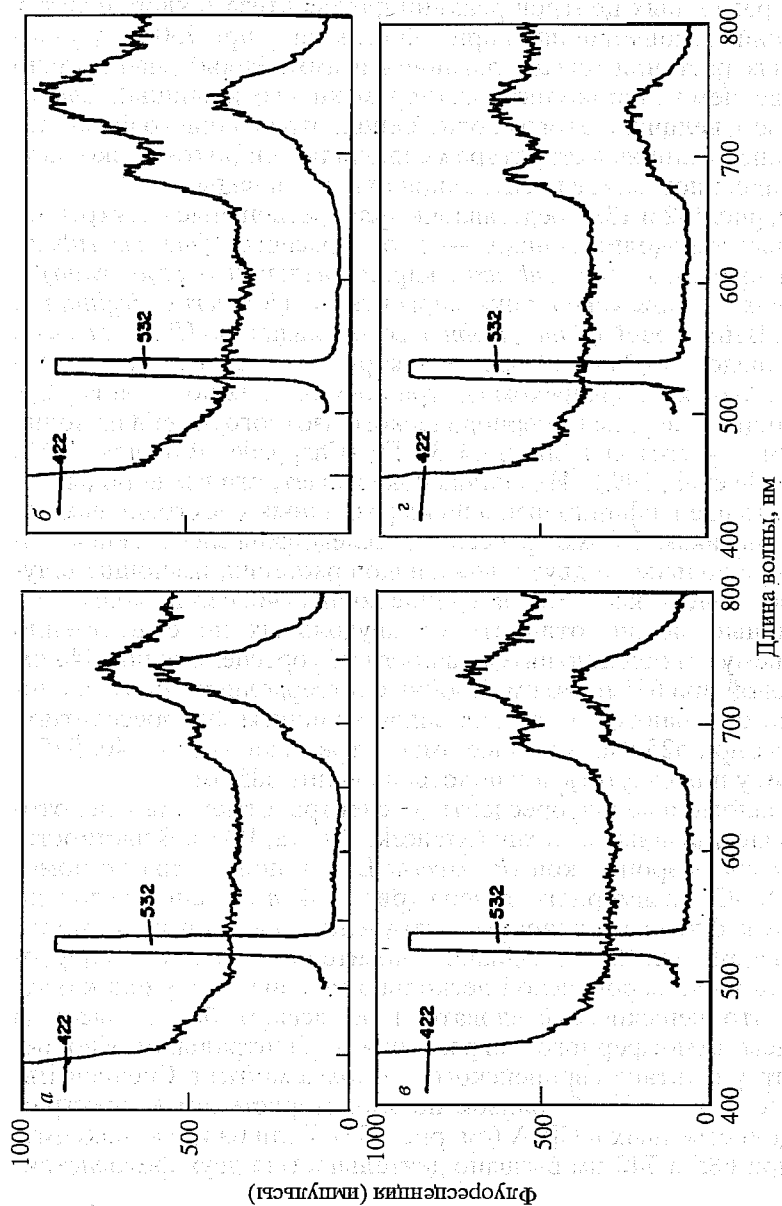


Рис. 131. ИДФ-спектры на длинах волн 532 и 422 нм (а — аммофила, б — сосна ладанная, в — черемуха, г — воск коврица) (Нюге et al., 1983)

ность различных центров реакции фотосинтеза в хлоропластах растений: отношение пика при 685 нм к пику при 730 нм у узколистных растений (сосны ладанной и аммофилы) значительно меньше, чем у широколистных (черемухи и восковницы). Следовательно, величина этого соотношения, отражающего физиологические различия в структуре мезофилла у широко- и узколистных видов, позволяет идентифицировать эти виды.

На рис. 132 и 133 представлены флуоресцентные спектры некоторых твердолиственных — дуба красного (*Quercus rubra*), клена красного (*Acer rubrum*), кари овалной (*Carya ovata*) и хвойных — можжевельника виргинского (*Juniperus virginiana*), сосны Веймутовой (*Pinus strobus*), сосны ладанной (*Pinus taeda*) и ели канадской (*Picea glauca*). Спектры получены в лабораторных условиях в Годдарском центре космических полетов НАСА с помощью импульсно-периодического азотного лазера на волне 337 нм с частотой пульсаций 30 Гц (Chappelle, Williams, 1987; Chappelle et al., 1992). Их анализ показывает, что все породы могут быть идентифицированы по их различным спектральным характеристикам. Кроме древесных, исследованы спектры некоторых однодольных и двудольных видов растений, имеющие флуоресцентные максимумы при длине волны 440, 685 и 740 нм. Однодольные можно отличить от двудольных по существенно большему отношению интенсивности флуоресценции при 440 нм к таковой при 685 и 740 нм. Хвойные и твердолиственные значительно отличаются от других видов наличием флуоресцентной полосы при 525 нм. Хвойные имеют три пика — при 440, 525 и 740 нм, у них отсутствуют полосы на волне 685 нм.

Аналогичные флуоресцентные спектры отмечены у некоторых видов хвойных в Чехии (Krajčisek, Vrbova, 1994). В частности, спектр ели европейской (*P. excelsa* Link.), полученный с помощью Хе-Сl эксимерного лазера (рис. 134, а), очень близок по форме к флуоресцентному спектру ели канадской в Вермонте (США) (см. рис. 133, г). Однако относительная амплитуда первого пика у ели европейской несколько меньше, чем у ели канадской, что чешские исследователи объясняют более высоким уровнем атмосферного загрязнения в Центральной Европе. Спектр у каштана европейского (*Castanea sativa*) в Средней Европе (см. рис. 134, б) близок по характеристикам к спектрам твердолиственных в США (см. рис. 132). Если наличие максимумов при 685 и 740 нм вызвано деятельностью двух фотосистем,

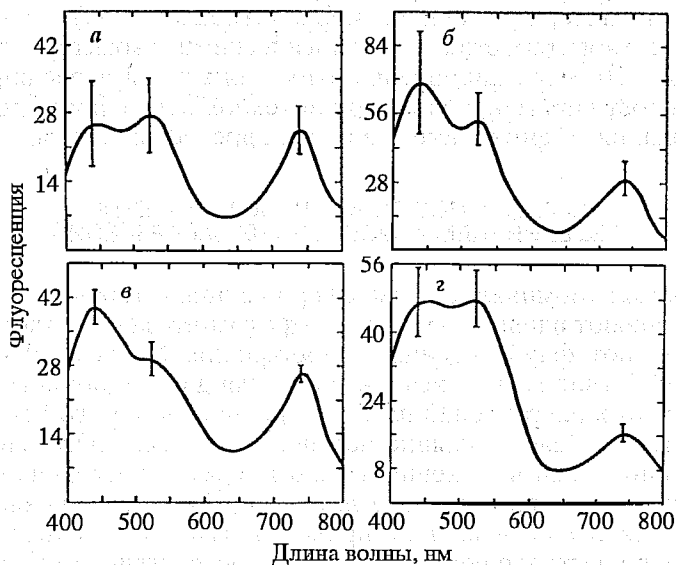
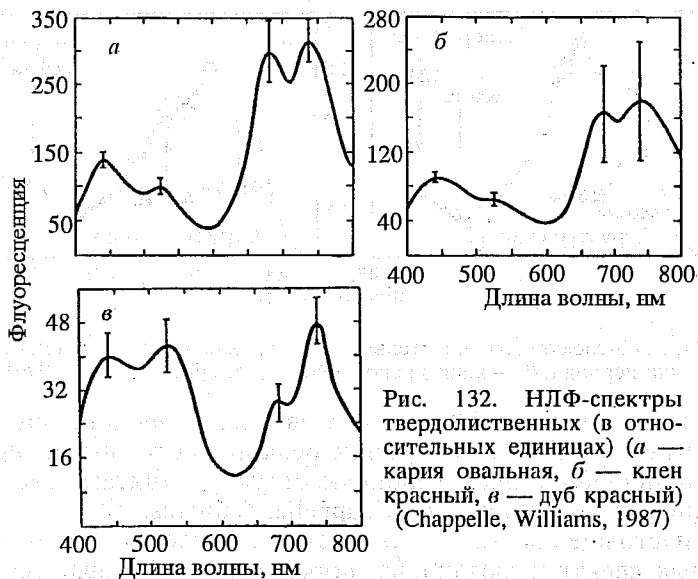




Рис. 134. НЛФ-спектры в относительных единицах (а — ель европейская в зимний период и б — каштан европейский) (Krajiček, Vrbova, 1994)

то полосы при 440 и 525 нм обусловлены компонентами, включенными в электронпереносящие реакции фотосинтеза, предположительно имеющими хинонную структуру (витамин К₁, рибофлавин, бета-каротин и др. (Chappelle, Williams, 1987).

В настоящее время в разных странах ведется сбор флуоресцентных спектров различных пород и разрабатываются алгоритмы их интерпретации по коррелятивным связям флуоресцентных характеристик с биологическими характеристиками растений. По мере накопления этих данных будут расширяться возможности применения лазерной технологии в формировании банка данных о фитомассе различных древесных видов.

8.1.4. ДИАГНОСТИКА СТРЕССА РАСТЕНИЙ ПОД ВЛИЯНИЕМ АТМОСФЕРНЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ

Как уже упоминалось, атмосферные загрязнители и гербициды оказывают влияние на реакцию фотосинтеза и соответственно изменяют флуоресценцию хлорофилла. Поэтому флуоресцентный сигнал можно использовать для дистанционного обнаружения стресса растений на самых ранних, допороговых стадиях. Метод обещает большие перспективы, поскольку ясно, что деградация лесов в нынешнем явном виде — последняя стадия процесса, начавшегося много лет назад. Раннее распознавание поражения лесов позволяет провести оздоровительные мероприятия до наступления необратимых последствий, а также произвести съемку пораженных площадей для их последующей кор-

Соотношение рангов стрессового индекса, высоты местообитаний над уровнем моря и рангов НЛФ-критерия в древостоях ели красной

Ранг стрессового индекса	Величина стрессового индекса	Высота над уровнем моря, м	Ранги по НЛФ-критерию		
			440 нм	525 нм	440 нм/740 нм
1	21	442	2	1	8
2	21	305	5	6	5
3	25	564	3	2	7
4	32	396	4	3	3
5	35	732	7	8	4
6	38	518	6	7	1
7	38	548	1	4	6
8	40	838	9	5	11
9	43	823	8	9	2
10	44	945	11	11	9
11	47	945	10	10	10

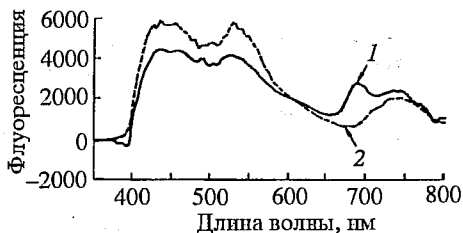
рекции. Исследованиями установлено, что засуха и дефицит элементов питания изменяют нормальные НЛФ-спектры.

Исследование возможностей НЛФ-технологии в этом плане проведено в Зеленых горах шт. Вермонт (США) (Chappelle, Williams, 1987; Chappelle et al., 1989). Эта область подвержена значительным атмосферным загрязнениям, переносимым западными ветрами из промышленных районов Среднего Запада и долины Огайо. Их считают причиной ширококомасштабного поражения высокогорных елово-пихтовых лесов на северо-востоке США.

Образцы хвои взяты из 12 древостоев ели красной (*P. rubens* Sarg.) по градиенту повреждений от здоровых до сильно пораженных. В каждом древостое определен индекс стресса как процент отмерших ветвей в пределах живой кроны в данном местообитании. На основе этих данных древостои ранжированы по относительной шкале от самых здоровых до наиболее пораженных (табл. 71).

Стресс древостоев возрастает пропорционально высоте над уровнем моря. При высоте более 915 м стрессовые индексы значительно выше, чем в более низких высотных уровнях, и характеризуются меньшей изменчивостью. С учетом естественной изменчивости стрессового индекса у здоровых древостоев и кос-

Рис. 135. Влияние кислотных дождей на НЛФ-спектры ели красной (в относительных единицах) (1 и 2 — хвоя соответственно сильного и слабого поражения) (Chappelle, Williams, 1987)



венного метода оценки жизнеспособности деревьев (по доле отмерших ветвей, но не по эффективности фотосинтеза) все местообитания объединены в три категории по степени поражения: слабого (индексы ниже 30), среднего (индексы 30—40) и сильного (индексы 40 и более).

Установлено, что степень поражения лесного полога связана с изменениями флуоресценции на волнах 440, 525 и 740 нм. Хвоя у пораженных деревьев имеет дополнительную полосу флуоресценции при 685 нм (рис. 135). В здоровых ельниках эта полоса отсутствует. Наличие такого отклика при 685 нм характеризует неэффективный перенос электронов от хлорофилла *a* при 685 нм к хлорофиллу *a* при 740 нм, что означает понижение жизнеспособности деревьев.

Спектральные данные проанализированы по нескольким алгоритмам, чтобы выявить, какие из них лучше коррелируют с рангом стрессового индекса (см. табл. 71). Лучшая корреляция с последним — у ранга НЛФ-критерия в полосе 440 нм, несколько худшая — в полосе 525 нм и самая слабая — у ранга, характеризующего отношение показателей на волнах 440 и 740 нм. Данные табл. 71 показывают, что упомянутые флуоресцентные полосы и их сочетания позволяют четко отличать местообитания сильного поражения от таковых умеренного и слабого поражения. Очевидная чувствительность полосы 440 нм к изменению жизнеспособности деревьев связана с тем, что в этой полосе предположительно флуоресцирует танин, концентрация которого в растении увеличивается обратно пропорционально наличию элементов питания при высоком уровне естественной освещенности. Поскольку наиболее поражены высокие местообитания, подверженные интенсивному ультрафиолетовому облучению, возможно, здесь имеет место накопление уровня танина (Chappelle, Williams, 1987).

Результаты исследований, выполненных в Вермонте, в общих чертах подтверждены стационарными исследованиями в полевых условиях в Вагенингене (Нидерланды) на базе Хе-Сl эксимерного лазера с длиной волны 308 нм (Rosema et al., 1992). Использован флуоресцентный лидар (FLIDAR), включающий в себя лазерный источник, телескопический приемник, спектрометр и систему слежения. Выявлено увеличение относительного уровня флуоресценции на волне 685 нм при повышении концентрации SO_2 в кронах пихты дугласовой (*Pseudotsuga taxifolia*) и тополя (*Populus*) и сделан вывод о возможности лазерной индикации стресса у растений под действием SO_2 . Однако наибольшее повреждающее действие оказывает озон (даже будучи в низких концентрациях), а сернистый газ лишь усугубляет стресс. Установлено, что озон — основной атмосферный поллютант, обуславливающий поражение лесов Европы. Ранее аналогичный вывод получен применительно к лесам Северной Америки (Manning, 1988, цит. по: Rosema et al., 1992).

НЛФ-технология позволяет диагностировать стресс у растений при самых низких уровнях загрязнения на начальных его стадиях. Поэтому она перспективна для целей мониторинга и картирования, в первую очередь — стрессового состояния лесов, а не уровней загрязнения, обычно трудно идентифицируемых вследствие многообразия поллютантов разной токсичности.

8.1.5. ДИАГНОСТИКА СТРЕССА, ОБУСЛОВЛЕННОГО ДЕФИЦИТОМ ЭЛЕМЕНТОВ ПИТАНИЯ

Растения обладают различной потребностью в элементах питания, необходимых для их оптимального роста, и природа этой потребности видоспецифична. Отсутствие или дефицит одного или нескольких элементов сказывается на фотосинтезе и, следовательно, на флуоресцентных характеристиках. Их исследование на базе азотного лазера проведено в Годдарском центре НАСА в опытах с кукурузой, высаженной в кварцевый песок (Chappelle, Williams, 1987). В каждом из семи вариантов, представленных 120 растениями, отсутствовал один из семи элементов питания, а в контроль они были включены полностью в оптимальной пропорции.

Измеряли интенсивность флуоресценции в полосах 440, 685 и 740 нм. Корреляция между показаниями в полосах 685 и 740 нм

настолько высока, что в анализ включены только две из трех полос (рис. 136, *a, б*). Судя по показаниям в полосе 440 нм, наибольший стресс вызвал дефицит К, Р, N и Fe. В полосе 685 нм выявлен всплеск флуоресценции при дефиците только К, что объяснялось снижением эффективности фотосинтеза из-за устьичной дисфункции (Chappelle, Williams, 1987). Таким образом, применение НЛФ-технологии дает возможность ранней диагностики дефицита элементов питания, а также подбора концентрации удобрений, оптимальной для роста растений.

8.1.6. ДИАГНОСТИКА СТРЕССА, ОБУСЛОВЛЕННОГО ЗАСУХОЙ

Вода — первичный элемент питания, участвующий практически во всех физиологических процессах растения, и ее дефицит должен проявляться в характеристиках НЛФ-спектра и индукционной кривой флуоресценции. Эксперименты в двух вариантах — обезвоженном до начальной стадии завядания и контроле — проведены на хлопчатнике (Chappelle, Williams, 1987). Регистрация НЛФ выполнялась одновременно двумя способами, путем анализа а) индукционной кинетики флуоресценции на волне 685 нм у растений, адаптированных к темноте (рис. 137), и б) НЛФ-спектров в полосах 440 и 685 нм. Полученные индукционные кривые показали, что обезвоживание существенно повышает флуоресценцию в устойчивой области (F_d), одновременно снижая ее пиковый уровень (F_{max}). НЛФ-флуоресценция в полосе 440 нм в обезвоженном состоянии повысилась на 17 %, а отношение показаний в полосе 440 нм к таковым в полосе 685 нм — почти на 100 %. Это свидетельствует о существенном снижении эффективности фотосинтеза в условиях водного стресса, что подтверждается и в опытах с обезвоживанием сои (рис. 138).

К выводу о возможности дистанционной диагностики стресса, обусловленного засухой, пришли в опытах с дубом пушистым (*Quercus pubescens*) исследователи в Весслинге (Германия), использовавшие для получения спектров лабораторный флуоресцентный лидар DLIDAR-2 с лазером на алюмоиттриевом гранате с неодимом с длиной волны 355 нм (Guenther et al., 1994). При этом на контроле подтвердилась обратная связь флуоресценции хлорофилла в полосе 685 нм с интенсивностью фотосинтеза, определенной по скорости фиксации CO_2 .

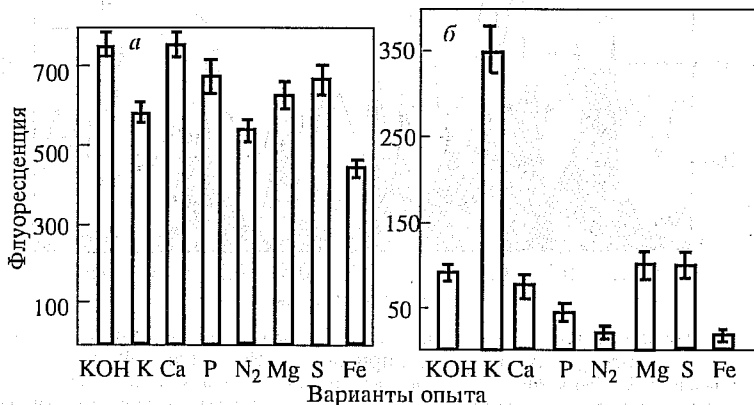


Рис. 136. Влияние дефицита элементов питания на НЛФ-интенсивность (в относительных единицах) у кукурузы в полосах 440 (а) и 685 (б) нм в сопоставлении с контролем (KOH). Показаны элементы питания, отсутствующие в вариантах опыта (Chappelle, Williams, 1987)

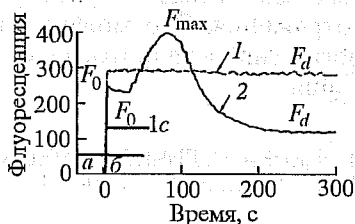
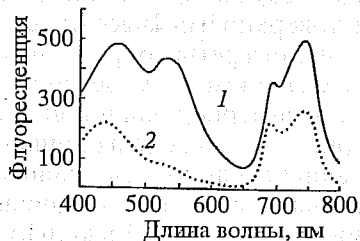


Рис. 137. Индукционные кривые флуоресценции хлопчатника (в относительных единицах) в условиях водного стресса (1) и в нормальном состоянии (2).

F_0 , F_{max} и F_d — соответственно начальный, пиковый и устойчивый уровни флуоресценции; а — состояние адаптации к темноте, б — освещенное состояние (Chappelle, Williams, 1987)

Рис. 138. Влияние засухи на НЛФ-спектры сои (в относительных единицах) (1 и 2 — соответственно не орошенная и орошенная площади) (Chappelle et al., 1989)



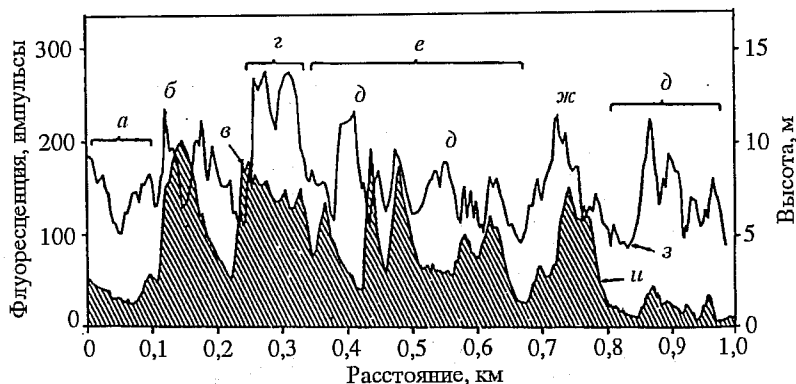


Рис. 139. Профили высотных отметок и наведенной лазером на волне 422 нм эмиссии флуоресценции при 685 нм (Hoge et al., 1983).

а — зеленое поле, *б* — посконница, *в* — грунтовая дорога, *г* — густой смешанный лес, *д* — болото, *е* — редколесье, *ж* — мелколесье/восковница, *з* — флуоресценция, *и* — высотные отметки

В настоящее время усилия многих исследователей направлены на разработку алгоритмов, которые бы связывали НЛФ-спектры со спектрами пассивного отражения солнечной радиации. По мере выявления рациональных взаимосвязей будет улучшаться интерпретация спектров отражения. Это может также обеспечить механизм для оценки интенсивности фотосинтеза по данным дистанционного зондирования.

8.1.7. СОВМЕЩЕННАЯ ЛАЗЕРНАЯ ОЦЕНКА КОЛИЧЕСТВЕННЫХ И КАЧЕСТВЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛЕСНОГО ПОЛОГА

С помощью двухлазерной бортовой системы НАСА (Hoge et al., 1983) на о. Уэллопс выполнена совмещенная съемка земной поверхности. Высотные отметки поверхности земли и лесного полога регистрировались системой лидара НАСА с коническим сканером. Флуоресценция наводилась лазером на красителях с эксимерной накачкой с длиной волны возбуждения 422 нм. На рис. 139 приведены данные профилирования высот и флуоресценции при 685 нм. Данные сглажены электронным фильтром с пятиточечным усреднением для снижения шума от изменчивости объектов. Поскольку лазер работал на частоте пульсаций 50 Гц (скорость полета 100 м/с), пространственное усредне-

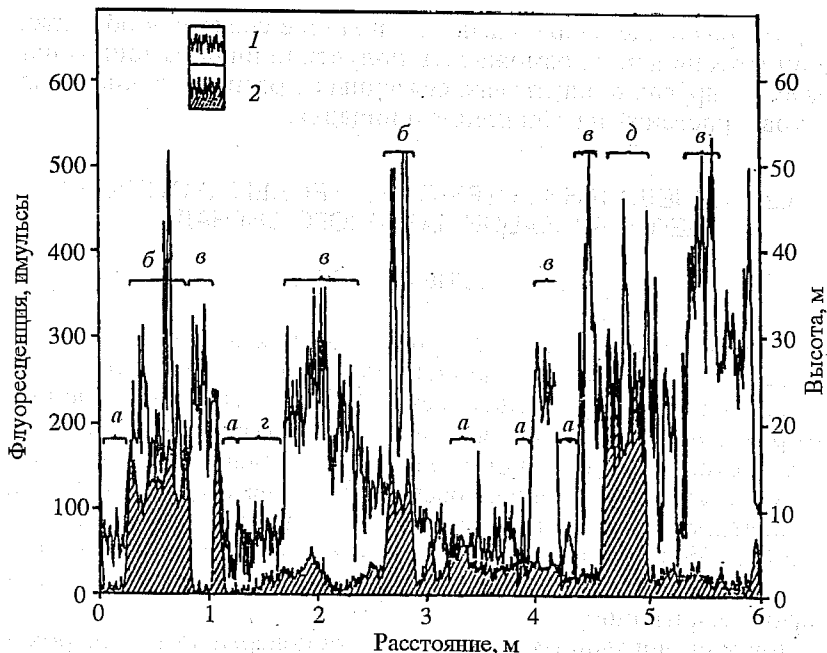


Рис. 140. Профили высотных отметок и наведенной лазером на волне 422 нм эмиссии флуоресценции при 685 нм для разных категорий полей и лесного покрова (Hoge et al., 1983).

1 — флуоресценция, 2 — высота; а — бурое поле, б — смешанный лес, в — зеленое поле, г — пашня, д — сосновый лес

ние, использованное при обработке данных, представляет расстояние около 10 м. Высокая частота лазерных пульсаций повышает пространственное разрешение профилей высотных отметок и флуоресценции. В итоге это дает более детальное представление о сильно изменчивом видовом составе вдоль линии полета (Hoge et al., 1983).

Большая площадь и меньшее разнообразие категорий земной поверхности (рис. 140) обеспечивают лучшие возможности использования бортового флуорозондирования для получения НЛФ хлорофилла. Резкие перепады сигнала флуоресценции наблюдаются при изменении категории объекта, особенно на границах между бурными полями и лесом. Значение этих результатов, которые можно получить и в темное время суток, состоит в

том, что различие в силе сигнала и подобие спектра у объектов одной группы дают возможность получения информации о фитомассе и других показателях, связанных с распределением пигментов у растений на обширных площадях.

8.2. ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ КРОНЫ ПО СТЕПЕНИ ДЕПОЛЯРИЗАЦИИ ЛАЗЕРНОГО СИГНАЛА

8.2.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

В предыдущем разделе, оперируя понятиями спектра, интенсивности света, частоты и длины волны, мы имели дело со *скалярными* величинами. Однако есть область оптических явлений, которые описываются *векторными* величинами. Это — поляризация света, под которой понимается пространственное соотношение между направлением распространения светового луча и направлением его электрического или магнитного вектора (Жевандров, 1969). В зависимости от упорядоченности векторов напряженности полей различают линейную, эллиптическую и круговую поляризацию.

При исследовании различных свойств поверхности — шероховатости, неоднородности, анизотропии и т. д. — разработан поляризационный оптический метод (метод эллипсометрии) (Пшеницын и др., 1986), основанный на том, что исследуемая поверхность деполяризует падающий свет посредством множественного рассеяния, которое зависит от текстуры поверхности, ее поглотительной, отражающей и преломляющей (рефракционной) способности.

Лесной полог представляет собой специфичную поверхность, отличную от многих других природных поверхностей и поверхностей искусственных сооружений. Более того, его рассеивающая способность видоспецифична, поскольку биологические свойства и особенности древесных пород находят выражение в огромном разнообразии морфологических характеристик кроны и ее компонентов. Следовательно, применение оптической поляриметрии может стать альтернативным методом распознавания породного состава при дистанционном зондировании лесов для формирования банка данных о фитомассе.

Измерение поляризационных характеристик земной поверхности — перспективный метод дистанционного зондирования,

которое тем не менее не разрабатывалось в оперативных условиях. При измерении воздействий земной поверхности на деполяризацию солнечного света нет общего согласия ни в отношении оптимальных спектральных частот, ни в отношении однозначной интерпретации полученных данных. Причина этого — сложность отделения атмосферного вклада в деполяризацию от вклада, связанного с углом наблюдения. Однако при наличии лазера поляризованного излучения, установленного на авианосителе и используемого для освещения поверхности, может быть применена соответствующая бортовая приемная оптика для измерения степени деполяризации лазерного света, отраженного от различных поверхностей. При низкой высоте полета (например 300 м) и применении низкопороговой системы слежения (*nadir looking system*) как атмосферные, так и угловые эффекты могут быть существенно снижены. При использовании импульсно-периодического лазера и усреднении за некоторый промежуток времени импульсов, отраженных как от земли, так и от вершин деревьев, можно получить имитацию отраженного сигнала, воспринимаемую сенсорной системой пассивной солнечной поляризации. Затем эти данные можно использовать для уточнения теоретических моделей, применяемых для интерпретации более легко получаемых пассивных данных (Kalshoven, Dabney, 1988). Эффекты поляризации с лазерным источником подтверждены в лабораторных экспериментах (Egan, 1985). Были необходимы полевые исследования, поскольку бортовые приборы дистанционного зондирования регистрируют интегральные эффекты, связанные с изменением размера лазерного следа, эффекты, которые нельзя получить в любых приемлемых лабораторных условиях.

Таким образом, использование поляризационных характеристик различных природных и искусственных поверхностей при их дистанционном зондировании имело как теоретические, так и экспериментальные ограничения. Для выявления потенциальных возможностей этого способа дистанционного зондирования в НАСА создана бортовая система лазерного поляриметра (БСП), ориентированная на получение с борта авианосителя многоспектральных характеристик деполяризационных свойств наземных объектов путем последовательного зондирования точек земной поверхности по курсу полета и способная работать как с поляризованным, так и с неполяризованным лазерным светом, а также с солнечной радиацией (Kalshoven, Dabney, 1988).

При использовании импульсно-периодического лазера в качестве источника когерентного поляризованного света угловые и атмосферные помехи и искажения фактически исключаются и тем самым выделяется вклад зондируемой поверхности в результирующую деполаризацию рассеянного лазерного сигнала.

БСЛП включает в себя импульсно-периодический лазер Photonics на алюмоиттриевом гранате с неодимом, видеокамеру Cohu CCTV для съемки лазерного пятна на поверхности земли с минимальным полем зрения около 0,05 радиан, а также приемник отраженных сигналов, сориентированные в одном створе и установленные в одном монтажном блоке на внешней подвеске вертолета УН-1В. Приемный блок (рис. 141) состоит из 12 фронтальных трубок фотоумножителя и двух шестиканальных усилителей. Лазер дает одновременное излучение с длиной волны 1064 и 532 нм при частоте 20 Гц с энергией импульса соответственно 100 и 300 миллиджоулей. Чтобы определить на каждой длине волны четыре параметра Стокса, необходимо сделать четыре замера отраженного сигнала посредством линейных поляризаторов: в трех случаях соответственно при 0° , 45° и 90° и в четвертом — при 45° , но с дополнительной $1/4$ -волновой пластинкой. Соответственно трубки фотоумножителя снабжены фильтрами различной поляризационной ориентации, $1/4$ -волновой пластинкой и спектральными фильтрами. Данные поляризации фиксируются одновременно одиннадцатью каналами с использованием трубок Hamamatsu R1464 и R632-01 соответственно для зеленой и инфракрасной (ИК) зон спектра. Двенадцатый канал используется в системе триггера данных. На рис. 142 показано различное положение фильтров по отношению к переданному углу поляризации для двух длин волн.

На рис. 143 представлено устройство трубки фотоумножителя. Трубка имеет магнитную защиту и переднюю регулируемую насадку. Применена прямая оптическая система только с одной линзой, чтобы снять проблему калибровки, обусловленную внутренними поляризационными эффектами. На рис. 144 (на вкладке) показана схема последовательного получения данных бортовой системой. Шестиканальные усилители имеют два выхода для каждого канала. Один (наиболее сильный) выход канала (переданная лазером поляризация ориентирована на 0°) используется для управления дискриминатором LeCroy, выполняющим функцию триггера для аналогово-цифрового преобразователя, кото-

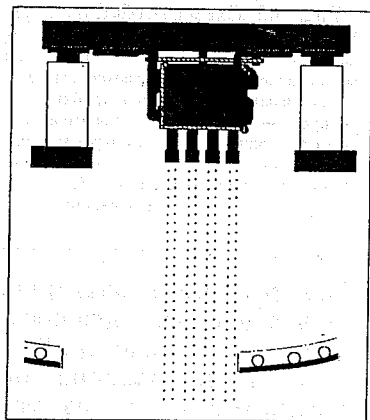


Рис. 141. Приемный блок бортовой системы лазерного поляриметра (Kalshoven, Dabney, 1988)

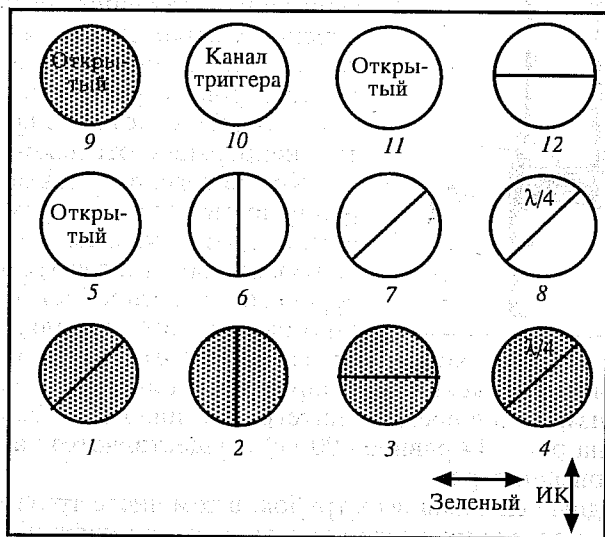


Рис. 142. Схема установки фильтров на двенадцати трубках фотоумножителя.

1—12 — номера каналов (Kalshoven, Dabney, 1988); стрелками обозначено направление переданной поляризации, штрих — инфракрасные каналы

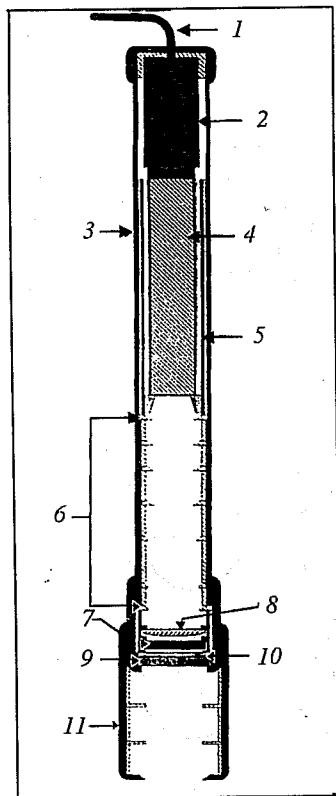


Рис. 143. Схема трубки фотоумножителя. 1/4-волновая пластинка удалена в трех трубках, предназначенных для замера линейной поляризации, в каждом из волновых диапазонов (Kalshoven, Dabney, 1988); 1 — проводка сигналов, 2 — патрон трубки, 3 — алюминиевый корпус, 4 — трубка фотоумножителя, 5 — магнитная защита, 6 — система световых перегородок, 7 — фильтр интерференции, 8 — линза, 9 — 1/4-волновая пластинка, 10 — линейный поляризатор, 11 — насадка световых перегородок

рый преобразует электрические сигналы в цифровые для последующего их ввода в компьютер. Для этого лазер соединен волоконно-оптическим кабелем с одной из трубок (см. рис. 142, "канал триггера"). Между испусканием лазерного сигнала и получением отраженного имеется задержка во времени, позволяющая регистрировать расстояние до объекта. Она измеряется во время полета и непрерывно отслеживается.

Кроме того, имеется окно интеграции времени, регулируемое в зависимости от ожидаемого разброса вертикальных расстояний от земли и деревьев, что способствует усилению рассеянного сигнала. Такое ус-

среднение каждого рассеянного сигнала имитирует его тип, видимый датчиком пассивной поляризации солнечного света. Дискретное изменение времени интегрирования в диапазоне от 5 нс до 1 мс (на рис. 144 равное 400 нс) осуществляется также модулем дискриминатора.

Выходные сигналы всех трубок, в том числе триггерной, посылаются через линию задержки к аналогово-цифровому преобразователю. В зависимости от конечной конфигурации системы длина этой линии составляет 20—40 футов (20—40 нс). На рис. 144, на вкладке, показана задержка в 40 нс. Выдача данных идет через систему компьютера IBM. Программа ASYST обеспечивает получение и хранение информации как от лазерного отраженного сигнала, так и от образцового отклика (без

лазерного освещения), взятого после регистрации лазерного отражения. Образцовые отклики, временная развертка которых показана на рис. 144, берутся для отфильтровывания от полученного лазерного сигнала шумовых токов трубки и других ветвей системы. Четыре одновременных замера на одной длине волны полностью характеризуют состояние поляризации рассеянного сигнала, выдавая степень поляризации, азимутальный угол и показатель эллиптичности.

8.2.2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОРОДНОГО СОСТАВА ДРЕВОСТОЕВ ПО СТЕПЕНИ ДЕПОЛЯРИЗАЦИИ ЛАЗЕРНОГО СИГНАЛА

Экспериментальные залеты проведены в окрестностях Бангора (шт. Мэн) Годдарским центром НАСА. Данные получены из различных лесных местообитаний (древостоя клена, молодых культур клена и лиственницы), геологических структур и искусственных сооружений (Kalshoven, Dabney, 1990). Калибровка исходящего от вертолета лазерного сигнала осуществлялась на куске брезента размером 18×20 футов с известными поляризационными характеристиками. Размер лазерного пятна на поверхности земли — около 20 см, номинальная высота полета — 250 м. Имелись определенные трудности в четкой идентификации многих лазерных отражений из-за наличия теней и плохого видеоразрешения. Полеты проводили в вечернее время для снижения уровня основного света, который в противном случае мог накладываться на полезный сигнал в трубках фотоумножителя через наведенный пространственный заряд. Ширина полосы пропускания спектральных фильтров на трубках принята 10 нм. Уменьшение ее снижает освещенность, делая ее недостаточной для качественной видеосъемки. Тем не менее большая часть информации довольно четкая. Ель и лиственница хорошо различались как с борта вертолета, так и по материалам видеосъемки, поскольку посажены рядами, т. е. имели упорядоченную горизонтальную структуру. Деревья клена — листопадной широколиственной породы, случайно распределены по площади вперемежку с хвойными — тсугой и сосной Веймутовой. Деревья клена хорошо отличались от хвойных. Все данные получены в течение одного залета с одной и той же лесной площади.

Данные трех каналов анализировались и определялась степень поляризации на каждой из двух длин волн. Это данные с по-

Таблица 72

Экспериментальные показатели степени поляризации

Объект	Показатели степени поляризации (P) и среднеквадратического отклонения (σ) для длин волн	
	инфракрасной	зеленой
Крупнотравье	0,150/0,026	0,233/0,021
Клен	0,124/0,024	0,210/0,026
Ель	0,066/0,019	0,233/0,026
Лиственница	0,037/0,012	0,222/0,031

Примечание. В числителе — P , в знаменателе $\pm\sigma$.

поляризационными фильтрами при 0° , 45° и 90° по отношению к поляризации переданного лазерного сигнала. При названных значениях углов степень поляризации равна

$$P = [(DIF^2 + \{2 \times I(45) - SUM\}^2) / SUM^2]^{1/2},$$

где

$$DIF = I(0) - I(90),$$

$$SUM = I(0) + I(90)$$

и $I(\Theta)$ — измеренный трубкой выходной сигнал для угла поляризации фильтра Θ .

Показатели степени поляризации P были получены по данным 15 экспериментальных точек на крупнотравье и в лесных насаждениях (табл. 72). Как видно из табл. 72, наибольший эффект деполяризации при соответственно наименьших показателях степени поляризации P получен в ИК-зоне (1064 нм) лазерного излучения вследствие большей отражательной способности хлорофилла, имеющего длину волны в основном в зеленой зоне (эффект Умова). Различия в степени поляризации, выявленные в ИК-зоне (см. табл. 72) между разными породами, объясняются биологически обусловленными особенностями морфоструктуры их крон. Хвоя лиственницы длиннее и имеет более хаотический характер пространственной ориентации, чем хвоя ели, и дает максимальные рассеяние и эффект деполяризации при соответственно наименьшем показателе степени поляризации (0,037 против 0,066). В целом хвойные вследствие более тонкой струк-

туры хвоинок (в сравнении с листьями) обеспечивают лучшую проникаемость крон и лучшее рассеяние света в сопоставлении как с твердолиственным кленом ($P = 0,124$), так и с крупнотравьем ($P = 0,150$).

Сопоставление результатов лазерного зондирования на длинах волн 532 и 1064 нм показало, что для зеленого света данные деполяризации намного чувствительнее к текстуре поверхности, чем в ИК-зоне. Эта спектральная зависимость деполяризации от текстуры поверхности установлена в лабораторных экспериментах с брезентом, на котором были хорошо видны направления волокон и нитей. Ориентирование брезента в разных плоскостях давало 10 %-е выравнивание замеров деполяризации на волне 1064 нм и 30 %-е — на волне 632 нм. В этой связи осуществленное в ходе летних экспериментов “зеленое” лазерное облучение хорошо покрашенного и ржавого металлических листов дало показатели P , равные соответственно 0,75 и 0,34 вследствие различной текстуры (шероховатости) их поверхностей. Характеристики текстуры растительных объектов в данном диапазоне практически одинаковы, поскольку различие видов растений по степени поляризации (см. табл. 72) не достоверно. В целом растительные объекты дают более высокую деполяризацию света по сравнению с искусственными, имеющими гладкую поверхность (соответственно — прямое рассеяние и меньшую деполяризацию). Это особенно важно, например, в поисково-спасательных операциях, когда объект искусственного происхождения будет чрезвычайно выделяться на окружающем природном фоне, имеющем более выраженную деполяризацию.

БСЛП дает возможность проверки разных концепций и различных поляризационных эффектов в плане развития теории дистанционного зондирования. Поскольку приемник бортового лазерного поляриметра применим также для измерения поверхностной поляризации солнечного света, то можно с использованием различных конфигураций фильтров и длин волн провести серию экспериментов для выявления прямых корреляций между замерами сигналов лазерного и солнечного света над одной и той же территорией.

Разрабатываемые в настоящее время в НАСА с помощью БСЛП принципы лазерной радиометрии используются при создании бортовой системы поляризационного изображения с применением специальных детекторных антенн для приема вторич-

ных сигналов. Такая система дает возможность получить поляризационную картину больших участков земной поверхности (Kalshoven, Dabney, 1990).

В целом по главе 8 можно сделать следующие выводы.

1. Известная в физиологии закономерность повышения уровня флуоресценции при фотосинтезе по мере снижения интенсивности (эффективности) последнего дает возможность с учетом регистрации уровня наведенной лазером флуоресценции (НЛФ) оценивать ряд характеристик состояния, или качественных характеристик лесного полога, а также его видовой состав.
2. НЛФ-технология позволяет диагностировать стресс у растений при самых низких уровнях загрязнения, на начальных его стадиях. Поэтому она перспективна для целей мониторинга и картирования, в первую очередь, стрессового состояния лесов, а не уровней загрязнения, обычно трудно идентифицируемых вследствие многообразия поллютантов разной степени токсичности.
3. Формирование банка флуоресцентных спектров различных древесных пород и разработка алгоритмов их интерпретации по коррелятивным связям флуоресцентных характеристик с биологическими характеристиками видов расширяют возможности применения бортовой лазерной техники в формировании банка данных о фитомассе лесов.
4. Лесной полог представляет собой специфическую поверхность, отличную от других категорий земной поверхности. Его рассеивающая способность видоспецифична, поскольку биологические свойства и особенности древесных пород находят выражение в огромном разнообразии морфологических характеристик крон деревьев. Поэтому технология бортовой оптической поляриметрии является альтернативным методом распознавания породного состава при дистанционном зондировании лесов для формирования банка данных о их фитомассе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время наряду с формированием количественной теории биопродуктивности лесных экосистем как основы управления их ресурсами (Кузьмичев, 1977) в рамках ФАО ООН и ИЮФРО создаются глобальная информационная система мировых лесных ресурсов и межнациональная сеть стандартизованных банков и методов идентификации данных дистанционного зондирования лесов (IUFRO..., 1994). Первоочередное значение имеют данные о продукции фитомассы лесов. В мае 1993 г. Совещание экспертов ФАО ООН и ЕЭК по глобальной оценке лесных ресурсов поставило вопрос о международном мониторинге фитомассы лесов. В июне 1993 г. начато формирование информационной сети по исследованию структуры лесного полога, финансируемое Национальным фондом науки США. Его цель — использовать материалы ученых разных стран и научных направлений по пространственной структуре лесного полога и создать на их основе систематизированный банк данных (Nadkarni, Parker, 1994). Формирование глобального банка данных о фитомассе лесов находится в русле названных инициатив и программ.

В нашей стране работы по лесному мониторингу, разработка экологических программ разных уровней, исследования по дистанционному зондированию лесов и его наземной идентификации не скоординированы между собой. Применение различных методов и подходов дает несопоставимые результаты. Для одних территорий информация отсутствует, для других — дублируется. Формирование банка данных о фитомассе лесов создает предпосылки для унификации методических подходов к решению названных проблем и их взаимной координации.

Развитие методов лесной таксации, компьютерной техники и ее программного обеспечения позволило перейти от изучения парных связей в структуре фитомассы лесов к выявлению более сложных многофакторных закономерностей ее динамики. Лес

представляет собой сложную биологическую динамическую систему, и необходимость многофакторного анализа его структуры и динамики стала сегодня очевидной. В книге показано, что большая часть новых методических разработок и научных результатов получена именно благодаря анализу, в основе которого лежит системный подход.

Весьма результативно применение систем рекурсивных уравнений, относящихся к более общему классу систем связанных уравнений. Но они оказались обойденными вниманием не только со стороны исследователей — “модельеров” биопродуктивности древостоев, но и специалистов традиционной лесной таксации, занимающихся проблемами роста и прироста запасов стволовой древесины. В главе 2 показано, что подход к моделированию роста и прироста древостоев на основе совместимых уравнений их динамики на сегодня в отечественной лесной таксации совершенно не востребован, что обусловило определенные потери не только в практике моделирования роста древостоев, но и в его теории. Например, у нас традиционно считалось, что данные о полной производительности древостоев (с учетом отпада) можно получить только на постоянных пробных площадях. Оказалось, что при моделировании полной производительности древостоев на основе совместимых многофакторных моделей данные о текущем отпаде вовсе не нужны, что в корне меняет концепцию моделирования динамики запаса древостоев.

Сложившиеся в России и большинстве западных стран технологии лесоинвентаризации не учитывают потребности экологического мониторинга и не ориентированы на решение актуальных экологических проблем. В имеющихся и во вновь создаваемых банках лесоустроительных данных заложена информация только о запасах стволовой древесины. Лесная таксация накопила огромное количество нормативов для оценки этих запасов, которые невозможно продублировать аналогичными нормативами для всей фитомассы с силу чрезвычайной трудоемкости получения экспериментальных данных. Единственно приемлемый путь — использовать традиционные нормативы и банки данных ГУЛФ, сопрягая их с данными о фитомассе лесов на основе переводных коэффициентов. В книге предложены алгоритмы экстраполяции экспериментальных данных фитомассы на лесопокрытые площади на основе моделей переводных коэффициентов фитомассы. Разработана специальная программа и показана

возможность создания автоматизированных банков данных о фитомассе лесов и картосхем их биопродуктивности с иерархией от уровня лесничества до общенационального.

На примере елово-пихтовых экосистем показано, что, собрав все имеющиеся экспериментальные данные о фитомассе древесной породы в пределах ее ареала и применив предложенные в работе алгоритмы расчета, можно выявить географические закономерности распределения фитомассы и обеспечить всю территорию нормативами для оценки фитомассы лесопокрытых площадей, т. е. на основе банка данных о фитомассе создать банк нормативов для ее оценки, необходимых сегодня для прогнозирования глобальных экологических ситуаций.

Применение четырехзвенной “цепочки” рекурсивных взаимосвязей на основе концепции самоизреживания древостоев позволило выйти на новый уровень анализа экспериментальных данных фитомассы и оценки биопродукционного потенциала лесопокрытых площадей по зональному градиенту. При разработке алгоритма расчета предельных показателей фитомассы задействованы известные в лесной экологии “правило 3/2” и закон Эйхгорна, подтверждено наличие колоколообразных кривых в динамике продуктивности древостоев и дано количественное соотношение предельных и “нормальных” траекторий биопродуктивности древостоев.

Лесная таксация, выйдя на уровень разработки глобальных экологических программ и международного лесного мониторинга, становится количественной основой глобальной экологии. Однако ее традиционные методы приводят сегодня к артефактам, таким, как увеличение прироста фитомассы лесов Европы при общей тенденции снижения охвоенности лесного полога. В книге показан один из возможных путей снятия подобных противоречий на биоэкологической основе. Объединив пайп-модель и теорию распределения ассимилятов, т. е. “замкнув” дендрометрические характеристики ксилемного и флоэмного транспорта на массу ассимиляционного аппарата, получили возможность выявить региональные различия в эффективности его работы, обусловленные как природными факторами, так и атмосферными загрязнениями. По существу предложен новый метод индикации атмосферного загрязнения на допороговых уровнях, позволяющий оценить ущерб от загрязнений в показателях потерь прироста и, следовательно, в денежном выражении. Методика

может быть включена в разработку законодательной базы и системы кредита загрязнений, регламентирующих отношения между природоохранными ведомствами и экоцидными предприятиями и стимулирующих экологически безопасные производства.

Технология бортового лазерного зондирования лесных площадей находится пока на начальном этапе развития, однако имеет широкие перспективы применения не только при формировании банков данных о фитомассе обширных лесных территорий, но и при мониторинге их состояния. Основанием для такого прогноза служат чрезвычайно интенсивное развитие лазерной техники и непрерывное расширение областей ее применения. В книге показаны, по крайней мере, три такие области (лазерное профилирование, НЛФ-технология и лазерная поляриметрия), имеющие отношение к лазерному зондированию лесов, и каждая из них ориентирована на извлечение своей специфической доли информации о лесном пологе.

Совмещение на одном авианосителе нескольких сенсоров (дальномера двойного действия, а также сенсоров флуоресценции пигментов листвы и деполяризации световой волны) позволяет существенно повысить информативность лазерной съемки. Тогда в оценочные регрессионные модели фитомассы войдут дополнительные лазерные переменные, которые обеспечат выход на безошибочную идентификацию породного состава, а также на прямую оценку фотосинтезирующей биомассы лесного полога. Перспектива развития направления видится в совмещении названных технологий как в процессе получения данных, так и в их обработке и анализе результатов; развитии наземных систем контроля и идентификации данных; интеграции глобальной геопозиционной спутниковой системы в информационные потоки бортовых лазерных систем. Это требует объединения усилий специалистов разного профиля — лесоводов, физиков, физиологов растений, математиков, инженеров по радиоэлектронике и др.

Исследования структуры и динамики фитомассы лесов, начатые во всех странах практически одновременно (в 30—40-х годах), имеют свою специфику. Это трудоемкость весового определения фракционного состава фитомассы (особенно ее прироста), разнообразие лесорастительных условий, субъективный выбор исследователями факторов, определяющих запас и прирост

фитомассы на 1 га, разнообразие применяемых методик полевых и камеральных работ. В этих условиях непреходящую ценность для разработки количественной теории биопродуктивности лесов и для создания фактологической ее основы (банка данных о их фитомассе) имеют экспериментальные данные фитомассы и ее прироста. К сожалению, значительная часть исследователей биопродуктивности лесов публикуют лишь результаты той или иной обработки экспериментальных данных фитомассы в соответствии со своим видением той или иной лесоводственной проблемы, а исходные данные хранятся в личных архивах и в конце концов уходят безвозвратно вместе с их обладателями. Автор надеется, что эта монография может в какой-то степени стимулировать, если не исследования биопродуктивности лесов, то, по крайней мере, публикацию экспериментальных данных в первозданном виде, и помочь начинающим экспериментаторам выбрать тот или иной метод изучения проблем, обозначенных в книге. Решение проблем биопродуктивности в целом и формирования банков данных о фитомассе лесов — в частности — главная цель книги. Эта работа ни в коей мере не претендует на статус методического руководства, поскольку автор исходил в основном из сегодняшнего уровня разработки проблем биопродуктивности и лишь частично — из анализа некоторых тенденций их развития. Поэтому вполне естественно, что одни направления, не принятые сегодня, в ближайшие годы получат ускоренное развитие, а другие — перспективные сейчас — в последующем не оправдают надежд.

CONCLUSIONS

Parallel with subsequent development of the quantitative theory of biological productivity of forest ecosystems as a base of their resources management (Kuzmichev, 1977), a global information system of world forest resources (GRID) as well as an international network of databases and methods of identifying data of forest remote sensing are established today within the framework of FAO and IUFRO activity (IUFRO..., 1994). Information about forest biomass production is of particular importance. The FAO/ECE Meeting of Experts on the Global Forest Resource Assessment held in Kotka, Finland, 3—7 May 1993 had especially recommended the development of a global project on forest biomass monitoring. In July, 1993, the Canopy Research Network (CRN) was established with a two-year planning grant from the Database Activities Program and the Ecosystems Program of the National Science Foundation, USA. Its purpose is to collect information from forest canopy researchers of different countries and scientific fields concerned the complex three-dimensional structure of forest canopies and to create a systematized data bank on its base (Nadkarni, Parker, 1994). Global data bank on forest biomass is compiling in the course of the above-mentioned initiatives and programs.

In our country, development of forest monitoring, ecological programs of different levels and forest remote sensing with its ground identifying are not coordinated among themselves. The use of different approaches and measurement methods prevents the comparison of results. There is no information as concerns some areas and at the same time it is duplicated for others. Forest biomass data bank compiling creates the necessary prerequisites for unifying methodical approaches to these problems and for their coordination.

Development of forest mensuration methods, computer hardware and software allowed to turn from some paired interrelations of forest biomass structure studying to revealing more complicated multidimensional regularities of its dynamics. Forest is a complex biological

dynamic system and the necessity of multidimensional analysis of its structure and dynamics is becoming obvious today. This book shows that it is possible to obtain the most part of new methodical and scientific results just owing to such analysis with the system approach as its base.

The use of recursive equation systems also appeared to be very result-yielding as a component of a more common class of related equation systems. It is strange that they were slipped the attention not only of scientific modellers of biological productivity of forests but also of specialists in the field of traditional forest measurements who are studying problems of yield and growth of forest stem volume. It is shown in the book that the approach to modeling growth and yield of forests using compatible equations for their dynamics is completely ignored today by the national forest mensuration. This caused some loss concerning not only forest growth modeling practice but also its theory. For example, it was traditionally taken into consideration by Russian forest scientists that the value of forest gross yield (involving tree mortality) can be obtained on permanent stand plots only. It was found that when modeling forest gross yield on the base of compatible multidimensional equations, current tree mortality data are not needed and this changes radically the common concept of modeling stand volume dynamics.

National forest inventories existing in Russia and other countries may not be suitable for monitoring changes or may not address the environmental issues we now face. Information about stem volume only is involved into existing and newly created forest inventory data banks. Forest mensuration has accumulated during its history a lot of standards for estimating stem volume. They cannot be repeated in the form of analogous standards for estimating total stand biomass because of extraordinary labor-consuming costs of harvest biomass data obtaining. The only acceptable way consists of using traditional standards and forest inventory data banks combining them with harvest biomass data on the base of forest biomass conversion factors. A special program is worked out in the book and the possibility of creating automatized forest biomass data banks or their biological productivity maps in succession from a forest farm level to national one is shown.

Taking as an example spruce and fir ecosystems, it was shown that after collecting all the harvest biomass data for the given species within its expansion area one can use the developed here calculating algorithms

and reveal some geographic regularities in forest biomass distribution as well as supply all the forest area with the standards for forest biomass estimation, i. e. on the base of some harvest biomass data bank create a bank of biomass standards needed today for prognoses of global ecological situations.

Use of the four-element "chain" of recursive dependencies on the base of the forest self-thinning concept allowed to ascend the quite new level of experimental biomass data analysis as well as estimating biological production potential of forested areas according to a zonal gradient. When developing an algorithm for calculating utmost biomass indices, the $3/2$ power law and Eichhorn's law well known in forest ecology were used, availability of bell-shaped curves in stand productivity dynamics is confirmed and quantitative proportions of utmost and "normal" trajectories of stand biological productivity are given.

Forest mensuration science ascending the level of global ecological programs and international forest monitoring development is becoming a quantitative base of global ecology. Nevertheless its traditional methods result today in some artefacts, for example, such as increasing European forest biomass growth with simultaneous decreasing crown density conditioned by air pollution. One of the possible ways to settle such conflicts using biological or ecological bases is shown in the book. When combining the pipe model theory and an assimilate partitioning concept, i. e. when "closing" dendrometric characteristics of the xylem and phloem transport with assimilating foliage biomass as an intermediate link in this physiological "chain", a possibility was obtained to reveal some regional differences in the efficiency of foliage functioning caused by both natural influences and air pollution. Essentially, a new method of indicating air pollution on before-threshold levels is suggested that allows to estimate forest pollution damage in terms of forest growth decreasing and, consequently, in cost terms. The method can be involved into developing legislative standards as well as air pollution credit system for regulating relations between nature protective organizations and ecocide (i. e. dangerous for environment) enterprises and stimulating environmentally safe production activity.

Technology of airborne laser remote sensing of forest areas is at present on the initial stage of its development, nevertheless it has promising prospects to be used not only in the course of compiling biomass data banks for extensive forest areas but also during their state monitor-

ing. The base of such prognosis is extraordinarily intensive development of laser technique as well as continuous expansion of its applying fields. At least three such fields (airborne laser profiling, laser-induced fluorescence and laser polarimeter techniques) concerning laser remote sensing of forests are described in the book and each of them is intended for extraction of its specific information share of forest canopy structure.

Combining a number of sensors (laser ranger for double profiling, foliage pigment fluorescence as well as laser illumination depolarization records) on the same aircraft allows to improve significantly laser survey informative ability. In this case some auxiliary laser variables will be involved into forest biomass estimating regressions that ensure some subsequent approximation to exact identifying different forest species as well as to direct estimating photosynthetic biomass of forest canopy. A prospect of this trend development seems to be in combining above mentioned techniques both during experimental data obtaining and during their processing or result analysis; in subsequent development of ground systems for remote sensing data control and data identifying; in integration of global satellite positioning system with information streams of airborne laser systems. This will require to combine efforts of a number of different specialists, i. e. foresters, physicists, plant physiologists, mathematicians, electronics engineers, etc.

Investigations of forest biomass structure and dynamics started in all the countries almost simultaneously in 1930—1940 have their specific features. These are labor-consuming character of weighing fractioned tree biomass, especially its increment, forest site diversity, investigator's arbitrary selection and estimation of the factors (indices) determining biomass pool and increment on the area unit, diversity of applied methods of field and laboratory works. In these conditions harvest biomass and its increment data are of stable value for development of quantitative theory of forest biological productivity as well as for creation of its factual base, i. e. forest biomass data bank. Unfortunately a number of forest biomass investigators publish only the results of either processing harvest biomass data corresponding to their specific vision of either forestry problem whereas the original data are kept in their personal archives and finally are lost for science together with these data owners. The author would like to hope that this book is able to a certain extent to stimulate not so much forest biological productivity research as original harvest biomass data publication at least.

Электронный архив УГЛТУ

The author would like to hope as well that young people starting its studying forest biological productivity will have a possibility of some choice of either investigating direction from these discussed in the book. Just the statement of problems of forest biological productivity on the whole as well as of problems of compiling forest biomass data banks in particular was meant as a primary purpose of the book. This work has not a claim on the status of some methodical handbook as the author proceeded from the current state of biological productivity problems and only partly from analysis of some trends of their development. Therefore naturally some directions ignored today will be increasingly developed in next years and on the contrary some directions designated in this book as progressive ones will not justify our hopes in the future.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Абатуров Ю. Д., Гольцова Н. И., Ростова Н. С. и др. Некоторые особенности радиационного поражения сосны в районе аварии на Чернобыльской АЭС // Экология. 1991. № 5. С. 28—33.

Абражко М. А. Закономерности распределения и фракционный состав биомассы подземных частей // Структура и продуктивность еловых лесов южной тайги. Л., 1973. С. 109—116.

Агесс П. Ключи к экологии. Л.: Гидрометеиздат, 1982. 97 с.

Адлер Ю. П., Маркова Е. В., Грановский Ю. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: Наука, 1976. 279 с.

Айвазян С. А., Енюков И. С., Мешалкин Л. Д. Прикладная статистика: Исследование зависимостей. М.: Финансы и статистика, 1985. 487 с.

Алексеев В. А., Бердси Р. А. Углерод в экосистемах лесов и болот России. Красноярск: Изд-во Ин-та леса СО РАН, 1994. 224 с.

Алексеев В. А., Старостина К. Ф., Ющенкова Л. Н. Закономерности распределения и фракционный состав надземной биомассы // Структура и продуктивность еловых лесов южной тайги. Л., 1973. С. 102—108.

Антанайтис В. В. Изучение роста древостоев на экологической основе // Закономерности роста и производительности древостоев. Каунас, 1985. С. 11—14.

Антанайтис В. В., Загреев В. В. Прирост леса. М.: Лесн. пром-сть, 1981. 200 с.

Антонов Г. Биомасса, прирост и опад на някои фитоценози от субальпийския и горнопланинския смърчов подпояс // Наука за гората. 1991. № 1. С. 55—61 (болг.).

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

Базилевич Н. И. Концептуально-балансовые модели круговорота веществ в геосистемах как метод геосистемного мониторинга // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. Л., 1985. Т. VIII. С. 60—71.

Базилевич Н. И. Биологическая продуктивность экосистем Северной Евразии. М.: Наука, 1993. 293 с.

Базилевич Н. И., Родин Л. Е. Картограммы продуктивности и биологического круговорота главнейших типов растительности суши // Изв. ВГО. 1967. Т. 99, № 3. С. 190—194.

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

Бобкова К. С. Биологическая продуктивность хвойных лесов европейского Северо-Востока. Л.: Наука, 1987. 156 с.

Бойко А. В., Сидорович Е. А., Моисеева А. Б. Экспериментальные исследования природных комплексов Березинского заповедника. Минск: Наука и техника, 1975. 376 с.

Боханова Н. С. Эскиз таблиц биологической продуктивности пойменных дубрав // Вопросы таксации и лесоустройства. М., 1971. С. 8—10.

Будыко М. И. Глобальная экология. М.: Мысль, 1977. 327 с.

Будыко М. И., Ефимова Н. А. Использование солнечной энергии природным растительным покровом на территории СССР // Ботан. журн. 1968. Т. 53, № 10. С. 1384—1389.

Вакуров А. Д. Производительность ельников на европейском Севере // Продуктивность органической и биологической массы леса. М., 1974. С. 7—10.

Вакуров А. Д., Полякова А. Ф. Круговорот азота и минеральных элементов в низкопродуктивных ельниках северной тайги // Круговорот химических веществ в лесу. М., 1982. С. 20—43.

Вакуров А. Д., Полякова А. Ф. Круговорот азота и минеральных элементов в 35-летнем осиннике // Там же. С. 44—54.

Валетов В. В. Биологическая продуктивность болотных ельников белорусского Поозерья // Лесоведение. 1988. № 3. С. 27—32.

Ватковский О. С. Анализ формирования первичной продуктивности лесов. М.: Наука, 1976. 115 с.

Взнуздаев Н. А., Шахова О. В., Стукалова В. И., Черемисинов Н. А. Комплексное изучение осинников с учетом формового разнообразия осины. М.: Наука, 1969. 77 с.

Взнуздаев Н. А., Шахова О. В., Стукалова В. И. Запас органического вещества осинников в зависимости от формового разнообразия // Биологическая продуктивность и круговорот химических элементов в растительных сообществах. Л., 1971. С. 53—59.

Вомперский С. Э., Иванов А. И. Связь площади поперечного сечения заболони с массой хвои сосны обыкновенной // Лесоведение. 1984. № 3. С. 60—65.

Габделхаков А. К. Фитомасса липняков лесостепи Башкирского Предуралья: Автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Йошкар-Ола, 1997. 24 с.

Габеев В. Н. Биологическая продуктивность лесов Приобья. Новосибирск: Наука, 1976. 171 с.

Георгиевский Н. П. О развитии насаждений при рубках ухода // Развитие русского лесоводства. М.; Л., 1948. С. 112—179.

Герасимов И. П. Мировая почвенная карта и общие законы географии почв // Почвоведение. 1945. № 3—4. С. 152—161.

Головенко С. В., Герасимова М. И., Лазукова Г. Г., Шуйцев Ю. К. Об оценке лесорастительных свойств Валдая в связи с прогнозированием продуктивности растительных сообществ // Почвы и продуктивность растительных сообществ. М., 1981. Вып. 5. С. 61—193.

Голубец М. А., Половников Л. И. Общие закономерности накопления фитомассы в еловых лесах // Биологічна продуктивність смерекових лісів Карпат. Киев, 1975. С. 4—68.

Гортинский Г. Б., Молчанов А. А., Абражко М. А. и др. Продуктивность лесов европейской части СССР // Ресурсы биосферы: Итоги

советских исследований по Международной Биологической Программе. Л., 1975. Вып. 1. С. 34—42.

Грибанов Л. Н., Лагов И. А., Чабан П. С. Леса Казахстана // Леса СССР. М., 1970. Т. 5. С. 5—77.

Григорьев А. А., Будыко М. И. О периодическом законе географической зональности // ДАН СССР. 1956. Т. 110, № 1. С. 129—132.

Грозева М., Димитров Е. П., Джоргов И. Структура и химичен състав на биомасата в смърчово насаждение от Рила планина // Горскостопанска наука. 1986. № 2. С. 52—58 (болг.).

Гудочкин М. В., Чабан П. С. Леса Казахстана. Алма-Ата: Казахск. гос. изд-во, 1958. 323 с.

Гульбе Т. А., Рождественский С. Г. Первичная продуктивность и вертикальная структура фитомассы 27-летних культур ели в Ярославской области // Закономерности роста и производительности древостоев. Каунас, 1985. С. 212—214.

Гусев А. А., Гусева И. Г. Эколого-экономические проблемы устойчивого развития // Экономика природопользования (обзорная информация). М., 1996. Вып. 1. С. 4—17.

Данилов М. Д. Количественный и качественный состав листовой поверхности в чистых осиновых насаждениях // Лесн. хоз-во. 1949. № 12. С. 28—32.

Данилов М. Д. Закономерности развития чистых древостоев в связи с динамикой листовой массы // Лесн. хоз-во. 1953. № 6. С. 21—24.

Демиденко В. П. Осинники Среднего Приобья. Новосибирск: Наука, 1978. 160 с.

Деревья и кустарники СССР. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1949. Т. 1. 463 с.

Детлаф Т. А., Детлаф А. А. Безразмерные критерии как метод количественной характеристики развития животных // Математическая биология развития. М., 1982. С. 25—39.

Доскач А. Г. Основные черты строения рельефа Северного Казахстана // Природное районирование Северного Казахстана. М.; Л., 1960. С. 23—41.

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

Дылис Н. В., Носова Л. М. Фитомасса лесных биогеоценозов Подмосковья. М.: Наука. 1977. 143 с.

Дюкарев В. Н., Козин Е. К., Розенберг В. А. Возрастное развитие и фитомасса зеленомошно-папоротниковых ельников Сихотэ-Алиня // Биологическая продуктивность ельников. Тарту, 1971. С. 77—82.

Ермаков В. Е., Асютин П. Ф. Биологическая продуктивность еловых древостоев ельника кисличного // Лесоведение и лесн. хоз-во. Минск, 1988. Вып. 23. С. 74—76.

Ермоленко П. М. Динамика надземной массы древесного яруса в производных фитоценозах Западного Саяна // Структурно-функциональные взаимосвязи и продуктивность фитоценозов. Красноярск, 1983. С. 32—40.

Ермоленко П. М., Ермоленко Л. Г. Фитомасса производных лесных фитоценозов в черневом подпорье Западного Саяна // Формирование и продуктивность лесных фитоценозов. Красноярск, 1982. С. 60—71.

Жевандров Н. Д. Поляризация света. М.: Наука, 1969. 192 с.

Желудов А. В. Аэрофотосъемочное оборудование для лазерной таксации лесов // Лесоустройство, таксация и аэрометоды. Л., 1985. С. 127—129.

Жирин В. М. Дистанционное зондирование при изучении динамики лесных экосистем за рубежом (обзорная информация). М.: ВНИИЦлесресурс, 1993. Вып. 2. 40 с.

Жукова В. М. Надземная фитомасса осины в лесных сообществах Подмоскovie // Лесоведение, 1969. № 3. С. 39—46.

Забоева И. В., Русанова Г. В., Слобода А. В. Биопродуктивность ельников-зеленомошников средней и северной тайги Коми АССР // Растительные ресурсы. 1973. Т. 9, вып. 1. С. 100—106.

Заварзин Г. А. Международные экологические конвенции // Природа. 1992. № 12. С. 3—7.

Загреев В. В. Географические закономерности роста и продуктивности древостоев. М.: Лесн. пром-сть, 1978. 240 с.

Загреев В. В., Сухих В. И., Швиденко А. З. и др. Общесоюзные нормативы для таксации лесов. М.: Колос, 1992. 495 с.

Захаров В. К. Новое в методике исследования формы древесных стволов и составление таблиц объема и сбеге // Тр. Ин-та леса АН БССР. Минск, 1955. Вып. 6. С. 16—20.

Иванов А. И., Дубинин А. И. Площадь сечений заболони и площадь зоны транзита влаги в ней у сосны обыкновенной // Лесоведение. 1992. № 5. С. 28—37.

Ивахненко А. Г. Самообучающиеся системы распознавания и автоматического управления. Киев: Техника, 1969. 392 с.

Игнатьева Л. А. Роль лесных фитоценозов Приобья в биологическом круговороте // Изв. СО АН СССР. Сер. биол. 1971. Вып. 3, № 15. С. 32—38.

Иевинь И. К., Дикельсон Э. О. Масса крон осины, березы и ели в кислочниках Латвии // Лесн. хоз-во. 1962. № 4. С. 20—23.

Исаев А. С., Коровин Г. Н., Уткин. А. И. и др. Оценка запасов и годичного депонирования углерода в фитомассе лесных экосистем России // Лесоведение. 1993. № 5. С. 3—10.

Исаев А. С., Коровин Г. Н., Сухих В. И. и др. Экологические проблемы поглощения углекислого газа посредством лесовосстановления и лесоразведения в России. М.: Изд-во Центра экол. политики России. 1995. 156 с.

Казимиров Н. И., Морозова Р. М. Биологический круговорот веществ в ельниках Карелии. Л.: Наука, 1973. 175 с.

Кайбияйнен Л. К., Хари П., Сазонова Т. А. Сбалансированность системы водного транспорта у сосны обыкновенной. III. Площадь проводящей ксилемы и масса хвои // Лесоведение. 1986. № 1. С. 31—37.

Калинин М. И. Формирование корневой системы деревьев. М.: Лесн. пром-сть, 1983. 152 с.

Карта экологической ситуации промышленных районов Свердловской области. М.: Роскартография, 1993.

Клейнен Дж. Статистические методы в имитационном моделировании. М.: Статистика, 1978. Вып. 2. 335 с.

Кобак К. И. Биотические компоненты углеродного цикла. Л.: Гидрометеоиздат, 1988. 248 с.

Кобак К. И., Яценко-Хмелевский А. А., Кондрашова Н. И. Баланс углекислого газа в высоко- и малопродуктивных расти-

тельных сообществах // Проблемы атмосферного углекислого газа. Л., 1980. С. 252—264.

Кожевников А. М., Ефименко В. М., Решетников В. Ф. Модели роста надземной фитомассы полных и оптимально изреживаемых еловых культур // Закономерности роста и производительности древостоев. Каунас, 1985. С. 221—223.

Козьмин А. В. Зависимость роста деревьев осины и березы от облиствения // Селекция быстрорастущих пород. М., 1965. С. 81—100.

Козлов М. В., Соколова И. В. Методика определения площади и массы листвы берез // Лесоведение. 1984. № 6. С. 79—83.

Коковин П. А., Нагимов З. Я. Структура фитомассы крон полога сосняка ягодникового // Лесная таксация и лесоустройство. Красноярск, 1990. С. 63—67.

Колесников Б. П. Леса Свердловской области // Леса СССР. М., 1969. Т. 4. С. 64—124.

Колесников Б. П., Зубарева Р. С., Смолоногов Е. П. Лесорастительные условия и типы лесов Свердловской области. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1973. 176 с.

Концепция информатизации лесного хозяйства. М.: ВНИИЦлесресурс, 1990. 70 с.

Копосов Г. Ф. Структура фитомассы осинового фитоценоза юго-западного Забайкалья // Изв. СО АН СССР. Сер. биол. 1975. Вып. 1, № 5. С. 30—35.

Корняк В. С. Биологическая продуктивность ели и березы при совместном произрастании // Вопросы лесовосстановления на европейском Севере. Архангельск, 1976. С. 31—36.

Коссович Н. Л. Влияние рубок ухода на ассимиляцию, освещение и прирост ели в елово-лиственном древостое // Рубки ухода за лесом. Л., 1940. С. 90—135.

Кофман Г. Б. Рост и форма деревьев. Новосибирск: Наука, 1986. 211 с.

Красиков И. И. Динамика надземной фитомассы листовничных древостоев южной Эвенкии // Лесная таксация и лесоустройство. Красноярск, 1987. С. 23—27.

Крауклис А. А., Стрижак Т. И., Топоркова Г. П. Запас фитомассы // Природные режимы и топогеосистемы приангарской тайги. Новосибирск, 1975. С. 177—200.

Крылов Г. В., Крылов А. Г. Леса Западной Сибири // Леса СССР. М., 1969. Т. 4. С. 157—247.

Кряжева Н. Г., Чистякова Е. К., Захаров В. М. Анализ стабильности развития березы повислой в условиях химического загрязнения // Экология. 1996. № 6. С. 441—444.

Кузиков И. Е. Изменение фитомассы в пихтарниках зеленомошного типа леса в различных климатических условиях Средней Сибири: Автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Красноярск, 1979. 24 с.

Кузьмичев В. В. Закономерности роста древостоев. Новосибирск: Наука, 1977. 160 с.

Кузьмичев В. В. Эколого-ценотические закономерности роста разновозрастных сосновых древостоев: Автореф. дис. ... докт. биол. наук. Красноярск, 1980. 31 с.

Кузьмичев В. В. Влияние густоты, возраста и производительности на изменение суммы площадей сечений и запаса древостоев // Закономерности роста и производительности древостоев. Каунас, 1985. С. 44—46.

Кулагина М. А. Биологический круговорот веществ в ельнике сфагново-гилокомиевом // Гидроморфные лесо-болотные экосистемы. Красноярск, 1986. С. 71—83.

Кылли Р., Кяхрик Р. Фитомасса и ее прирост в лесах землянично-печеночницевого типа // Тр. Эстонской с.-х. академии. Тарту, 1970а. Вып. 65. С. 69—91.

Кылли Р., Кяхрик Р. Фитомасса и зольный состав в ельнике и сосняке кисличного типа произрастания леса // Там же. 1970б. С. 233—261.

Лавренко Е. М., Андреев В. Н., Леонтьев В. Л. Профиль продуктивности надземной части природного растительного покрова СССР от тундр к пустыням // Ботан. журн. 1955. Т. 40., № 3. С. 415—419.

Лебков В. Ф. Возраст крон деревьев в сосновых древостоях // Лесоведение. 1993. № 4. С. 58—65.

Лесотаксационный справочник для северо-востока европейской части СССР. Архангельск: АИЛиЛХ, 1986. 358 с.

Лесотаксационный справочник по северо-западу СССР. Л.: ЛПТА, 1984. 319 с.

Лиепа И. Я. Текущий прирост запаса наличного древостоя как полный дифференциал запаса // Вопросы биологии. Рига, 1969. С. 13—23.

Лиепа И. Я. Динамика древесных запасов: Прогнозирование и экология. Рига: Зинатне, 1980. 170 с.

Лиепа И. Я., Усольцев В. А. Определение текущего прироста по запасу в березняках Северного Казахстана // Вестн. с.-х. науки Казахстана. 1985. № 8. С. 80—83.

Лиепа И. Я., Усольцев В. А. Определение текущего прироста по запасу в сосняках островных боров // Там же. 1986. № 4. С. 68—70.

Лир Х., Польстер Г., Фидлер Г.-И. Физиология древесных растений. М.: Лесн. пром-сть, 1974. 424 с.

Лосицкий К. Б., Чуенков В. С. Эталонные леса. М.: Лесн. пром-сть, 1980. 191 с.

Луганский Н. А., Лысов Л. А. Березняки Среднего Урала. Свердловск: Изд-во УрГУ, 1991. 100 с.

Лыхмус К. Н., Оя Т. А. К методике изучения подземной части древостоев // Лесоведение. 1983. № 4. С. 56—62.

Львов П. Н., Ипатов Л. Ф. Изменение таксационных показателей древостоев ельника черничного в связи с зональностью лесов европейского Севера // Лесн. журн. 1973. № 6. С. 14—17.

Любич Д. Д. О точности определения текущего прироста // Лесное хозяйство (таксация и лесоустройство). М., 1963. С. 8—17.

Макаревский М. Ф. Запасы и баланс органического углерода в лесных и болотных биогеоценозах Карелии // Экология. 1991. № 3. С. 3—10.

Макаренко А. А., Маленко А. А. Структура фитомассы молодняков сосны ленточных боров Казахстана // Вестн. с.-х. науки Казахстана. 1984. № 6. С. 79—82.

Мак-Лоун Р. Р. Математическое моделирование — искусство применения математики // Математическое моделирование. М., 1979. С. 9—20.

Маланьин А. Н. Почвенный покров песчаного массива Аман-Карагайского бора // Вестн. с.-х. науки Казахстана. 1975. № 3. С. 83—88.

Маленко Э. Статистические методы в эконометрии. М.: Статистика, 1975. Вып. 1; 1976. Вып. 2. 325 с. (пер. с франц.).

Малиновский К. А., Колищук В. Г. Биологическая продуктивность карпатского елового леса // Биологическая продуктивность ельников. Тарту, 1971. С. 119—124.

Манаков К. Н., Никонов В. В. Биологический круговорот минеральных элементов и почвообразование в ельниках Крайнего Севера. Л.: Наука, 1981. 196 с.

Марченко А. И., Карлов Е. М. Минеральный обмен в еловых лесах северной тайги и лесотундры Архангельской области // Почвоведение. 1962. № 7. С. 52—66.

Марченко А. И., Рокъянис Б. Биологическая продуктивность ельников-зеленомошников и ельников-кисличников // Тр. Латвийск. СХА. Вып. 143. 1978. С. 56—65.

Матвеев П. М., Усольцев В. А. Послепожарный отпад и возобновление лиственницы на многолетней мерзлоте // Экология. 1991. № 4. С. 3—15.

Медведев Ж. Российские леса и рыночная экономика // "Уральский рабочий". 1997. № 118 (за 26 июня).

Межжерин В. А. Закон минимума Либиха: возможности его верного прочтения и практического применения // Экология. 1994. № 2. С. 3—8.

Милованович Д. В. Типы лесов Среднего Урала (Ниже-Тагильского округа). Пермь. Кн. изд-во, 1928. 24 с.

Митрофанов Д. П. Химический состав лесных растений Сибири. Новосибирск: Наука, 1977. 120 с.

Митрофанов Д. П. Продуктивность лесов центральной Эвенкии // Структурно-функциональные взаимосвязи и продуктивность фитоценозов. Красноярск, 1983. С. 53—63.

Митрофанов Д. П. Оценка продуктивности северо-таежных лесов Сибири // Продуктивность лесных фитоценозов. Красноярск, 1984. С. 95—102.

Митрофанов Д. П., Касапенко Л. Ф., Лапицкая Л. С., Пашенных О. К. Первичная продукция лесных фитоценозов Среднего Енисея // Лесные растительные ресурсы Средней Сибири. Красноярск, 1986. С. 3—9.

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

Нагимов З. Я., Сальникова И. С. Возраст крон деревьев и его применение при оценке фитомассы крон в сосняках Среднего Урала // Лесная таксация и лесоустройство. Красноярск, 1997. С. 48—55.

Нестеров В. Г., Кашлев В. Ф., Бобылев Б. Н., Здачевич Л. Б. О биологической массе хвойных древесных пород // Докл. ТСХА. 1967. Вып. 124. С. 271—272.

Нестеров Н. С. Значение осины в русском лесоводстве. 2-е изд. М.: Типография М. Г. Волчанинова, 1894 (перепечатано из Изв. Петровской Академии за 1888 г.). 77 с.

Нормативно-справочные материалы для таксации лесов Украины и Молдавии. Киев: Урожай, 1987. 560 с.

Нормативные материалы для таксации леса Белорусской ССР. М.: Госкомлес, 1984. 308 с.

Нормативы для таксации лесов центрального и южного районов европейской части Российской Федерации. М.: Федеральная Служба лесн. хоз-ва России, 1993. 418 с.

Одинак Я. П., Борсук Д. В., Гранатырь В. Ф. и др. Первичная продуктивность буково-пихтовых фитоценозов Бескид // Лесн. хоз-во, лесная, бумажная и деревообработ. пром-сть. Киев, 1986. Вып. 17. С. 13—15.

Онучин А. А., Борисов А. Н. Влияние темнохвойных лесов Хамар-Дабана на формирование снежного покрова // Средообразующая роль лесных экосистем Сибири. Красноярск, 1983. С. 95—105.

Онучин А. А., Борисов А. Н. Опыт таксации фитомассы соновых древостоев // Лесоведение. 1984. № 6. С. 66—71.

Онучин А. А., Спицына Н. Т. Закономерности изменения массы хвои в хвойных древостоях // Лесоведение. 1995. № 5. С. 48—58.

Опритова Р. В., Глаголев В. А., Розенберг В. А. О возможности определения надземной фитомассы лесов по материалам лесоустройства // Биогеоэкологические исследования в лесах Южного Сихотэ-Алиня. Владивосток, 1982. С. 71—83.

Оськина Н. В., Беспалов В. П. Биологическая продуктивность белотопольников в пойме р. Урал // Лесоведение. 1992. № 6. С. 39—47.

Палуметс Я. К. Распределение фракций фитомассы ели европейской в зависимости от возраста и климатических факторов // Лесоведение. 1988. № 2. С. 34—40.

Палуметс Я. К. Опыт моделирования распределения фитомассы ели // Лесоведение. 1990. № 3. С. 43—48.

Панарин И. И., Митрофанов Д. П., Исаева Л. Н. Горные леса зоны БАМ. Новосибирск: Наука, 1980. 224 с.

Паршевников А. Л. Круговорот азота и зольных элементов в связи со сменой пород в лесах средней тайги // Тр. Ин-та леса и древесины АН СССР. 1962. Т. 52. С. 196—209.

Пастернак П. С., Ворон В. П., Приступа Г. К., Мазепа В. Г. Об устойчивости лесных насаждений к воздействию промышленных выбросов // Лесн. хоз-во. 1985. № 9. С. 61—63.

Пастернак П. С., Чернявский Н. В. Биологическая продуктивность буково-пихтово-еловых молодняков // Лесоводство и агролесомелиорация: Лесоведение и лесоводство. Киев, 1977. Вып. 49. С. 27—33.

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

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

Петров С. А. Сосна островных боров Северного Казахстана // Ботан. журн. 1961. Т. 46. С. 1811—1814.

Писаренко А. И., Мерзленко М. Д., Гурцев А. И. Фитомасса культур ели различной густоты // Формирование эталонных насаждений. Каунас; Гирионис, 1979. Ч. 2. С. 190—193.

Письмеров А. В., Письмерова Р. С., Воробей П. М. Продуктивность фитомассы хвойных и хвойно-лиственных молодняков // Лесоведение. 1979 № 1. С. 68—72.

Плешиков Ф. И. Эколого-ценотические факторы организации сосновых фитоценозов (на примере южнотаежных и лесостепных сосняков Средней Сибири): Автореф. дис. ... докт. биол. наук. Красноярск, 1995. 50 с.

Поздняков Л. К. Лесное ресурсоведение. Новосибирск: Наука, 1973. 120 с.

Поздняков Л. К. Продуктивность лесов Сибири // Ресурсы биосферы: Итоги советских исследований по Международной Биологической Программе. Л., 1975. Вып. 1. С. 43—55.

Поздняков Л. К., Протопопов В. В., Горбатенко В. М. Биологическая продуктивность лесов Средней Сибири и Якутии. Красноярск: Кн. изд-во, 1969. 120 с.

Поликарпов Н. П. Формирование сосновых молодняков на концентрированных вырубках. М.: Изд-во АН СССР, 1962. 171 с.

Полубояринов О. И. Плотность древесины. М.: Лесн. пром-сть, 1976. 160 с.

Полякова Н. Ф. Соотношения между массой листвы, приростом древесины и транспирацией // ДАН СССР. 1954. Т. 96, № 6. С. 1261—1263.

Природное районирование Северного Казахстана / под ред. Б. А. Федорovichа. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1960.

Протопопов В. В. Биологическая продуктивность горных лесов Западного Саяна // Биологическая продуктивность и круговорот химических элементов в растительных сообществах. Л., 1971. С. 59—65.

Протопопов В. В., Зюбина В. И. Взаимосвязь климатических факторов среды с фитомассой насаждений и методика ее расчета // Экологическое влияние леса на среду. Красноярск, 1977. С. 3—15.

Пшеницын В. И., Абаев М. И., Лызлов Н. Ю. Эллипсометрия в физико-химических исследованиях. Л.: Химия, 1986. 152 с.

Раскатов П. Б. Некоторые особенности водного тока в ветвях лиственных древесных пород // Науч. зап. Воронежского отд-ния ВБО. Воронеж, 1964. С. 71—74.

Рахтеенко И. Р., Якушев Б. И. Комплексный метод исследования корневых систем растений // Методы изучения продуктивности корневых систем и организмов ризосферы. М., 1968. С. 45—49.

Рачкулик В. И., Ситникова М. В. Отражательные свойства и состояние растительного покрова. Л.: Гидрометеиздат, 1981. 288 с.

Рейхардт А. Ю. Лесные отходы как сырье для ширпотреба // Лесн. индустрия. 1934. № 7. С. 45—48.

Ремезов Н. П., Быкова Л. Н. Потребление и круговорот азота и зольных элементов в осинниках // Почвоведение. 1953. № 8. С. 28—41.

Ремезов Н. П., Быкова Л. Н., Смирнова К. М. Потребление и круговорот азота и зольных элементов в лесах европейской части СССР. М.: Изд-во МГУ, 1959. 284 с.

Родин Л. Е., Базилевич Н. И. Динамика органического вещества и биологический круговорот зольных элементов и азота в основных типах растительности земного шара. М.; Л.: Наука, 1965. 253 с.

Рождественский С. Г. Фитомасса и годовичная продукция надземной части осиновых древостоев Ярославской области // Лесоведение. 1979. № 4. С. 30—37.

Рождественский С. Г. Масса и годовичная продукция надземной части осиновых фитоценозов Большесельского района Ярославской области // Биологическая продуктивность лесов Поволжья. М., 1982. С. 99—109.

Рождественский С. Г., Гульбе Т. А., Уткин А. И. и др. Инвариантные продукционно-морфологические характеристики крон деревьев мелколиственных пород // Лесоведение. 1991. № 1. С. 31—41.

Розанова И. М. Круговорот зольных веществ и изменение физико-химических свойств выщелоченных черноземов под хвойными и широколиственными насаждениями // Тр. Лаборатории лесоведения АН СССР. М., 1960. Т. 1. С. 5—60.

Рокъянис Б. Ф. Продуктивность, запасы азота и зольных элементов в чистых еловых древостоях на моренных равнинах // Экология и защита леса. Л., 1981. Вып. 6. С. 4—12.

Рокъянис Б. Ф. Запасы фитомассы и химических элементов в еловых древостоях Латвийской ССР // Тр. Латв. СХА. Елгава, 1978. Вып. 143. С. 43—56.

Руднева Е. Н., Тонконогов В. Д., Дорохова К. Я. Круговорот зольных элементов и азота в ельнике-зеленомошнике северной тайги бассейна р. Мезень // Почвоведение. 1966. № 3. С. 14—26.

Себер Дж. Линейный регрессионный анализ. М.: Мир, 1980. 456 с.

Семечкина М. Г. Структура фитомассы сосняков. Новосибирск: Наука, 1978. 166 с.

Сидаравичюс Й. М. Изменение биологической продуктивности деревьев при различном уровне атмосферного загрязнения // Закономерности роста и производительности древостоев. Каунас, 1985. С. 228—230.

Сидорович Е. А., Рупасова Ж. А., Бусько Е. Г. Функционирование лесных фитоценозов в условиях антропогенных нагрузок. Минск: Наука и техника, 1985. 206 с.

Скрябин М. П. Некоторые особенности формирования осинового насаждения // Тр. Воронежск. гос. заповедника. Воронеж, 1957. Вып. 7. С. 27—51.

Смирнов В. В. Облиственные осинники Теллермановской рощи // Тр. Ин-та леса АН СССР. М., 1957. Т. 33. С. 183—196.

Смирнов В. В. Изменение сырораствующей органической массы в еловых и елово-лиственных древостоях средней тайги в связи с их возрастом // Тр. Ин-та леса и древесины. Красноярск, 1962. Т. 53. С. 103—125.

Смирнов В. В. Фитомасса в еловых древостоях // Биологическая продуктивность и круговорот химических элементов в растительных сообществах. Л., 1971а. С. 47—52.

Смирнов В. В. Органическая масса в некоторых лесных фитоценозах европейской части СССР. М.: Наука, 1971б. 362 с.

Смирнов В. В., Одинокова Н. С. Гидрологическая роль осинных лесов // ДАН СССР. 1954. Т. 99, № 5. С. 849—852.

Смирнов В. В., Семенова В. Г. Вес органической массы и зольных элементов в осиновом древостое подзоны южной лесостепи // Современные вопросы лесоведения и лесной биогеоценологии. М., 1974. С. 137—156.

Солодкий Ф. Т. О кормовом использовании древесной зелени // О зеленом веточном корме. Л.: ЛТА. 1958. Вып. 1(9).

Солодухин В. И., Жуков А. Я., Мажугин И. Н., Наркевич В. И. Методы изучения вертикальных сечений древостоев. Л., Ленинградский университет, 1976. 58 с.

Солодухин В. И., Жуков А. Я., Мажугин И. Н. и др. Возможности лазерной аэрофотосъемки профилей леса // Лесн. хоз-во. 1977б. № 10. С. 53—58.

Солодухин В. И., Кулясов А. Г., Утенков Б. И. и др. Съемка профиля кроны дерева с помощью лазерного дальномера // Лесн. хоз-во. 1977а. № 2. С. 71—73.

Солодухин В. И., Мошкалев А. Г., Мажугин И. Н. и др. Новый метод таксации // Лесоустройство, таксация и аэрометоды. Л., 1978. С. 39—43.

Солодухин В. И., Шевченко К. В., Мажугин И. Н., Бокова Т. К. Распределение деревьев по площади в связи с высотой древостоя, определяемой по лазерной профилограмме // Лесоустройство, таксация и аэрометоды. Л., 1985. С. 75—83.

Стадницкий Г. В. Экологизация лесоводства // Лесоводство, лесные культуры и почвоведение. Л., 1984. С. 48—54.

Столяров Д. П., Солодухин В. И. О лазерной таксации леса // Лесн. журн. 1987. № 5. С. 8—15.

Сухих В. И. Комплексный ресурсный и экологический мониторинг лесов // Лесн. хоз-во. 1995. № 1. С. 5—7.

Тамм Ю. А., Росс В. А. Надземная биомасса осины в насаждениях Эстонской ССР // Лесоводственные исследования. XV. Лесная селекция. Таллин, 1979. С. 81—108.

Тамм Ю. А., Росс В. А. Закономерности распределения надземной фитомассы осины в насаждениях Эстонской ССР // Лесоведение. 1980. № 1. С. 42—51.

Тепляков В. К. Экологические информационные системы и лесопользование // Лесоводство и лесоразведение. Обзорн. информ. 1994. Вып. 4. С. 1—24.

Терминологический словарь по специальности лесопользование и лесоразведение. М.: ЮНИФИР; ВНИИЦлесресурс, 1993. 80 с.

Терсков И. А., Терскова М. И. Рост одновозрастных древостоев. Новосибирск: Наука, 1980. 205 с.

Тиори Т., Фрай Дж. Проектирование структур баз данных. М.: Мир, 1985. Кн. 1. 287 с. Кн. 2. 320 с. (пер. с англ.).

Токмурзин Т. Х., Нурпейсов К. Н. Таблицы хода роста фитомассы древостоев сосны Прииртышья // Тр. КазСХИ. Алма-Ата, 1976. Т. 19, № 3. С. 127—136.

Томчук Р. И., Томчук Г. Н. Древесная зелень и ее кормовое использование. М.: Лесн. пром-сть, 1966. 241 с.

Тупыця Ю. Ю. К вопросу о новом научном направлении // Лесн. хоз-во. 1977. № 7. С. 17—20.

Тябера А. П. Принципы исследований строения древостоев по толщине деревьев // Лесн. журн. 1980. № 1. С. 5—9.

Тябера А. П. Географические закономерности производительности сосновых древостоев // Лесная таксация и лесопользование. Каунас, 1988. С. 139—147.

Урбах В. Ю. Биометрические методы. М.: Наука, 1964. 415 с.

Усольцев В. А. Вес кроны березы и осины в насаждениях Северного Казахстана // Вестн. с.-х. науки Казахстана. 1972. № 4. С. 77—80.

Усольцев В. А. Фитомасса крон спелых березово-осиновых насаждений в Северном Казахстане // Лесоведение. 1974. № 2. С. 86—88.

Усольцев В. А. Математическое моделирование прироста березы повислой // Лесоведение. 1979. № 2. С. 13—22.

Усольцев В. А. Моделирование структуры и динамики фитомассы древостоев. Красноярск: Изд-во Красноярск. ун-та, 1985а. 191 с.

Усольцев В. А. Принципы полифакториальной оценки биопродуктивности древостоев. Красноярск: ИЛиД СО АН СССР. 1985б. 48 с.

Усольцев В. А. Оценка показателей продуктивности в биогруппах разной густоты // Лесоведение. 1985в. № 2. С. 68—78.

Усольцев В. А. Динамика биологической продуктивности сосняков Казахского мелкосопочника // Лесная таксация и лесоустройство. Красноярск, 1987а. С. 97—104.

Усольцев В. А. О соотношении продуктивности древостоя и составляющих его биогрупп // Лесные экосистемы в условиях континентального климата. Красноярск, 1987б. С. 168—173.

Усольцев В. А. Рост и структура фитомассы древостоев. Новосибирск: Наука, 1988а. 253 с.

Усольцев В. А. Принципы и методика составления таблиц биопродуктивности древостоев // Лесоведение. 1988б. № 2. С. 24—33.

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

Усольцев В. А. Международный лесной мониторинг и базы данных о фитомассе лесов // Лесная таксация и лесоустройство. Красноярск, 1994. С. 42—49.

Усольцев В. А. Международный лесной мониторинг, глобальные экологические программы и базы данных о фитомассе лесов. Екатеринбург: Изд. 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. Исследование структуры и фитомассы лесного полога путем лазерного зондирования. Екатеринбург: Изд. УГЛТА, 1996. 109 с.

Усольцев В. А. Биоэкологические аспекты таксации фитомассы деревьев. Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 1997. 216 с.

Усольцев В. А., Бедарева О. М., Харитонов Б. Е., Успенский И. С. Опыт составления таблиц надземной фитомассы черносаксаульников // Лесная таксация и лесоустройство. Красноярск, 1993. С. 24—35.

Усольцев В. А., Кириллова В. В., Усольцев А. В. Оценка фитомассы по возрастным слоям кроны в естественных сосняках и культурах // Лесная таксация и лесоустройство. Красноярск, 1997. С. 24—36.

Усольцев В. А., Крепкий И. С., Прохоров Ю. А. Биологическая продуктивность естественных и искусственных сосняков Аман-Карагайского бора // Вестн. с.-х. науки Казахстана. 1985. № 8. С. 74—79.

Усольцев В. А., Логинов М. В. Модели надземной фитомассы для аэрокосмического зондирования сосновых насаждений // Леса Башкортостана: современное состояние и перспективы. Уфа, 1997. С. 67—68.

Усольцев В. А., Мельникова И. В., Нагимов З. Я., Тепкин С. В. Оценка массы крон сосны с использованием биологически обусловленных взаимосвязей // Лесн. журн. 1994а. № 2. С. 7—14.

Усольцев В. А., Мельникова И. В., Тепикин С. В. и др. Биологически обусловленные взаимосвязи для оценки массы крон пяти лесобразующих пород // Лесная таксация и лесоустройство. Красноярск, 1994б. С. 56—68.

Усольцев В. А., Мельникова И. В., Тепикин С. В., Нагимов З. Я. Ход роста надземной фитомассы сосняков и ельников Среднего Урала // Леса Урала и хоз-во в них. Екатеринбург, 1994в. Вып. 17. С. 155—169.

Усольцев В. А., Сальников А. А. Фитомасса крон березы Урало-Казахстанского региона: Принципы составления нормативов // Лесные экосистемы Тургайской впадины. Кустанай, 1993. С. 18—20.

Усольцев В. А., Сальников А. А. Новый метод оценки запасов органического углерода в лесных экосистемах // Экология. 1998. № 1. С. 3—13.

Усольцев В. А., Сальников А. А., Горбунова С. А., Нагимов З. Я. Принципы формирования баз данных о фитомассе лесов России и Швейцарии // Леса Урала и хоз-во в них. Екатеринбург, 1995б. Вып. 18. С. 198—227.

Усольцев В. А., Тепикин С. В., Мельникова И. В. и др. Оценка массы крон сосны и ели Среднего Урала на основе псевдоинвариантных взаимосвязей // Леса Урала и хоз-во в них. Екатеринбург, 1994г. Вып. 17. С. 112—127.

Усольцев В. А., Чернов Н. Н., Кириллова В. В., Тепикин С. В. Регрессионные модели и таблицы древесной зелени деревьев пихты сибирской // Леса Урала и хоз-во в них. Екатеринбург, 1994д. Вып. 17. С. 128—154.

Усольцев В. А., Усольцев А. В. Оценка предельных показателей продуктивности березовых древостоев по исходным данным составляющих их биогрупп // Лесн. журн. 1996а. № 4—5. С. 12—21.

Усольцев В. А., Усольцев А. В. Продуктивность хвои сосняков в связи с атмосферным загрязнением на допороговых уровнях // Влияние атмосферного загрязнения и других антропогенных и природных факторов на де стабилизацию состояния лесов Центральной и Восточной Европы. М., 1996б. С. 122—124.

Усольцев В. А., Усольцев А. В. Регрессионные модели для оценки надземной фитомассы при дистанционном зондировании лесов // Лесная таксация и лесоустройство. Красноярск, 1996в. С. 69—76.

Усольцев В. А., Усольцев А. В., Кириллова В. В. Региональная и видовая специфика зависимости массы хвои от дендрометрических показателей деревьев // Лесоведение. 1998. № 2. С. 55—68.

Усольцев В. А., Хоффман К. В., Нагимов З. Я., Мельникова И. В. Таблицы фитомассы кроны для одновозрастных ельников Швейцарии // Леса Урала и хоз-во в них. Екатеринбург, 1995а. Вып. 18. С. 181—197.

Уткин А. И. Исследования по первичной биологической продуктивности лесов в СССР // Лесоведение. 1970. № 3. С. 58—89.

Уткин А. И. Углеродный цикл и лесоводство // Лесоведение. 1995. № 5. С. 3—20.

Уткин А. И., Гульбе Т. А., Гульбе Я. И., Ермолова Л. С. Биопродуктивность лесных экосистем. Компьютерная база данных. М.: ЦЭПЛ РАН, 1994.

Уткин А. И., Дылис Н. В. Изучение вертикального распределения фитомассы в лесных биогеоценозах // Бюл. МОИП. Отд. биол. 1966. Т. 71, вып. 6. С. 79—91.

Уткин А. И., Рождественский С. Г., Гульбе Я. И. и др. Анализ продукционной структуры древостоев. М.: Наука, 1988. 240 с.

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

Ферстер Э., Ренц Б. Методы корреляционного и регрессионного анализа. М.: Финансы и статистика, 1983. 302 с. (Пер. с нем.).

Фимушин Б. С. Изменение текущего прироста сосновых древостоев под воздействием промышленных выбросов // Закономерности роста и производительности древостоев. Каунас, 1985. С. 254—257.

Фимушин Б. С. Зависимость текущего прироста сосновых древостоев от размеров ассимилирующей поверхности в зоне промышленных выбросов на Урале // Мониторинг лесных экосистем. Каунас, 1986. С. 247—248.

Фомин В. В. Морфофизиологическая оценка состояния сосновых молодняков в зоне действия атмосферных загрязнений Первоуральско-Ревдинского промышленного узла: Автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Екатеринбург: УГЛТА, 1998. 23 с.

Хальд А. Математическая статистика с техническими приложениями. М.: Иностр. литер., 1956. 664 с.

Ханбеков Р. И. Запасы надземной фитомассы в темнохвойно-лиственных молодняках Уфимского плато // Тез. докл. научн. конф. молодых ученых. Пушкино, 1972. Вып. 2. С. 23—29.

Ход роста основных лесообразующих пород Сибири. Красноярск: Изд. СТИ, 1975. Ч. 2. 170 с.

Храмов А. А., Валуцкий В. И. Лесные и болотные фитоценозы Восточного Васюганья (структура и биологическая продуктивность). Новосибирск: Наука, 1977. 221 с.

Чепурко Н. Л. Структура и годовой баланс биомассы в лесах Хибинского горного массива // Почвы и продуктивность растительных сообществ. М., 1972. Вып. 1. С. 94—116.

Чернявский Н. В. Органическая масса древостоев влажной буково-пихтовой сурамени Карпат // Тр. Харьковск. с.-х. ин-та. Харьков, 1976. Т. 225. С. 59—63.

Чертовской В. Г., Елизаров Ф. П., Семенов Б. А., Корняк В. С. Лесорастительные условия и продуктивность предтундровых лесов // Экология таежных лесов. Архангельск, 1978. С. 32—42.

Чесноков Б. В. Покуда не иссякнет кислород... // Газ. "Наука Урала". 1997. № 2.

Четвериков В. Н., Ревунков Г. И., Самохвалов Э. Н. Базы и банки данных. М.: Высш. шк., 1987. 248 с.

Четыркин Е. М. Статистические методы прогнозирования. М.: Статистика, 1977. 200 с.

Четыркин Е. М., Калихман И. Л. Вероятность и статистика. М.: Финансы и статистика, 1982. 319 с.

Швиденко А. З., Нильссон С. Динамика лесов России в 1961—1993 годах и глобальный углеродный бюджет // Лесная таксация и лесоустройство. Красноярск, 1997. С. 15—23.

Щербаков Н. М., Зайцева Н. Л. Биометрическая характеристика спелых ельников юга Карелии // Лесные растительные ресурсы южной Карелии. Петрозаводск, 1971. С. 22—40.

Яблоков А. В. Лесовосстановление и лесоразведение в России — новый подход // Экологические проблемы поглощения углекислого газа посредством лесовосстановления и лесоразведения в России. М., 1995. С. 5—6.

Яновский Л. Н., Моисеев В. С. Лесная таксация: Методические указания по учету древесной зелени. Л.: Изд-во ЛЛТА, 1985. 39 с.

Adams P. W. Estimating biomass in northern lower Michigan forest stands // Forest Ecol. Manage. 1982. V. 4. P. 275—286.

Alban D. H., Perala D. A., Schlaegel B. E. Biomass and nutrient distribution in aspen, pine and spruce stands on the same soil type in Minnesota // Can. J. For. Res. 1978. V. 8. P. 290—299.

Albrektson A. Biomass of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.). Amount, development, methods of mensuration. The University of Agricultural Sciences. Dept. of Silviculture. Report. Umea, Sweden. 1980a. N 2. 189 p. (Swed.).

Albrektson A. Relations between tree biomass fractions and conventional silvicultural measurements // Ecol. Bull. 1980b. N 32. P. 315—327.

Aldred A. H., Bonnor G. M. Application of airborne lasers to forest surveys // Inf. Rep. PI-X-51. Tech. Inf. & Dist. Center. Petawawa National Forestry Inst. Chalk River. Ontario, 1985. 62 p.

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 p.

Aldred A. H., Sayn-Wittgenstein L. Tropical tests of the forestry radar altimeter // Can. For. Serv. For. Mgmt. Inst. Inf. Rep. FMR-X-14. 1968a. 34 p.

Aldred A. H., Sayn-Wittgenstein L. Tropical tests of the forestry radar altimeter // Can. For. Serv. For. Mgmt. Inst. Inf. Rep. FMR-X-12. 1968b. 28 p.

Amateis R. L., Burkhart H. E., Greber B. J., Watson E. E. A comparison of approaches for predicting multi-product yields from weight-scaling data // Forest Sci. 1984. V. 30, N 4. P. 991—998.

Anderson T. W. An introduction to multivariate statistical analysis. N.-Y. John Wiley, 1958. 374 p.

Anderson T. W., Rubin H. Estimation of the parameters of a single equation in a complete system of stochastic equations // Ann. Math. Statist. 1949. V. 20. P. 46—63.

Ando T. Ecological studies on the stand density control in even-aged pure stands // Gov. For. Exp. Stn. Tokyo. Bull. 210. P. 1—153.

Ando T., Chiba K., Nishimura T., Tanimoto T. Temperate fir and hemlock forests in Shikoku // JIBP Synthesis. Primary productivity of Japanese Forests. Tokyo. 1977. V. 16. P. 213—245.

Andrasko K. J., Ahuja D. R., Winnett S. M., Tirpak D. A. Policy options for managing biomass burning to mitigate global climate change // Levine J. S. (ed.). Global biomass burning: Atmospheric, climatic, and biospheric implications. L.: The MIT Press, 1991. P. 445—456.

Armentano T. V., Ralston C. W. The role of temperate zone forests in the global carbon cycle // Can. J. For. Res. 1990. V. 10. P. 53—60.

Arp H., Griesbach J. C., Burns J. P. Mapping in tropical forests: a new approach using the laser APR // Photogramm. Eng. Remote Sens. 1982. V. 48, N 1. P. 91—100.

Attiwill P. M. Estimating branch dry weight and leaf area from measurements of branch girth in *Eucalyptus* // Forest Sci. 1962. V. 8, N 2. P. 132—141.

Avery T. E., Burkhart H. E. Forest measurements. 3rd ed. N.-Y.: McGraw-Hill, 1983. 331 p.

Baldwin V. C. Jr., Saucier J. R. Aboveground weight and volume of unthinned, planted longleaf pine on west gulf forest sites // U. S. For. Serv. Southern For. Experim. Station. Res. Paper SO-191. New Orleans, 1983. 25 p.

Basman R. L. A generalized classical method of linear estimation of coefficients in a structural equation // Econometrica. 1957. V. 25. P. 77—83.

Bella I. E., De France schi J. P. Biomass productivity of young aspen stands in western Canada // Environ. Can. Can. For. Serv. North. For. Res. Cent. Inf. Rep. NOR-X-219. 1980. 23 p.

Bella I. E., Jarvis J. M. High total productivity of a young aspen stand in Manitoba // Woodlands. 1967. V. 68. P. 2—3.

Birdsey R. A. Changes in forest carbon storage from increasing forest area and timber growth // Sampson R. N. and Hair D. (eds.). Forests and global warming. Washington, 1992.

Blake J., Somers G., Ruark G. Estimating limiting foliar biomass in conifer plantations from allometric relationships and self-thinning behavior // Forest Sci. 1991. V. 37, N 1. P. 296—307.

Bonnor G. M. Inventory of forest biomass in Canada. Can. For. Serv. Petawawa Nat. Forestry Inst. 1985. 63 p.

Borders B. E. Systems of equations in forest stand modeling // Forest Sci. 1989. V. 35, N 2. P. 548—556.

Borders B. E., Bailey R. L. A compatible system of growth and yield equations for slash pine fitted with restricted three-stage least squares // Forest Sci. 1986. V. 32, N 1. P. 185—201.

Braekke F. H. Growth in young *Pinus sylvestris* and *Picea abies* stands on drained and fertilized peatland // Medd. Norsk inst. skogforsk (Reports of the Norwegian Forest Research Institute). 1985. V. 38. P. 1—24.

Braekke F. H. Distribution and yield of biomass from young *Pinus sylvestris* and *Picea abies* stands on drained and fertilized peatland // Scand. J. For. Res. 1986. V. 1. P. 49—66.

Bray J. R., Dudkiewicz L. A. The composition, biomass and productivity of two *Populus* forests // Bull. Torrey Bot. Club. 1963. V. 90. P. 298—308.

Brender E. V. Growth predictions for natural stands of loblolly pine in the lower Piedmont. Ga. Forest Res. Council Rep. 1960. V. 6. 7 p.

Brown B. W. The identification problem in systems nonlinear in the variables // Econometrica. 1983. V. 51. P. 175—196.

Brown S. Present and potential role of forests in the global climate change debate // Unasylva 185. 1996. V. 47. P. 3—10.

Brown S. Estimating biomass and biomass change of tropical forests: a primer // FAO Forestry Paper. Rome. 1997. N 134. 55 p.

Brown S., Gillespie A. J. R., Lugo A. Biomass estimation methods to tropical forests with applications to forest inventory data // Forest Sci. 1989. V. 35. P. 881—902.

- Brunig E. F. On the limits of vegetable productivity in the tropical rain forest and the boreal coniferous forest // The J. of the Indian Bot. Society. 1967. V. 44. P. 314—322.
- Buckman R. E. Growth and yield of red pine in Minnesota // U. S. Dept. Agric. 1962. Tech. Bull. 1272. 50 p.
- Buell J. H. The prediction of growth in unevenaged timber stands on the basis of diameter distribution // Duke Univ. School For. 1945. Bull. 11. 70 p.
- Buften J. L. Laser altimeter measurements from aircraft and spacecraft // Proc. IEEE. 1989. V. 77. P. 463—477.
- Burger H. Holz, Blattmenge und Zuwachs. 1. Mitteilung: die Weymouthfoehre // Mitt. Schweiz. Anstalt Forstl. Versuchswesen. 1929. Bd 15. S. 243—292.
- Burger H. Holz, Blattmenge und Zuwachs. 13. Mitteilung: Fichten in gleichaltrigen Hochwald // Ibid. 1953. Bd 29. S. 38—130.
- Burkhardt H. E., Sprinz P. T. Compatible cubic volume and basal area projection equations for thinned old-field loblolly pine plantations // Forest Sci. 1984. V. 30. P. 86—93.
- Busse W. Baumkrone und Schafzuwachs // Forstwissenschaftl. Centralblatt. 1930, Bd 52. S. 310—318.
- Byrne J. C., Reed D. D. Complex compatible taper and volume estimation systems for red and loblolly pine // Forest Sci. 1986. V. 32. P. 423—443.
- Cannell M. G. R. World forest biomass and primary production data. L.: Academic Press Inc., 1982. 391 p.
- Cantiani M. Tavola di produttività della biomassa arborea // Ricerche Sperimentale di Dendrometria e di Auxometria. Fascicolo V. Prime indagini sulla biomassa dell' abete bianco. Istituto di Assesamento Forestale, Facolta di Agraria, Università degli studi di Firenze. Florence. 1974. P. 41—57.
- Carey M. L., O' Brien D. Biomass, nutrient content and distribution in a stand of Sitka spruce // Irish For. 1979. V. 1. P. 25—35.
- Cerny M. Biomass of *Picea abies* (L.) Karst. in Midwestern Bohemia // Scand. J. For. Res. 1990. V. 5. P. 83—95.
- Chappelle E. W., Williams D. L. Laser-induced fluorescence (LIF) from plant foliage // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 1987. V. GE-25, N 6. P. 726—736.
- Chappelle E. W., Williams D. L., Nelson R. F., McMurtrey J. E. Lasers may help in remote assessment of vegetation // Laser Focus World. 1989. N 6. P. 123—126.
- Chauhan N. S., Lang R. H. Boreal forest characterization for RADAR modeling // Proc. of the IGARSS'90 Symposium held at the Univ. of Maryland, College Park, MD. May 20—24, 1990. V. 1. P. 865—869.
- Clark A. III, Taras M. A. Biomass of shortleaf pine in a natural saw-timber stand in northern Mississippi // Res. Paper SE-146, U. S. F. S. Southeastern For. Experim. Stat. Asheville. NC. 1976. 32 p.
- 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 p.
- Clutter J. L. Compatible growth and yield models for loblolly pine // Forest Sci. 1963. V. 9, N 3. P. 354—371.

- Clutter J. L., Fortson J. C., Pienaar L. V. et al. Timber management: A quantitative approach. N.-Y.: John Wiley, 1983. 333p.
- Coile T. S. Soil productivity for southern pines. P. I. Shortleaf and loblolly pines // *Forest Farmer*. 1952. V. 11, N 7. P. 10—13.
- 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.
- Cottam G., Curtis J. T., Hale B. W. Some sampling characteristics of a population of randomly dispersed individuals // *Ecology*. 1953. V. 34, N 4. P. 741—757.
- Cragg J. G. Estimation and testing in time-series regression models with heteroscedastic disturbances // *J. Econ.* 1982. V. 20. P. 135—157.
- Cragg J. G. More efficient estimation in the presence of heteroscedasticity of unknown form // *Econometrica*. 1983. V. 51. P. 751—763.
- Crutzen P. J., Andreae M. O. Biomass burning in the tropics: Impact on atmospheric chemistry and biogeochemical cycles // *Science*. 1990. V. 250. P. 1669—1678.
- Curtis R. O. A method of estimation of gross yield of Douglas-fir // *Forest Sci. Monogr.* 1967a. N 13. 24 p.
- Curtis R. O. Height-diameter and height-diameter-age equations for second-growth Douglas-fir // *Forest Sci.* 1967b. V. 13, N 4. P. 365—385.
- Dahms W. G. Gross and net yield tables for lodgepole pine // *U. S. F. S.* 1964. Res. Pap. PNW-8. 14 p.
- DeAngelis D. L., Gardner R. H., Shugart H. H. Productivity of forest ecosystems studied during the IBP: The woodlands data set // Reichle D. E. (ed.). *Dynamic properties of forest ecosystems. IBP-23.* Cambridge: Univ. Press, 1981. P. 567—672.
- Delcourt H. R., West D. C., Delcourt P. A. Forests of the south eastern United States: Quantitative maps for aboveground woody biomass, carbon and dominance of major tree taxa // *Ecology*. 1981. V. 62. P. 879—887.
- Devillez F., Jain T. C., Jouret M.-F. et al. Biomasse, contenu en eau et productivite d'une pessiere en Naute-Ardenne. Comparaison avec une hetraie // *Bull. de la Classe des Sciences*. 1973. 5 serie. V. 59; Academie Royale de Belgique. Bruxelles. P. 480—491.
- Dietrich H. Untersuchungen zur Naehrstoffdynamik eines Fichtenbestandes // *Arch. Forstwesen*. 1968. Bd 17, H. 4. S. 391—412.
- Dixon R. K., Brown S., Houghton R. A. et al. Carbon pools and flux of global forest ecosystems // *Science*. 1994. V. 263. P. 185—190.
- Dixon R. K., Krankina O. N. Forest fires in Russia: Carbon dioxide emission to the atmosphere // *Can. J. For. Res.* 1993. V. 23. P. 700—705.
- Drew T. I., Flewelling J. W. Some recent Japanese theories of yield — density relationships and their application to Monterey pine plantations // *Forest Sci.* 1977. V. 23, N 4. P. 517—534.
- Droste zu Huelshoff B. F. Struktur und Biomasse eines Fichtenbestandes auf Grund einer Dimensionsanalyse an oberirdischen Baumorganen. Dissertation. Muenchen, 1969. 222 S.
- Dutta M. *Econometric methods.* South-Western: Cincinnati. OH. 1975. 382 p.
- Dyson F. J. Can we control the carbon dioxide in the atmosphere? // *Energy*. 1977. V. 2. P. 287—291.

EAFV, Ertragstafeln: Fichte. Eidgen. Anst. fuer das forstl. Versuchswesen. Birmensdorf. ZH. 1983.

Egan W. G. Photometry and polarization in remote sensing. N. Y. Elsevier, 1985.

Ehrlich R. L. Cash-futures price relationships for live beef cattle // Amer. J. Agric. Econ. 1969. V. 51. P. 26—40.

Eichhorn F. Ertragstafeln fuer die Weisstanne. Berlin, 1902.

Eichhorn F. Beziehungen zwischen Bestandeshoehe und Bestandesmasse // Allg. Forst-und Jagdzeitung. 1904. Bd 80. S. 45—49.

Ek A. R., Dawson D. H. Actual and projected growth and yield of *Populus* "Tristis-#1" under intensive culture // Can. J. For. Res. 1976. V. 6. P. 132—144.

Elfving B., Tegnammar L. Trends of tree growth in Swedish forests 1953—1992: An analysis based on sample trees from the National Forest Inventory // Scand. J. For. Res. 1996. V. 11. P. 26—37.

Ellenberg H., Mayer R., Schauer mann J. Oekosystem forschung — Ergebnisse des Sollingprojekts: 1966—1986. Stuttgart: Verlag Ulmer, 1986. S. 1—507.

Elston R. C., Grizzle J. E. Estimation of time response curves and their confidence bounds // Biometrics. 1962. V. 18. P. 148—159.

Enabnit D. Airborne laser hydrography // Proc. Rem. Sens. Symp. Oct. 29—31. Reston. VA. 1979. P. 71—72.

Energy from biomass. 1st E. C. Conference. (W. Palz et al., eds.). L.: Applied Science, 1981. 982 p.

Energy from biomass. 2nd E. C. Conference. (A. Strub et al., eds.). L.; N.-Y.: Applied Science, 1983. 1148 p.

Energy from biomass. 3rd E. C. Conference. (W. Palz et al., eds.). L.; N.-Y.: Applied Science, 1985. 1211 p.

Engle R. F. Autoregressive conditional heteroscedasticity with estimates of the variance of United Kingdom inflation // Econometrica. 1982. V. 50. P. 987—1007.

Ezekiel M. The cobweb theorem // Q. J. Econ. 1938. V. 53. P. 255—280.

Fahnestock G. R. Carbon input to the atmosphere from forest fires // Science. 1979. V. 204. P. 209—210.

Fair R. C. Specification, estimation and analysis of macroeconomic models. Cambridge: Harvard Univ. Press, 1984. 274 p.

Fasick C. A., Tyre G. L., Riley F. M. Weight-scaling tree-length timber for veneer logs, saw logs and pulpwood // Forest Prod. Journ. 1974. V. 24. P. 17—20.

Feger K. H., Raspe S., Schmid M., Zoettl H. W. Verteilung der Elementvorraeete in einem schlechtwuechsigem 100jaehrigen Fichtenbestand auf Buntsandstein // Forstwissenschaftliches Centralblatt. 1991. Bd 110. S. 248—262.

Fiedler F. Das Oekologische Messfeld der Sektion Forstwirtschaft der TU Dresden // Wissenschaftl. Zeitschrift der TU Dresden. 1987. Bd 36, H. 6. S. 225—234.

Fisher F. M. The identification problem in econometrics. N.-Y.: McGraw-Hill, 1966. 203 p.

Flury Ph. Untersuchungen ueber das Verhaeltniss der Reisigmasse zur Derbholzmasse // Mitt. Schweiz. Centralanstalt Forstl. Versuchswesen. 1892. Bd 2. S. 25—32.

- Fomby T. B., Hill R. C., Johnson S. R. Advanced econometric methods. N.-Y.: Springer-Verlag, 1984. 624 p.
- Ford E. D. High productivity in a polestage Sitka spruce stand and its relation to canopy structure // *Forestry*. 1982. V. 55, N 1. P. 1—17.
- Forest damage and air pollution. Report of the 1988 forest damage survey in Europe. Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution. Global Environment Monitoring System. Geneva. 1989. 87 p.
- Foerster E., Roenz B. Methoden der Korrelations- und Regressionsanalyse: Ein Leitfaden fuer Oekonomen. Berlin: Die Wirtschaft, 1979. 324 s.
- Fox K. A. Intermediate economic statistics. N.-Y.: John Wiley, 1968. 568 p.
- Freese F. Testing accuracy // *Forest Sci.* 1960. V. 6. P. 139—145.
- Frey T. IBP research at the Vooremaa forest ecology station // *Spruce Forest Ecosystem Structure and Ecology*. V. 1. (Estonian IBP Report, 11). Tartu, 1977. P. 21—36.
- Frey T., Koppel A. Puude taga on mets // *Horisont*. 1983. N 12. P. 13—18.
- Furnival G. M., Wilson R. W. Systems of equations for predicting forest growth and yield // *Statistical Ecol.* 1971. V. 3. P. 43—55.
- Gaines S. D., Denny M. W. The largest, smallest, highest, lowest, longest, and shortest: extremes in ecology // *Ecology*. 1993. V. 74, N 6. P. 1677—1692.
- Gallant A. R. Seemingly unrelated nonlinear regressions // *J. of Econometrics*. 1975. V. 3. P. 35—50.
- Gammon R. H., Sundquist E. T., Fraser P. J. History of carbon dioxide in the atmosphere // Trabalka J. R. (ed.). Atmospheric carbon dioxide and the global carbon cycle. U. S. Department of Energy, Oak Ridge National Laboratory. 1985. P. 25—62.
- Gerhardt E. Ueber Bestandes-Wachstumsgesetze und ihre Anwendung zur Aufstellung von Ertragstafeln // *Allg. Forst- und Jagdzeitung*. 1909. Bd 85. S. 117—128.
- Gevorkiantz S. R. The approach of under-stocked stands to normality // *J. Forestry*. 1934. V. 32. P. 487—488.
- Gholz H. L. Environmental limits on aboveground net primary production, leaf area and biomass in vegetation zones of the Pacific Northwest // *Ecology*. 1982. V. 63, N 2. P. 469—481.
- Global BIOME Program. U. S. Environmental Agency. Corvallis, 1991. 8 p.
- Goldberger A. S. Econometric theory. N.-Y.: John Wiley, 1964.
- Goldfeld S. M., Quandt R. E. Some tests for homoscedasticity // *J. Amer. Statist. Assoc.* 1965. V. 60. P. 539—547.
- Gregoire T. G. Generalized error structure for forestry yield models // *Forest Sci.* 1987. V. 33, N 2. P. 423—444.
- Guilkey D. K., Schmidt P. Estimation of seemingly unrelated regressions with vector autoregressive errors // *J. Amer. Statist. Assoc.* 1973. V. 68. P. 642—647.
- Gujarati D. Basic econometrics. N.-Y.: McGraw-Hill, 1978. 462 p.
- Guenther K. P., Dahn H.-G., Luedeker W. Remote sensing vegetation status by laser-induced fluorescence // *Remote Sens. Environ.* 1994. V. 47. P. 10—17.
- Guttenberg S., Fasick C. A. Scaling multiple products by weight // *Forest Prod. Journ.* 1973. V. 23. P. 34—37.

- Haavelmo T. The statistical implications of a system of simultaneous equations // *Econometrica*. 1943. V. 11, N 1. P. 1—12.
- Halvorsen R. Residential demand for electric energy // *Rev. Econ. and Stat.* 1975. V. 57. P. 12—18.
- Harlow A. A. A recursive model of the hog industry // *Agric. Econ. Res.* 1962. V. 14. P. 1—12.
- Hartig R. Wachstumsuntersuchungen an Fichten // *Forstlich-naturwissenschaftl. Zeitschrift*. 1896. Bd 5. S. 1—15, 33—45.
- Havas P., Kubin E. Structure, growth and organic matter content in the vegetation cover of an old spruce forest in Northern Finland // *Ann. Bot. Fennici*. 1983. V. 20. P. 115—149.
- Hellrigl B. Relazioni e tavole della biomassa arborea // *Ricerche Sperimentale di Dendrometria e di Auxometria. Fascicolo V. Prime indagini sulla biomassa dell'abete bianco*. Istituto di Assestamento Forestale, Facolta di Agraria, Universita degli studi di Firenze. Florence. 1974. P. 1—40.
- Hibler W. D. Characterization of cold regions terrain using airborne laser profilometry // *J. Glaciol.* 1975. V. 15, N 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. V. 1. P. 47—58.
- Hitchcock H. C. III. Converting traditional CFI data into biomass values: a case study // Frayer W. (ed.). *Forest Resource Inventories*. Colorado State Univ. Fort Collins. CO. 1979. V. II. P. 596—614.
- Hoeh H. F., Solberg B. Potential and economic efficiency of carbon sequestration in forest biomass through silvicultural management // *Forest Sci.* 1994. V. 40, N 3. P. 429—451.
- Hoge F. E., Swift R. N., Frederick E. B. Water depth measurement using an airborne pulsed neon laser system // *Appl. Optics*. 1980. V. 19. N 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. V. 22, N 19. P. 2291—3000.
- Holdgate M. Greenhouse gas balance in forestry // *Forestry*. 1995. V. 68, N 4. P. 297—302.
- Holmen H. Forest ecological studies on drained peat land in the province of Uppsala, Sweden. P. I—III // *Studia Forestalia Suecica*. 1964. V. 16. P. 1—236.
- Hornqvist R. Crown density of spruce trees related to needle biomass // *Forest Ecol. Manage.* 1993. V. 59. P. 225—235.
- Hornqvist R., Christiansen E. Gammelskog og grantorke // *Norsk Skogbruk*. 1979. V. 25. P. 21—23.
- Houghton J. T., Callander B. A., Varney S. K. (eds.). *Climate change 1992. The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment*. Cambridge: University Press, 1992. 200 p.
- Huber B. Aus der Biologie der Baumkrone // *Mitteil. der Deutschen Dendrologischen Gesellschaft*. 1927. Bd 38. S. 60—64.
- Hummel F. C., Palz W., Grassi G. (eds.). *Biomass forestry in Europe: A strategy for the future*. L., N.-Y.: Elsevier Applied Science, 1988. 600 p.
- Innes J. L. Forest condition and air pollution in the United Kingdom // *Forest Ecol. Manage.* 1992. V. 51. P. 17—27.

Innes J. L., Boswell R. C. Reliability, presentation and relationships among data from inventories of forest condition // Can. J. For. Res. 1990. V. 20. P. 790—799.

IUFRO International Guidelines for Forest Monitoring // IUFRO World Series. 1994. V. 5. P. 1—102.

Jacobs M. W., Cunia T. Use of dummy variables to harmonize tree biomass tables // Can. J. For. Res. 1980. V. 10, N 4. P. 483—490.

Jarvis P. G., Leverenz J. W. Productivity of temperate deciduous and evergreen forests // Physiological plant ecology. IV. Ecosystem processes: Mineral cycling, productivity and man's influences. Lange O. L. et al. (eds.). Berlin: Springer-Verlag, 1983. P. 233—280.

Johnson W. C., Sharpe D. M. The ratio of total to merchantable forest biomass and its application to the global carbon budget // Can. J. For. Res. 1983. V. 13. P. 372—383.

Johnston J. Econometric methods. N.-Y.: McGraw-Hill, 1963. 300 p.

Johnston J. Econometrics. N.-Y.: Marcel Dekker, 1972. 269 p.

Kalshoven J. E., Dabney Ph. W. An airborne laser polarimeter system (ALPS) for terrestrial physics research // Proc. of SPIE. 1988. V. 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. V. 1. P. 897—899.

Kandler O. No relationship between fir decline and air pollution in the Bavarian forest // Forest Sci. 1992. V. 38. P. 866—869.

Kaufmann M. R., Watkins R. K. Characteristics of high- and low-vigor lodgepole pine trees in old-growth stands // Tree Physiology. 1990. V. 7. P. 239—246.

Kauppi P. E., Mielikaeinen K., Kuusela K. Biomass and carbon budget of European forests, 1971 to 1990 // Science. 1992. V. 256. P. 70—74.

Keane M. G., Weetman G. F. Leaf area — sapwood cross-sectional area relationships in repressed stands of lodgepole pine // Can. J. For. Res. 1987. V. 17. P. 205—209.

Keller W. Einfacher ertragskundlicher Bonitaetschluessel fuer Waldbestaende in der Schweiz // Mitt. Eidgen. Anstalt Forstl. Versuchswesen. 1978. Bd 54, H. 1. S. 1—98.

Kelley J. S. Linear cross-equation constraints and the identification problem // Econometrica. 1975. V. 43. P. 125—140.

Kestemont P., Duvigneaud P., Paulet E. Biomasse et productivite primaire d'une pessiere a Mirwart (Plantation de *Picea abies*) // Productivite biologique en Belgique. Paris: Duculot, 1977. P. 161—176.

Kimmins J. P., Binkley D., Chatarpaul L., de Catanzaro J. Biogeochemistry of temperate forest ecosystems: Literature on inventories and dynamics of biomass and nutrients. Can. Forest Serv. PNFI. Inform. Rep. PI—X—47. 1985. 227 p.

Kimura M. Dynamics in vegetation in relation to soil development in northern Yatsugataki mountains // Japan. J. Bot. 1963. V. 18. P. 255—287.

Kira T., Shinozaki K. Intraspecific competition among higher plants. VII. Logistic theory of the C-G effect // J. Inst. Polytech. Osaka City Univ. 1956. V. 7 (ser. D). P. 35—72.

- 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.
- Kiviste A., Korjus H. Forest scenario modelling for optimal adaptation to possible climate change in Estonia // Proc. Conf. "Forest scenario modelling at landscape level". Wageningen; Netherlands, 1997. P. 1—10.
- Klapfenbauer A., Buchleitner E. Holzernte, Biomassen- und Nachstoffaustrag, Nachstoffbilanz eines Fichtenbestandes // Centralblatt fuer das gesamte Forstwesen. 1981. Bd 98, H. 4. S. 193—223.
- Klein L. R. Single equation vs. equation system methods of estimation in econometrics // Econometrics. 1960. V. 28, N 4. P. 867.
- Klein L. R. An introduction to econometrics. Englewood Cliffs. N.-Y.: Prentice-Hall, 1962.
- Koerper G. J., Richardson C. J. Biomass and net annual primary production regressions for *Populus grandidentata* on three sites in northern lower Michigan // Can. J. For. Res. 1980. V. 10. P. 92—101.
- Kok B. Photosynthesis, the pathway of energy // Plant biochemistry. J. Bonner and J. E. Varner (eds.). N.-Y.: Academic, 1965. P. 903—930.
- Kolchugina T. P., Vinson T. S. Equilibrium analysis of carbon pools and fluxes of forest biomes in the former Soviet Union // Can. J. For. Res. 1993a. V. 23. P. 81—88.
- Kolchugina T. P., Vinson T. S. Comparison of two methods to assess the carbon budget of forest biomes in the former Soviet Union // Water, Air and Soil Pollution. 1993b. V. 70. P. 207—221.
- 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. 711—714.
- Krabill W. B., Collins J. G., Link L. E. et al. Airborne laser topographic mapping results // Photogramm. Eng. Remote Sens. 1984. V. 50, N 6. P. 685—694.
- Krabill W. B., Martin C. F. Aircraft positioning using global positioning system carrier phase data // Navigation J. Inst. Navigation. 1987. V. 34, N 1. P. 1—21.
- Krajicek V., Vrbova M. Laser-induced fluorescence spectra of plants // Remote Sens. Environ. 1994. V. 47. P. 51—54.
- Kraeuchi N. Climate change and forest ecosystems — an overview // Schlaepfer R. (ed.). Long-term implication of climate change and air pollution on forest ecosystems. Progress report of the IUFRO Task Force "Forest, Climate and Air Pollution". Vienna, IUFRO; Birmensdorf, WSL (IUFRO World Series). 1993. V. 4. P. 53—76.
- Kraeuchi N., Xu D. Climate change effects on forests // Caring for the forest: Research in a changing world. IUFRO XX World Congress. Congress Report. Tampere, Finland. 1995. V. II. P. 34—45.
- Lakida P., Nilsson S., Shvidenko A. Estimation of forest phytomass for selected countries of the former European USSR // Working Paper WP-95-79. IIASA. Laxenburg; Austria. 1995. 33 p.
- Lakida P., Nilsson S., Shvidenko A. Forest phytomass and carbon in European Russia // Biomass and Bioenergy. 1997. V. 12, N 2. P. 91—99.

Le May V. M. Comparisons of fitting techniques for systems of forestry equations. Ph. D. Thesis. Vancouver: Univ. of British Columbia. 1988.

Le May V. M. MSLS: a linear least squares technique for fitting a simultaneous system of equations with a generalized error structure // *Can. J. For. Res.* 1990. V. 20. P. 1830—1839.

Levine J. S. (ed.). Global biomass burning: atmospheric, climatic and biospheric implications. L.: The MIT Press, 1991. 569 p.

Lieth H. (ed.). Die Stoffproduktion der Pflanzendecke / Vortraege und Diskussionsergebnisse des internationalen oekologischen Symposiums. Stuttgart: Gustav Fisher Verlag, 1962. 156 s.

Lieth H., Osswald D., Martens H. Stoffproduktion, Spross-Wurzelhaeltnis, Chlorophyllgehalt und Blattflaeche von Jungpappeln // *Mitt. Ver. Forstl. Standortskunde Forstpflanzenzuecht.* 1965. Bd 15. S. 70—74.

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. P. 1—51.

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.* 1975. N 725. P. 1—53.

Lyons E. H. Forest sampling with 70 mm fixed air-base photography from helicopters // *Photogrammetrica.* 1967. V. 22. P. 213—231.

MacKinney A. L., Chaiken L. E. Volume, yield and growth of loblolly pine in the mid-Atlantic coastal region // *Appalachian Forest Expt. Sta.,* 1939. Techn. Note 33. P. 1—30.

Maclean G. A., Krabill W. B. Gross-merchantable timber volume estimation using an airborne LIDAR system // *Can. J. Remote Sens.* 1986. V. 12, N 1. P. 7—18.

Maclean G. A., Martin G. L. Merchantable timber volume estimation using cross-sectional photogrammetric and densitometric methods // *Can. J. For. Res.* 1984. V. 14. P. 803—810.

Maddala G. S. *Econometrics.* N.-Y.: McGraw-Hill, 1977. 516 p.

Meyer W. H. Yields of even-ages stands of loblolly pine in northern Louisiana // *Yale School Forestry Bull.* 1942. V. 54. P. 1—58.

Monserud R. A., Onuchin A. A., Tchebakova N. M. Needle, crown, stem, and root phytomass of *Pinus sylvestris* stands in Russia // *Forest Ecol. Manage.* 1996. V. 82. P. 59—67.

Moore H. L. *Forecasting the yield and the price of cotton.* N. Y.: The Macmillan Company, 1917. 173 p.

Moser J. W., Hall O. F. Deriving growth and yield functions for uneven-aged forest stands // *Forest Sci.* 1969. V. 15, N 2. P. 183—188.

Murphy P. A., Beltz R. C. Growth and yield of shortleaf pine in the West Gulf region // *USDA Forest Serv.* 1981. Res. Paper SO-169. 15 p.

- Murphy P. A., Sternitzke H. S. Growth and yield estimation for loblolly pine in the West Gulf // USDA Forest Serv. 1979. Res. Paper SO-154. 8 p.
- Nadkarni N. M., Parker G. Creation of the canopy research network // Ecological Modelling. 1994. V. 71. P. 289.
- Nelson T. C. Current research in the South / Fourth Conf. South. Indus. Forest Manage. Proc. 1960. P. 52—60.
- Nelson T. C., Bennett F. A. A critical look at the normality concept // J. Forestry. 1965. V. 63, N 2. P. 107—109.
- Nelson R. F., Krabill W. B., Maclean G. A. Determining forest canopy characteristics using airborne laser data // Remote Sens. Environ. 1984. V. 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. V. 24. P. 247—267.
- Nelson R. F., Swift R. N., Krabill W. B. Using airborne lasers to estimate forest canopy and stand characteristics // J. Forestry. 1988b. V. 86. N 10. P. 31—38.
- Nielsen U. Forestry radar altimeter tests // Can. For. Serv. For. Mgmt. Inst. Internal Rep. FMR. 1970. 17 p.
- 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 p.
- Nielsen U. Description and performance of the forestry radar altimeter // Can. For. Serv. For. Mgmt. Inst. Inf. Rep. FMR-X-59. 1974a. 17 p.
- Nielsen U. The forestry radar altimeter tested in the tropics // Can. For. Serv. For. Mgmt. Inst. Inf. Rep. FMR-X-66. 1974b. 13 p.
- 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 2—8. 1978. Germany. Freiburg. 1978. 12 p.
- Nihlgård B. Plant biomass, primary production and distribution of chemical elements in a beech and planted spruce forest in South Sweden // Oikos. 1972. V. 23, N 1. P. 69—81.
- Nilsson A. Greenhouse Earth. Chichester: John Wiley, 1992.
- Nykvist N. The effect of clear felling on the distribution of biomass and nutrients // Systems analysis in northern coniferous forests— IBP workshop. Bulletins from the Ecological Research Committee. 1971. V. 14. P. 166—178.
- Olson J. S., Watts J. A., Allison L. J. Carbon in life vegetation of major world ecosystems. ORNL- 5862. Oak Ridge National Laboratory. Tennessee. 1983. 152 p.
- Oohata S., Oniishi C. Some discussions on tree form and dry matter production of a fir stands at Tanohara on Mount Ontake // Bull. Kyoto Univ. Forest. 1974. V. 46. P. 51—57.
- Ovington J. D. Flower and seed production. A source of error in estimating woodland production, energy flow and mineral cycling // Oikos. 1963. V. 14. P. 148—153.
- Palumets J. K. Analysis of phytomass partitioning in Norway spruce. VIII Scr. Botanica. Tatu: Univ. Press, 1991. 95 p.
- Parks R. W. Efficient estimation of a system of regression equations when disturbances are both serially and contemporaneously correlated // J. Amer. Statist. Assoc. 1967. V. 62. P. 500—509.

- Paterson S. S. The forest area of the world and its potential productivity. The Royal Univ. Sweden. Goeteborg. 1956. 216 p.
- Penner M. Canada's biomass inventory: deriving biomass from volume. Petawawa National Forestry Inst. IBFRA paper. 1997. 9 p.
- Perala D. A., Alban D. H. Biomass, nutrient distribution and litterfall in *Populus*, *Pinus* and *Picea* stands on two different soils in Minnesota // Proc. Impact of Intensive Harvesting on Forest Nutrient Cycling. SUNY. N. Y. Syracuse. 1979. P. 411.
- Peterson E. B., Chan Y. H., Cragg J. B. Aboveground standing crop, leaf area and caloric value in an aspen clone near Calgary, Alberta // Can. J. Bot. 1970. V. 48. P. 1459—1469.
- Peterson E. B., Levson V. M., Kabzems R. D. Upper limits of standing crop density for woody species in the prairie provinces // Environ. Can. Can. For. Serv. North. For. Res. Cent. Int. Rep. NOR-X-243. 1982. 55 p.
- Pienaar L. V., Shiver B. D. Basal area prediction and projection equations for pine plantations // Forest Sci. 1986. V. 32, N 3. P. 626—633.
- Pindyck R. S., Rubinfeld D. L. Econometric models and econometric forecasts. 2nd ed. N.-Y.: McGraw-Hill, 1981. 630 p.
- Pollard D. F. W. Above-ground dry matter production in three stands of trembling aspen // Can. J. For. Res. 1972. V. 2. P. 27—33.
- Raisch W. Bioelementverteilung in Fichten oekosystemen der Baerhalde (Suedschwarzwald) // Freiburger Bodenkundliche Abhandlungen. 1983. H. 11. S. 1—239.
- Ranson K. J., Smith J. A. Airborne SAR experiment for forest ecosystems research Maine 1989 experiment // Proc. of the IGARSS'90 Symposium held at the University of Maryland. College Park. MD. May 20—24. 1990. V. 1. P. 861—864.
- Reed D. D. Simultaneous estimation of tree taper and merchantable volume in loblolly pine // Va. J. Sci. (Abstr.). 1982. V. 33. P. 85.
- Reed D. D. Estimation procedures for analytically related growth and yield models // Proc. 1986 Soc. Amer. For. Nat. Conf. Soc. Amer. For. Bethesda. MD. 1987. P. 352.
- Reed D. D., Green E. J. Compatible stem taper and volume ratio equations // Forest Sci. 1984. V. 30. P. 977—990.
- Reineke L. H. Perfecting a stand-density index for even-aged forests // J. Agric. Res. 1933. V. 46, N 7. P. 627—638.
- Rempel 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.
- Richards F. L. A flexible growth function for empirical use // J. Experim. Bot. 1959. V. 10. P. 290—300.
- Ritchie J. C. Airborne laser altimeter measurements of landscape topography // Remote Sens. Environ. 1995. V. 53. P. 91—96.
- Ritchie J. C., Evans D. L., Jacobs D. et al. Measuring canopy structure with an airborne laser altimeter // Transactions of the ASAE. 1993a. V. 36, N 4. P. 1235—1238.
- Ritchie J. C., Evans D. L., Jacobs D. et al. Airborne laser measurements of forest and range canopies // Application of advanced information technologies: effective management of natural resources. Proc. of the 18—19 June 1993 Conference. Spokane. Washington. 1993b. P. 428—435.

- Robinson J. M. On uncertainty in the computation of global emissions from biomass burning // *Climate Change*. 1989. V. 14. P. 243—262.
- Roenz B., Foerster E. Regressions- und Korrelationsanalyse: Grundlagen, Methoden, Beispiele. Wiesbaden: Gabler, 1992. 370 s.
- Rosema A., Cecchi G., Pantani L. et al. Monitoring photosynthetic activity and ozone stress by laser induced fluorescence in trees // *Int. J. Remote Sensing*. 1992. V. 13, N 4. P. 737—751.
- Rothenberg T. J. Identification in parametric models // *Econometrica*. 1971. V. 39. P. 577—592.
- Row C., Guttenberg S. Determining weight-volume relationships for saw logs // *Forest Prod. Journ.* 1966. V. 16, N 5. P. 39—47.
- Saito H., Yamamoto T. Primary production in sample plantation of Norway spruce planted in lower/warmer part of cool-temperate zone // *Bull. of the Kyoto Prefectural University Forests*. 1980. V. 24. P. 34—48.
- Sampson R. N. Forestry opportunities in the United States to mitigate the effects of global warming // *Water, Air and Soil Pollution*. 1992. V. 64. P. 157—180.
- SAS Institute Inc. SAS/ETS User's Guide, Version 5 Ed. SAS Institute Inc.: Cary, NC. 1984. 738 p.
- Satoo T. A synthesis of studies by the harvest method: primary production relations in the temperate deciduous forests of Japan // *Ecol. Studies: Analysis and Synthesis*. N. Y.: Springer Verlag, 1970. V. 1. P. 55—72.
- Satoo T. Materials for the studies of growth in stands. VIII: Primary production relations in plantations of Norway spruce in Japan // *Bull. of the Tokyo University Forests*. 1971. V. 65. P. 125—142.
- Satoo T. Materials for the studies of growth in forest stands. XI: Primary production relations in a young plantation of *Abies sachalinensis* in Hokkaido // *Bull. of the Tokyo University Forests*. 1974. V. 66. P. 127—137.
- Satoo T., Kunugi K., Kumekawa A. Materials for the study of growth in stands. III: Amount of leaves and production of wood in aspen (*Populus davidiana*) second growth in Hokkaido // *Bull. of the Tokyo University Forests*. 1956. V. 52. P. 33—51.
- Saucier J. R., Clark A. III. Tables for estimating total tree and product weight and volume of major southern tree species and species groups // Southwide Energy Committee. Amer. Pulpwood Assn. Inc. Washington, DC. 1985. Rep. N 85-A-11. P. 1—59.
- Schlaepfer R. (ed.). Long-term implications of climate change and air pollution on forest ecosystems. Progress report of the IUFRO Task Force "Forest, Climate Change and Air Pollution". Vienna, IUFRO; Birmensdorf: WSL. IUFRO World Series, 1993. V. 4. 133 p.
- Schreier H., Loughheed J., Gibson J. R., Russel J. Calibrating an airborne laser profiling system // *Photogramm. Eng. Remote Sens.* 1984. V. 50, N 11. P. 1591—1598.
- Schreier H., Loughheed J., Tucker C., Leckie D. Automated measurements of terrain reflection and height variations using an airborne infrared laser system // *Int. J. Remote Sens.* 1985. V. 6, N 1. P. 101—113.
- Schumacher F. X. A new growth curve and its application to timber-yield studies // *J. Forestry*. 1939. V. 37. P. 819—820.
- Schumacher F. X. Volume-weight ratios of pine logs in the Virginia — North Carolina coastal plain // *J. Forestry*. 1946. V. 44. P. 583—586.

- Schumacher F. X., Coile T. S. Growth and yield of natural stands of the southern pines. Durham, NC.: T. S. Coile. Inc. 1960. 115 p.
- Schweizerisches Landesforstinventar. Ergebnisse der Erstaufnahme 1982—1986. Eidgen. Anstalt fuer das forstl. Versuchswesen. Berichte. 1988. N 305. 375 s.
- Sedjo R. A. Temperate forest ecosystems in the global carbon cycle // *Ambio*. 1992. V. 2. N 4. P. 274—277.
- Seshamani R. A satellite-borne laser altimeter for digital terrain modeling // *Int. J. Remote Sens.* 1993. V. 14. P. 3133—3135.
- Sharp D. D., Lieth H., Whigham D. Assessment of regional productivity in North Carolina // H. Lieth, R. H. Whittaker (eds.). *Primary productivity of the biosphere*. N.-Y.: Springer. Ecological Studies, 1975. V. 14. P. 131—146.
- Shepashenko D., Shvidenko A., Nilsson S. Phytomass (live biomass) and carbon of Siberian forests // *Biomass and Bioenergy*. 1998. V. 14. N 1. P. 21—31.
- Shinozaki K., Yoda K., Hozumi K., Kira T. A quantitative analysis of plant form — the pipe model theory // *Jap. J. Ecol.* 1964. V. 14, N 3. 1: Basic analysis. P. 97—105; N 4. 2: Further evidence of the theory and its application in forest ecology. P. 133—139.
- Shvidenko A. Z., Nilsson S., Roshkov V. Status and possibilities for increased influences of the terrestrial biota on the carbon budget in the territories of the former USSR // *Proc. Conf. "Global Climate Change: Science, Policy and Mitigation Strategies"*. Phoenix, Arizona. 1994. P. 923—939.
- Simmons E. M., Schnur G. L. Effect of stand density on mortality and growth of loblolly pine // *J. Agric. Res.* 1937. V. 54. P. 47—58.
- Smith D. V. Timber volume estimation using Kelsh plotter and densitometry. Ph. D. Thesis. State University of New York at Syracuse (Univ. microforms order N 69—807). 1969. 182 p.
- Smith J. H. G. Methods for use of timber inventory data to estimate average and upper limits to growth and yield of biomass // Working Party on the Mensuration of the Forest Biomass. IUFRO S4.01. Mensuration, Growth and Yield. June 22. Norway. Oslo. 1976. P. 163—174.
- Solomon A. M., Trabalka J. R., Reichle D. E., Voorhees L. D. The global cycle of carbon // J. R. Trabalka (ed.). *Atmospheric carbon dioxide and the global carbon cycle*. U. S. Department of Energy. Oak Ridge National Laboratory. 1985. P. 1—13.
- Spurr S. H. *Forest inventory*. N.-Y.: Ronald Press, 1952. 476 p.
- Spurr S. H. *Photogrammetry and photo-interpretation*. 2nd ed. N.-Y.: Ronald Press, 1960. 472 p.
- Srivastava V. K., Giles D. E. A. Seemingly unrelated regression equation models. N.-Y.: Marcel Dekker, 1987. 256 p.
- Stahelin R. Thinning even-aged loblolly and slash pine stands to specified densities // *J. Forestry*. 1949. V. 47. P. 538—540.
- Sullivan A. D. Estimation of simultaneous forest growth and yield parameters from remeasurement plot data. Ph. D. Thesis. Univ. Ga. Athens. 1969. 45 p.
- Sullivan A. D., Clutter J. L. A simultaneous growth and yield model for loblolly pine // *Forest Sci.* 1972. V. 18, N 1. P. 76—86.
- Summers R. A capital intensive approach to the small sample properties of various simultaneous equation estimators // *Econometrica*. 1965. V. 33. P. 1—41.

Swindel B. F. On the estimation of forest growth parameters in a linear model with correlated errors. Ph. D. Thesis, North Carolina State Univ., Univ. Microfilms. Ann. Arbor. Mich. 1968. 114 p.

Tadaki Y., Hatiya K., Miyauchi H. Studies on the production structure of forest. XII. Primary productivity of *Abies veitchii* in the natural forests at Mt. Fuji // J. Japan. For. Soc. 1967. V. 49. P. 421—428.

Tadaki Y., Hatiya K., Tochiaki K. et al. Studies on the production structure of forest. XVI. Primary productivity of *Abies veitchii* forests in the subalpine zone of Mt. Fuji // Bull. of the Government Forest Experiment Station. Tokyo. 1970. V. 229. P. 1—20.

Tadaki Y., Sato A., Sakurai S. et al. Studies on the production structure of forest. XVII. Structure and primary production in subalpine "dead tree strips" *Abies* forest near Mount Asahi // Japan. J. Ecol. 1977. V. 27. P. 83—90.

Tadaki Y., Shidei T. Studies on the competition of forest trees. II. The thinning experiment on small model stand of Sugi (*Cryptomeria japonica*) seedlings // J. Japan. For. Soc. 1959. V. 41. P. 341—349.

Takahashi K. (ed.). Interim report of joint research project "Carbon storage and carbon dioxide budget in forest ecosystems" between Japan and Russia. Forestry and Forest Product Research Inst. Sapporo; Yakutsk Inst. of Biology. Russia. 1994. 105 p.

Tans P. P., Fung I. Y., Takahashi T. Observational constraints on the global atmospheric CO₂ budget // Science. 1990. V. 247. P. 1431—1438.

Taras M. A., Clark A. III. Aboveground biomass of loblolly pine in a natural, uneven-aged sawtimber stand in central Alabama // Tappi. 1975. V. 58, N 2. P. 103—105.

Theil H. Repeated least-squares applied to complete equation systems. The Hague: The Central Planning Bureau. The Netherlands. 1953.

Thomasius H. O. Untersuchungen ueber die Brauchbarkeit einiger Wachstumsgrößen von Bäumen und Beständen fuer die quantitative Standortsbeurteilung // Arch. Forstwesen. 1963. Bd 12, H. 12. S. 1267—1323.

Thomasius H. O. Kritik der Wachstumsfunktion von G. Backman // Wiss. Z. Techn. Univ. Dresden. 1965. Bd 14, N 4. S. 1019—1031.

Thomasius H. O. Modell des gleichaltriges Reinbestandes // Techn. Univ. Dresden. Wissenschaftl. Tagung der Sektion Forstwirtschaft. II. Vortraege. Dresden und Tharandt. 1978. S. 122—148.

Tooma S. G., Tucker W. B. Statistical comparison of airborne laser and stereo photogrammetric sea ice profiles // Remote Sens. Environ. 1973. V. 2, N 4. P. 261—272.

Trangmar B. B., Yost R. S., Uehara G. Application of geostatistics to spatial studies of soil properties // Advances in Agronomy. N.-Y.: Academic Press, 1985. P. 45—94.

Turnbull K. J. Population dynamics in mixed forest stands. A system of mathematical models of mixed stand growth and structure. Ph. D. Thesis. Univ. Washington. Seattle. WA. 1963.

Usoltsev V. A. Recurrent regression system as a base for tree and stand biomass tables // Harvesting and utilization of tree foliage. IUFRO Project Group P3.05-00 Meeting. Riga. 1989. P. 217—245.

Usoltsev V. A. Mensuration of forest biomass: Modernization of standard base of forest inventory // XIX World Congress Proc. IUFRO. Division 4. Canada. Montreal. 1990. P. 79—92.

Usoltsev V. A., Hoffmann C. W. A preliminary crown biomass table for even-aged *Picea abies* stands in Switzerland // Forestry. 1997a. V. 70, N 2. P. 103—112.

Usoltsev V. A., Hoffmann C. W. Combining harvest sample data with inventory data to estimate forest biomass // Scand. J. For. Res. 1997b. V. 12. P. 273—279.

Usoltsev V. A., Melnikova I. V., Nagimov Z. Ya. et al. Crown biomass estimation based on the biologically conditioned relationships in Scots pine // Advancement in Forest Inventory and Forest Manage. Sci. Proc. IUFRO Seoul Conf. 1993. P. 218—226.

Usoltsev V. A., Vanclay J. K. Biomass growth and structure of pine plantations and natural forests on dry steppe in Kazakhstan // Growth and yield estimation from successive forest inventories. Proc. from the IUFRO Conf. Forskningsserien. 1993. N 3. P. 267—281.

Usoltsev V. A., Vanclay J. K. Biomass equations for pine and birch in the Ural—Kazakhstan region // Forest Ecol. Manage. 1999 (in press).

Van Deusen P. C. Simultaneous estimation with a squared error loss function // Can. J. For. Res. 1988. V. 18. P. 1093—1096.

Vinš B., Šika A. Biomasa nadzemnich casti vzorniku smrku // Prace VULHM. 1977. V. 51. P. 125—150.

Vinš B., Šika A. Biomasa smrkoveho porostu v chlumni oblasti (Biomass of Norway spruce forest in hilly region) // Prace VULHM. 1981. V. 59. P. 83—99.

Visser H., Molenaar J. Estimating trends and stochastic response functions in dendroecology with an application to fir decline // Forest Sci. 1992. V. 38. P. 221—234.

Vyskot M. Aerial biomass of silver fir (*Abies alba* Mill.) // Acta Universitatis Agriculturae (Brno). Ser. C. 1972. V. 41, N 3—4. P. 243—294.

Vyskot M. Root biomass of silver fir (*Abies alba* Mill.) // IBID. 1973. V. 42, N 3—4. P. 215—261.

Vyskot M. Bilance biomasy hlavnich lesnich drevin // Lesnictvi. 1980. V. 26, N 10. P. 849—882.

Vyskot M. Biomass of the tree layer of a spruce forest in the Bohemian Uplands. Praha: Academia, 1981. 397 p.

Vyskot M. Aboveground biomass of adult Norway spruce // Prirodoved. Pr. Ust. CSAV. Brne. 1990. V. 34, N 7. P. 3—34.

Waring R. H. Characteristics of trees predisposed to die // BioScience. 1987. V. 37. P. 569—574.

Waring R. H., Emmingham W. H., Gholz H. L., Grier C. C. Variation in maximum leaf area of coniferous forests in Oregon and its ecological significance // Forest Sci. 1978. V. 24. P. 131—140.

Waring R. H., Thies W. G., Muscato D. Stem growth per unit of leaf area: a measure of tree vigor // Forest Sci. 1980. V. 26. P. 112—117.

Warren W. G. Record of preplanned and spontaneous discussions concerning the paper by Furnival G. M. and Wilson R. W. "Systems of equations for predicting forest growth and yield" // Statistical Ecol. 1971. V. 3. P. 56—57.

- Warrick A. W., Myers D. E., Nielsen D. R. Geostatistical methods applied to soil science // Methods of soil analysis. A. Klute (ed.). The 2nd ed. Soil Science Soc. Am. Inc. Madison, WI. 1986. P. 53—82.
- Waugh F. W. Cobweb models // J. Farm. Econ. 1964. V. 46. P. 732—750.
- Weck J. Klimaindex und forstliches Produktionspotential. Ein weiterer Beitrag zum Problem ihrer Korrelation // Forstarchiv. 1960. Bd 31, H. 7. S. 101—104.
- Weihe J. Massen- und Staerkenwachstums der Fichte als Funktion des Hoehenwachstums // Allgemeine Forst- und Jagdzeitung. 1961. Bd 132, H. 5. S. 131—136.
- Wenger K. F., Evans T. C., Lotti T. et al. The relation of growth to stand density in natural loblolly pine stands // U. S. Forest Serv. Southeast. Forest Expt. Sta. 1958. N 97. 10 p.
- West P. W. Density management diagrams and thinning practice in monoculture // Forestry — Satisfying National and Regional Needs. The 2nd Joint Conf. of the Inst. of Foresters of Australia and New Zealand Inst. of Foresters Inc. Hobart, Tasmania. 1985. P. 163—168.
- West P. W., Wells K. F. Estimation of leaf weight of standing trees of *Eucalyptus regnans* // Can. J. For. Res. 1990. V. 20. P. 1732—1738.
- White H. A heteroscedasticity-consistent covariance matrix estimator and a direct test for heteroscedasticity // Econometrica. 1980. V. 48. P. 817—838.
- White J. Demographic factors in populations of plants // Demography and evolution in plant populations. (O. T. Solbrig, ed.). Botanical Monographs. Oxford: Blackwells, 1980. V. 15. P. 21—48.
- White J. The allometric interpretation of the self-thinning rule // J. Theor. Biol. 1981. V. 89. P. 475—500.
- Wickens M. R. The consistency and efficiency of generalized least squares in simultaneous equation systems with autocorrelated errors // Econometrica. 1969. V. 37. P. 651—659.
- Winjum J. K., Dixon R. K., Schroeder P. E. Forest management and carbon storage: an analysis of 12 key forest nations // Water, Air and Soil Pollution. 1993. V. 70. P. 239—257.
- Wong C. S. Atmospheric input of carbon dioxide from burning wood // Science. 1978. V. 200. P. 197—200.
- Woodwell G. M., Whittaker R. H., Reiners W. A. et al. The biota and the world carbon budget // Science. 1978. V. 199. P. 141—146.
- Yamamoto T., Sanada E. Nutrients uptake by planted Todo-fir (*Abies sachalinensis* Mast.), nutrient circulation and a change of soil in forest land // Bull. Government. Forest Experim. Sta. Tokyo. 1970. V. 229. P. 93—121.
- Yoda K., Kira T., Ogawa H., Hozumi K. Intraspecific competition among higher plants. XI. Self-thinning in over-crowded pure stands under cultivated and natural conditions // J. Biol. Osaka Sity Univ. 1963. V. 14. P. 107—129.
- Yoshimura K. Growth and biomass of Norway spruce forest in Ashu experimental forest // Bull. Kyoto Univ. For. 1967. V. 39. P. 27—34.
- Young H. E. A balanced view of the forest as a source of energy material // Proc. "Joint IEA/IUFRO Forestry Energy Workshop" in Garpenberg. Sweden. October 2. 1980. Information from project Forestry Energy. 1981. N 20. P. 59—63.

Электронный архив УГЛТУ

Young H. E., Carpenter P. N., Altenberger R. A. Preliminary tables of some chemical elements in seven tree species in Maine // Maine Agr. Exp. Sta. Tech. Bull. 1965. N 20.

Young H. E., Guinn V. P. Chemical elements in complete mature trees of seven species in Maine // Tappi. 1966. V. 49. P. 190—197.

Young H. E., Strand L., Altenberger R. A. Preliminary fresh and dry weight tables for seven tree species in Maine // Maine Agr. Exp. Sta. Tech. Bull. 1964. N 12.

Zavitkovski J. Projected and actual biomass production of 2- to 10-year-old intensively cultured *Populus* "Tristis#1" // Intensive plantation culture: 12 years research. USDA, Forest Service. General Tech. Report NC-91. 1983. P. 72—76.

Zellner A. An efficient method of estimating seemingly unrelated regressions and tests for aggregation bias // J. Amer. Statist. Assoc. 1962. V. 57. P. 348—368.

Zellner A., Theil H. Three-stage least squares: simultaneous estimation of simultaneous equations // Econometrica. 1962. V. 30. P. 54—78.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Электронный архив УГЛТУ

ЭЛЕКТРОННЫЙ АРХИВ УГЛТУ

Приложение 1

Экспериментальные данные фитомассы сосняков Северного Казахстана (данные В. А. Усольцева о надземной и И. С. Кренкого — о подземной фитомассе в абсолютно сухом состоянии)

Состав	А, лет	N/1000, экз/га	D, см	H, м	V, м ³ /га	Фитомасса, т/га			
						стволов	ветвей	хвои	корней < 1 мм всего
Культуры сосны Тургайского прогиба, Аман-Карагайский бор									
<i>Сухие условия произрастания</i>									
10С	5	13,4	—	0,8	2	0,63/0,20	0,74/0,70	2,3	—
10С	11	10,5	3,0	2,8	20	6,30/1,62	3,09/2,00	4,5	—
10С	12	19,3	3,5	3,4	51	17,8/4,03	5,30/3,29	12,9	—
10С	14	9,7	3,8	3,3	31	11,0/3,08	5,28/2,89	9,6	—
10С	15	8,4	4,1	3,7	41	14,3/3,93	3,19/1,86	6,4	14,7
10С	21	5,2	6,1	4,8	47	18,0/4,00	5,02/2,32	4,7	—
10С	21	3,2	7,7	5,5	54	19,2/4,00	7,53/3,47	6,4	—
10С	25	8,6	7,0	7,5	149	55,5/9,79	6,26/2,98	5,9	—
<i>Свежие условия произрастания</i>									
10С	9	11,5	2,5	2,6	16	5,2/1,23	1,80/1,19	4,8	—
10С	13	9,2	4,4	4,3	44	14,2/2,63	5,04/2,87	7,4	—
10С	19	4,4	7,9	6,1	88	33,6/6,32	8,43/4,37	8,6	—
10С	20	6,3	7,0	7,0	100	34,6/5,82	6,04/2,86	6,3	—
10С	22	4,9	8,1	7,4	130	45,6/5,90	7,35/3,09	8,0	19,8
10С	50	1,81	16,0	16,4	262	98,6/9,03	8,96/2,65	3,0	—
<i>Влажные условия произрастания</i>									
10С	10	18,9	3,3	4,0	50	17,6/3,63	3,58/1,94	6,0	—
10С	19	7,0	9,0	9,5	233	81,2/11,4	14,0/5,08	12,8	—
10С	22	5,2	9,4	9,1	172	61,2/7,94	8,17/3,36	8,0	—
10С	22	2,6	12,0	10,0	147	51,2/5,94	16,7/6,52	11,3	—

Состав	А, лет	N/1000, экз/га	D, см	H, м	V, м ³ /га	Фитомасса, т/га					
						стволов	ветвей	хвои	корней всего < 1 мм		
10С	22	3,9	10,8	9,0	182	61,1/6,40	13,8/5,04	11,5	48,5	35,7	
10С	22	4,2	9,6	9,2	166	60,5/6,88	15,1/6,41	10,8	—	—	
10С	23	3,8	11,0	10,2	220	76,3/10,1	15,1/5,45	18,6	59,6	26,4	
10С	24	5,3	10,5	11,4	295	106/12,1	21,1/8,58	16,1	48,4	38,1	
10С	26	6,1	8,8	9,9	192	68,6/10,4	8,44/3,80	5,4	50,1	32,4	
Естественные сосняки Тургайского прогиба, Аман-Карагайский бор											
<i>Очень сухие условия произрастания</i>											
10С	20	12,3	3,3	3,4	36	13,5/3,08	3,14/2,09	4,4	24,7	20,1	
10С	42	56,3	2,5	4,9	114	56,4/12,2	2,94/2,08	3,5	—	—	
10С	42	19,1	5,2	8,8	238	104/15,5	3,71/2,06	4,2	72,4	43,1	
<i>Сухие условия произрастания</i>											
10С	13	82,4	1,7	2,7	63	25,4/5,26	2,32/1,39	7,1	—	—	
10С	20	44,4	3,0	4,6	111	47,1/9,30	5,38/3,17	7,8	—	—	
10С	20	19,8	3,6	4,3	63	24,0/5,28	4,81/3,22	9,0	—	—	
10С	22	43,8	3,3	5,6	142	56,5/12,8	3,97/2,33	8,4	27,8	19,3	
10С	32	19,9	5,1	7,6	199	78,0/14,1	3,56/1,85	7,6	—	—	
10С	110	1,35	22,0	21,4	558	213/15,7	12,2/5,71	5,4	—	—	
<i>Свежие условия произрастания</i>											
10С	40	9,62	8,3	12,8	370	147/18,0	4,34/1,77	3,6	—	—	
10С	40	3,20	12,6	13,8	241	90,1/10,5	6,37/2,48	4,6	—	—	
<i>Влажные условия произрастания</i>											
10С	40	2,05	15,2	14,2	277	106/10,8	11,0/5,04	7,8	136,4	90,4	
10С	40	2,27	17,0	17,8	423	150/13,0	14,4/4,78	10,0	—	—	

Естественные сосняки Тургайского прогиба, Ара-Карагайский бор

Очень сухие условия произрастания									
10С	27	37,7	3,2	5,7	113	47,9/8,86	2,94/2,19	5,1	—
	25	19,3	4,3	6,8	123	46,0/7,90	4,93/2,88	4,8	—
10С	31	26,2	4,0	7,8	163	70,3/10,2	4,85/2,99	3,8	—
10С	35	9,12	7,7	10,4	255	95,7/10,5	8,57/4,53	4,4	—
10С	54	2,39	12,8	15,3	232	90,9/8,21	9,37/3,91	5,8	—
10С	65	2,14	13,3	14,8	202	75,1/5,98	8,01/3,69	5,2	—
10С	68	3,95	11,6	14,3	315	110/11,1	8,67/3,27	6,5	—
10С	102	0,53	27,0	23,0	327	139/8,63	13,5/5,02	3,9	—
10С	101	0,40	26,4	21,0	227	78,5/5,67	11,4/4,00	3,9	—
10С	104	0,52	26,8	22,0	292	112/7,74	15,6/4,65	4,0	—
10С	106	1,21	20,0	20,5	440	174/9,31	9,07/3,82	4,4	—
<i>Свежие условия произрастания</i>									
10С	31	12,8	6,9	9,5	247	89,8/11,8	7,64/3,76	5,9	—
10С	35	6,95	9,0	11,8	276	98,1/10,7	7,59/3,57	4,3	—
10С	70	0,87	22,4	21,6	339	130/8,61	13,0/4,96	5,4	—
Естественные сосняки Казахского мелкосопочника, Боровской лесной оазис									
<i>Сухие условия произрастания</i>									
7СЗБ	66	1,55	15,3	15,0	235	105/7,60	17,5/8,05	6,4	—
10С	90	2,22	17,2	16,2	262	104/4,90	16,9/5,07	2,5	—
10С	90	1,33	16,5	17,7	258	102/6,06	18,4/7,36	4,6	—
10С	92	2,47	13,8	14,0	256	102/6,86	11,0/4,4	4,4	—
<i>Свежие условия произрастания</i>									
10С	61	1,58	20,4	22,8	413	148/11,4	20,8/7,93	6,0	—
10С	64	1,06	23,5	23,4	469	153/11,7	20,1/7,67	6,7	—
10С	92	1,11	23,2	24,0	533	229/9,21	24,4/7,32	7,1	—

Примечание. Здесь и в табл. 2—6: в числителе — всего, в знаменателе — коры.

Приложение 2

Экспериментальные данные надземной фитомассы сосняков Среднего Урала в абсолютно сухом состоянии

Состав	А, лет	N/1000, экз/га	D, см	H, м	V, м³/га	Фитомасса, т/га		
						стволов	ветвей	хвои
Южная тайга (данные В. В. Демеева и И. В. Мельниковой)								
Сосняк разнотравный								
5С4Б1Лц	50	3,480	12,4	16,0	269	104/7,26	8,97/3,49	7,69
9С1Б	75	1,131	22,8	22,6	385	143/7,94	15,9/4,78	3,30
9С1Б	79	0,956	24,2	25,1	434	168/8,63	13,3/3,82	4,50
8С2Б	83	0,825	28,8	24,0	473	207/8,10	26,5/6,00	8,00
Сосняк ягодниковый								
9С1Б	25	13,944	4,9	6,3	117	44,7/5,18	11,3/5,30	5,70
9С1Б	27	8,140	5,9	8,2	132	41,6/4,30	4,50/1,90	3,90
10С	31	10,200	6,9	9,3	205	71,0/7,50	9,20/3,90	6,20
8С2Б	41	5,754	8,9	12,5	222	88,1/7,85	9,87/4,80	5,42
10С	45	6,200	8,3	12,1	249	95,2/7,80	8,80/4,00	5,30
7С3Б	46	4,710	10,6	14,0	324	133/10,0	13,9/5,57	7,36
10С	46	3,264	10,1	12,0	174	51,2/5,86	11,6/4,65	7,20
8С2Б	50	3,695	11,8	16,7	313	127/7,40	12,2/4,79	3,35
7С3Б	52	2,600	12,6	15,7	294	105/10,1	11,0/3,70	5,00
7С3Б	52	3,518	11,1	15,0	253	111/5,88	8,28/3,34	4,47
9С1Б	77	1,422	18,7	22,1	370	156/9,20	17,7/5,80	6,70
9С1Лц	82	0,946	23,2	22,2	390	148/7,04	13,7/4,05	4,25
9С1Б	82	0,706	24,3	23,5	353	140/8,50	10,2/3,50	4,90
10С	94	1,188	21,3	20,6	416	166/9,60	11,5/3,40	3,60
10С	106	0,637	28,3	24,0	414	158/7,90	20,5/4,30	5,80
9С1Б	115	0,616	28,5	24,6	381	149/8,20	10,5/3,10	3,60
Сосняк брусничный								
8С2Б	37	9,464	5,4	9,5	113	49,7/5,90	3,70/1,60	4,50
10С	38	11,452	4,6	7,2	101	38,6/5,20	4,70/2,00	4,50
9С1Б	43	3,592	10,8	12,2	159	66,3/4,95	11,6/4,59	5,66
10С	44	8,933	6,0	8,3	121	59,6/6,30	6,60/2,70	7,00
9С1Б	50	6,432	9,3	14,2	304	134/8,80	8,80/3,30	7,30
10С	58	7,903	7,6	14,0	229	105/9,20	7,00/3,00	6,50
9С1Б	70	1,859	15,4	16,8	262	104/6,94	10,3/3,60	4,29
10С	83	1,204	19,6	20,7	356	137/7,16	10,4/3,22	3,43
10С	85	2,000	16,3	17,4	345	109/5,70	10,0/3,00	4,80

Электронный архив УГЛТУ

Окончание приложения 2

Состав	А, лет	N/1000, экз/га	D, см	H, м	V, м³/га	Фитомасса, т/га		
						стволов	истий	хвои
Сосняк осоково-болотный								
10С	79	3,823	9,6	12,3	248	82,1/7,30	7,90/2,30	3,70
9С1Б	82	2,183	12,2	12,2	234	81,6/6,27	11,9/3,09	5,50
Средняя тайга (данные З. Я. Нагимова)								
Сосняк ягодниковый								
10С	33	9,053	7,1	11,1	221	94,2/7,43	8,58/3,83	8,46
8С2Лц	56	2,516	13,5	16,5	295	114/6,19	8,59/3,22	4,91
9С1Б	56	3,543	12,6	15,6	328	124/7,54	10,4/3,91	7,46
10С	62	2,577	14,5	15,8	361	143/7,86	14,2/5,27	6,06
9С1Лц	90	0,926	23,7	23,7	409	149/5,94	14,0/4,16	6,28
Сосняк брусничный								
7С3Лц	47	2,234	13,7	15,7	229	89,9/4,52	6,70/2,46	4,46
9С1Лц	51	4,841	10,4	14,3	311	123/6,70	9,38/3,84	7,49
8С1Б1Ос	53	8,900	6,7	11,5	227	83,5/8,46	7,12/3,33	6,02
9С1Б	60	4,875	9,8	15,2	289	114/6,51	6,90/2,87	5,52
9С1Б	88	1,615	19,3	21,5	469	176/10,6	12,6/3,96	6,96
9С1Лц	95	1,268	20,3	21,9	396	150/7,85	12,1/3,74	6,27

**Экспериментальные данные надземной фитомассы березняков
Урало-Казахстанского региона в абсолютно сухом состоянии**

Состав	А, лет	N/1000, экз/га	D, см	H, м	V, м³/га	Фитомасса, т/га		
						стволов	ветвей	листьев
Зауральская холмисто-предгорная провинция, южная тайга (данные А. А. Сальникова и В. В. Кирилловой)								
Березняк разнотравный								
10Б	13	11,100	4,2	6,9	66,2	31,4/6,39	9,53/6,10	2,24
10Б	50	1,191	19,7	23,0	343	180/25,6	15,4/5,40	2,71
10Б	53	1,060	16,3	21,5	220	107/28,8	9,40/3,50	1,76
Березняк травяной								
9Б1Ос	5	26,136	1,1	2,6	7,1	5,2/1,40	0,72/0,50	1,00
10Б	5	7,167	2,4	3,6	9,8	4,9/1,61	1,65/1,10	1,36
10Б	30	2,076	12,3	16,3	183	95,7/15,2	14,4/6,30	1,99
10Б	47	1,070	18,6	23,2	351	155/19,2	13,1/4,70	2,33
10Б	47	1,414	16,6	21,7	306	173/25,1	18,5/7,00	1,86
10Б	55	0,908	21,3	23,4	328	184/31,0	12,5/4,40	3,60
Березняк хвощово-папоротниковый								
10Б	11	13,374	2,1	4,3	12,8	6,16/1,31	1,45/0,90	1,40
Березняк осоковый								
9Б1Ив	28	5,342	5,7	7,4	71,9	33,9/6,74	4,43/2,20	1,60
Южно-Уральская провинция горных южнотасжских и смешанных лесов (данные В. М. Ваганова)								
Березняк злаковый								
8Б1С1Ос	39	1,890	11,6	13,6	124	74,5/11,2	15,4/6,50	4,30
10Б	44	1,282	14,3	20,7	212	101/12,7	10,0/3,80	3,40
10Б	52	1,973	13,6	16,7	254	126/16,0	7,80/3,10	3,60
Березняк травяной								
10Б	18	6,534	5,5	9,9	85,3	39,7/5,60	4,43/2,30	3,11
10Б	23	4,737	6,3	10,3	83,4	37,5/7,39	7,89/4,00	2,89
9Б1Лп	34	1,532	13,8	16,2	161	96,0/12,1	14,9/6,30	5,22
5Б5Ос	36	1,018	15,0	16,2	136	87,6/11,0	20,5/8,60	4,32
8Б2Ос	38	0,899	14,0	15,8	102	60,6/9,90	7,90/3,20	3,12
9Б1С	44	1,682	14,9	22,4	344	201/28,7	21,4/8,30	4,91
9Б1Е	55	1,415	14,7	18,8	215	120/15,7	18,8/7,00	4,41
8Б1С1Лп	63	0,775	22,0	22,5	295	168/20,0	23,9/8,10	5,86

Состав	А, лет	N/1000, экз/га	D, см	H, м	V, м³/га	Фитомасса, т/га		
						стволов	ветвей	листьев

**Колочные березняки юга Западно-Сибирской низменности,
южная лесостепь (данные В. А. Усольцева)**

Влажные условия произрастания

Семенное происхождение

10Б	23	13,700	4,4	9,0	120	62,4/17,7	6,29/3,11	3,25
-----	----	--------	-----	-----	-----	-----------	-----------	------

Порослевое происхождение

6Б4Ос	11	8,890	3,4	5,3	24,0	11,7/3,4	3,02/1,61	1,87
6Б4Ос	12	8,260	4,4	7,2	51,0	24,8/6,8	4,71/2,42	2,47
5Б4ОсIИВ	19	10,230	5,5	9,3	72,0	32,1/7,75	7,20/3,41	3,20
10Б	22	4,250	7,3	10,7	100	51,6/12,6	12,3/5,68	3,68
7Б3Ос	24	3,520	9,3	14,0	198	102/23,3	14,0/6,20	3,88
4Б6Ос	29	2,210	9,7	14,0	134	69,0/15,4	9,1/3,94	3,29
10Б	35	2,010	12,7	17,6	239	123/25,0	15,3/6,16	4,11
3Б7Ос	35	1,460	11,3	16,2	221	113/24,1	18,9/7,83	4,52
5Б5Ос	36	1,880	11,7	16,5	241	123/26,3	15,1/6,11	3,84
9Б1Ос	36	2,720	9,1	12,7	139	71,7/16,5	10,5/4,58	3,10
6Б4Ос	49	1,740	14,2	18,3	318	162/31,0	25,3/9,63	4,91
10Б	61	0,550	20,0	20,0	163	82,9/14,7	14,7/4,88	2,67
5Б5Ос	64	0,960	18,9	20,3	276	141/25,0	23,2/7,75	4,27
10Б	65	0,630	20,1	19,5	182	92,7/16,4	21,5/7,12	3,31
10Б	70	0,540	20,0	20,0	150	75,9/13,5	14,8/4,90	2,80
7Б3Ос	71	0,750	19,2	21,6	269	137/24,3	28,0/9,29	3,57
8Б2Ос	71	0,650	25,0	21,5	257	131/24,3	25,0/7,81	4,15
10Б	73	0,640	19,0	19,5	125	63,3/11,3	19,2/6,38	3,34
10Б	73	0,780	19,8	21,2	251	128/22,7	22,0/7,32	3,77
10Б	74	0,540	21,0	19,3	164	83,3/14,5	19,9/6,61	3,18
10Б	76	0,840	17,0	19,6	137	69,6/12,4	13,3/4,68	3,18
10Б	86	0,340	29,2	19,7	193	98,2/19,6	24,2/7,10	3,57

**Березняки островного бора Ара-Карагай, Тургайский прогиб, зона степи
(данные В. А. Усольцева)**

Влажные условия произрастания

Семенное происхождение

10Б	11	33,080	2,3	5,2	50	24,3/7,54	6,24/3,52	1,57
10Б	28	3,352	8,0	12,8	110	56,8/13,6	6,90/3,16	1,94

495

Электронный архив УГЛТУ

Окончание приложения 3

Состав	А, лет	N/1000, экз/га	D, см	H, м	V, м³/га	Фитомасса, т/га		
						стволов	ветвей	листьев
Свежие условия произрастания								
<i>Семенное происхождение</i>								
10Б	32	3,942	7,3	9,4	82	42,3/10,3	7,00/3,16	2,57
10Б	32	4,050	7,6	10,1	98	50,6/12,4	7,70/3,42	2,86
<i>Порослевое происхождение</i>								
10Б	5	6,550	2,0	3,2	5,0	2,45/0,80	4,11/2,23	0,97
10Б	12	7,680	3,6	5,2	28	13,6/3,9	5,10/2,62	2,47
10Б	16	7,730	4,8	7,2	59	28,6/7,6	5,80/2,92	2,43
10Б	16	7,120	5,3	7,6	68	33,0/8,43	9,40/4,64	3,42
10Б	22	3,200	7,0	8,9	54	27,8/6,94	5,64/2,62	1,82
10Б	25	3,170	8,0	10,0	79	40,8/9,80	10,0/4,56	3,12
10Б	34	2,680	10,4	11,7	147	75,7/16,6	11,1/4,72	2,59
10Б	43	1,060	14,6	14,2	112	57,1/10,8	12,8/5,00	3,28
10Б	47	0,860	16,4	15,5	132	67,3/12,3	14,1/5,24	2,26
10Б	50	1,000	14,7	15,1	121	61,7/11,5	9,7/3,70	2,05
10Б	55	0,500	19,0	17,4	106	54,0/9,60	11,6/3,97	2,00
Сухие условия произрастания								
<i>Порослевое происхождение</i>								
10Б	44	1,620	11,0	12,2	100	51,0/10,4	9,20/3,70	1,87
10Б	54	0,870	16,4	13,7	111	56,5/10,3	15,3/5,55	2,15
10Б	68	0,686	20,4	17,0	157	80,0/14,6	19,1/6,89	2,77

Приложение 4

Эскизы таблиц биологической продуктивности березняков Среднего Урала, совмещенных с ГХР
Л. А. Лысова (Дуганский, Лысов, 1991) по хозяйственным группам типов леса в абсолютно сухом состоянии

А, лет	H, м	D, см	N/1000, экз/га	V, м ³ /га	H ₅₀ , м	Наземная фитомасса, т/га				Доля, %	
						стволов	ветвей	листья	листья в кроне	кроны в надземной массе	
Ли́пня́ковая группа											
10	6,8	4,7	7,11	62	23,1	30,4/7,1	6,7/3,9	2,27	25,3	22,8	
20	12,3	9,0	3,12	134	26,1	66,7/13,1	8,0/3,9	2,00	20,0	13,0	
30	16,5	12,7	1,83	195	25,5	98,7/17,5	10,1/4,4	2,05	16,8	11,0	
40	19,6	16,0	1,28	245	24,1	124,8/20,6	12,3/4,8	2,10	14,6	10,3	
50	21,7	18,5	1,03	286	22,6	143,5/22,4	14,1/5,2	2,16	13,3	10,2	
60	23,4	20,6	1,87	320	21,4	156,2/23,3	15,5/5,4	2,19	12,4	10,2	
70	24,8	22,7	0,75	348	20,4	165,0/23,7	16,7/5,6	2,21	11,7	10,3	
80	25,8	24,7	0,65	370	19,6	170,6/23,8	18,0/5,8	2,23	11,0	10,6	
90	26,6	26,5	0,58	388	18,9	173,3/23,6	19,0/5,9	2,24	10,6	10,9	
100	27,2	28,1	0,52	402	18,2	173,8/23,2	19,7/6,0	2,25	10,2	11,2	
110	27,7	28,6	0,48	412	17,8	171,8/22,8	19,6/5,8	2,30	10,5	11,3	
120	28,0	31,0	0,44	420	17,3	170,2/22,1	20,7/6,0	2,22	9,7	11,9	
Разнотравная и ягодниковая группы											
10	5,2	3,7	8,47	37	19,8	17,4/4,2	4,2/2,5	1,64	28,2	25,0	
20	9,9	7,3	3,79	93	21,7	45,1/9,3	5,9/3,0	1,69	22,3	14,5	
30	13,7	10,6	2,24	145	21,2	73,4/13,7	8,0/3,7	1,81	18,4	11,8	
40	16,9	13,8	1,54	189	20,5	97,4/16,8	10,0/4,2	1,87	15,8	10,9	
50	19,4	16,7	1,15	227	19,8	116,5/18,8	11,9/4,6	1,95	14,0	10,6	
60	21,2	19,1	0,93	258	18,9	130,1/20,0	13,5/5,0	2,01	12,9	10,7	
70	22,4	20,8	0,82	283	17,9	139,1/20,6	14,7/5,2	2,05	12,3	10,7	
80	23,4	22,3	0,73	302	17,2	144,4/20,7	15,5/5,3	2,07	11,8	10,8	
90	24,2	24,0	0,65	317	16,6	147,5/20,6	16,3/5,4	2,07	11,3	11,1	

А, лет	H, м	D, см	N/1000, экз/га	V, м ³ /га	H ₅₀ , м	Наземная фитомасса, т/га			Доля, %	
						стволов	ветвей	листья	листья в кроне	кроны в наземной массе
100	24,8	25,5	0,58	329	16,0	148,9/20,4	17,0/5,5	2,08	10,9	11,4
110	25,2	26,8	0,54	338	15,5	149,0/20,1	17,5/5,5	2,08	10,6	11,6
120	25,4	27,7	0,51	344	15,0	148,3/19,7	17,6/5,4	2,06	10,5	11,7
Травяно-зеленомошная группа										
10	4,0	2,9	10,30	22	17,1	10,6/2,7	2,5/1,5	1,15	31,2	25,8
20	7,9	6,0	4,61	62	18,1	30,0/6,5	4,3/2,3	1,35	24,1	15,7
30	11,5	9,0	2,59	103	17,9	52,0/10,2	6,2/2,9	1,54	20,0	12,9
40	14,2	11,5	1,89	142	17,0	73,1/13,2	8,0/3,5	1,67	17,3	11,6
50	16,5	14,0	1,43	176	16,4	90,8/15,4	9,7/4,0	1,77	15,4	11,2
60	18,3	16,3	1,14	204	15,8	104,2/16,8	11,3/4,4	1,84	14,0	11,2
70	19,6	18,2	0,96	226	15,1	113,3/17,5	12,6/4,7	1,90	13,1	11,3
80	20,6	19,7	0,85	244	14,5	119,8/17,8	13,4/4,9	1,93	12,6	11,4
90	21,5	21,2	0,76	257	14,1	123,3/17,9	14,0/4,9	1,93	12,1	11,5
100	22,3	22,4	0,69	267	13,9	125,5/17,7	14,2/4,9	1,90	11,8	11,4
110	22,7	23,3	0,65	274	13,4	126,6/17,5	14,3/4,8	1,88	11,6	11,4
120	23,0	24,0	0,62	279	13,0	127,2/17,3	14,3/4,7	1,85	11,5	11,3
Крупнотравно-приручьевая группа										
10	3,1	2,3	12,01	13	15,0	6,9/1,8	1,5/0,9	0,80	34,2	25,4
20	6,8	5,1	5,19	45	16,0	21,9/4,9	3,2/1,7	1,12	26,2	16,4
30	10,1	8,1	3,04	82	15,8	41,3/8,3	5,2/2,5	1,33	20,5	13,5
40	12,5	10,3	2,13	116	14,9	59,5/11,2	6,9/3,2	1,54	18,1	12,5
50	14,8	12,8	1,55	144	14,5	74,0/13,0	8,6/3,6	1,67	16,0	12,1
60	16,5	14,9	1,24	167	14,0	85,0/14,2	10,0/4,0	1,71	14,7	12,0
70	17,8	16,6	1,06	186	13,4	93,2/14,9	10,9/4,3	1,75	13,8	12,0
80	18,8	18,1	0,92	201	12,9	98,9/15,3	11,8/4,4	1,79	13,2	12,1

90	19,6	19,3	0,84	213	12,5	103,1/15,5	12,3/4,5	1,79	12,7	12,0
100	20,3	20,5	0,76	222	12,2	105,7/15,4	12,6/4,5	1,78	12,4	12,0
110	20,8	21,4	0,71	228	11,9	107,2/15,3	12,7/4,4	1,76	12,2	11,9
120	21,1	22,0	0,67	232	11,5	108,3/15,1	12,6/4,3	1,72	12,1	11,7
Мшисто-хвощовая группа										
10	2,4	1,8	12,21	8	13,3	5,0/1,3	1,0/0,6	0,61	38,0	24,3
20	5,0	3,8	6,79	25	12,7	13,0/3,1	1,9/1,0	0,78	29,3	17,0
30	8,3	6,7	3,57	54	13,1	27,0/5,7	3,6/1,8	1,05	22,4	14,8
40	10,7	8,8	2,53	84	12,6	42,5/8,3	5,3/2,5	1,28	19,4	13,4
50	12,6	10,8	1,90	110	12,1	55,5/10,3	6,9/3,1	1,44	17,4	13,0
60	14,2	12,5	1,55	131	11,7	65,7/11,5	8,0/3,4	1,53	16,0	12,7
70	15,5	14,4	1,24	148	11,3	72,9/12,3	9,3/3,8	1,61	14,8	13,0
80	16,5	16,0	1,06	161	10,9	77,7/12,7	10,2/4,0	1,66	14,0	13,3
90	17,2	17,0	0,97	171	10,5	81,6/12,9	10,6/4,1	1,66	13,5	13,1
100	17,7	17,9	0,90	178	10,1	83,9/13,0	10,9/4,1	1,65	13,1	13,0
110	18,1	18,6	0,85	182	9,8	85,4/12,9	10,9/4,1	1,61	12,9	12,8
120	18,3	18,9	0,84	185	9,4	87,2/12,8	10,7/3,9	1,57	12,9	12,3
Сфагновая и травяно-болотная группы										
10	1,6	1,3	16,54	4	11,1	3,2/0,9	0,5/0,3	0,36	41,6	19,6
20	3,6	2,8	8,28	12	10,0	7,2/1,8	1,0/0,5	0,48	32,8	16,9
30	5,6	4,4	5,40	28	9,2	14,7/3,4	2,0/1,0	0,73	26,6	15,8
40	7,8	6,3	3,65	44	9,2	21,9/4,7	3,0/1,5	0,86	22,3	15,0
50	10,0	8,4	2,55	71	9,4	34,6/6,9	4,7/2,2	1,13	19,3	14,4
60	11,6	10,3	1,92	89	9,2	42,3/8,0	6,0/2,7	1,26	17,3	14,7
70	12,9	12,1	1,50	103	9,0	47,8/8,7	7,1/3,1	1,36	16,0	15,1
80	13,8	13,3	1,29	114	8,7	52,2/9,3	7,9/3,3	1,42	15,3	15,1
90	14,4	14,3	1,16	122	8,3	54,9/9,5	8,4/3,5	1,45	14,7	15,3
100	14,8	15,1	1,06	127	8,0	56,2/9,6	8,8/3,5	1,46	14,3	15,4
110	15,2	15,8	0,99	130	7,7	57,3/9,5	8,8/3,5	1,50	14,1	15,2
120	15,3	16,3	0,93	142	7,3	61,8/10,2	9,6/3,8	1,55	13,9	15,3

Приложение 5

Экспериментальные данные надземной фитомассы в абсолютно сухом состоянии порослевых осинников Северного Казахстана (данные В. А. Усольцева)

Состав	А, лет	N/1000, экз/га	D, см	H, м	V, м³/га	Фитомасса, т/га		
						стволов	ветвей	листья
Колочные осинники юга Западно-Сибирской низменности, южная лесостепь								
Влажные условия произрастания								
4Ос6Б	11	8,888	2,8	4,5	21	8,95/2,29	3,59/2,06	2,32
4Ос6Б	12	8,260	4,2	6,8	51	21,6/4,65	6,53/3,70	2,39
4Ос5Б1И	15	10,232	5,9	9,5	56	23,8/5,38	4,06/2,11	1,40
3Ос7Б	22	3,519	11,1	14,8	190	84,5/15,5	17,2/8,34	3,34
6Ос4Б	26	2,210	10,9	13,7	134	59,6/11,0	11,2/5,20	2,78
7Ос3Б	35	1,460	20,0	20,4	263	116/17,0	16,1/6,39	3,29
8Ос2Б	35	1,564	17,3	20,5	323	147/21,5	18,9/7,52	3,29
5Ос5Б	36	1,883	18,7	19,0	255	113/16,4	13,7/5,41	3,32
10Ос	48	1,061	20,8	23,0	417	165/22,4	21,4/7,40	2,90
3Ос7Б	48	1,026	20,9	22,3	308	122/16,6	25,3/8,75	3,27
2Ос8Б	49	0,650	20,9	20,5	284	113/15,3	22,5/7,76	3,07
5Ос5Б	49	0,961	20,1	21,8	284	112/15,4	18,0/6,20	2,55
Осинники островного бора Ара-Карагай, Тургайский прогиб, зона степи								
Влажные условия произрастания								
10Ос	35	0,800	18,4	17,0	178	78,9/11,6	11,4/4,51	1,90
10Ос	41	0,526	23,2	19,7	192	76,0/10,0	22,2/8,60	2,40
7Ос3Б	46	0,746	25,1	22,4	365	144/19,1	19,3/6,98	3,12
Свежие условия произрастания								
10Ос	23	4,074	7,5	10,3	95	42,4/9,12	9,71/4,53	1,98
10Ос	26	1,431	12,5	12,5	113	49,9/8,73	11,9/3,92	2,45
Осинники Казахского мелкосопочника, зона степи								
Влажные условия произрастания								
10Ос	19	3,386	9,2	11,9	136	60,1/9,02	13,6/6,02	2,34
9Ос1Б	36	1,577	17,1	17,0	273	120,6/18,1	16,6/6,59	3,01
Свежие условия произрастания								
10Ос	10	26,300	2,3	4,0	32,2	16,8/3,08	4,19/2,36	1,86
10Ос	16	9,646	4,4	6,8	55,8	29,1/5,24	4,66/2,45	2,70
10Ос	19	12,940	4,5	7,1	98,4	51,6/7,13	4,63/2,30	1,48

Электронный архив УГЛТУ

Окончание приложения 5

Состав	А, лет	N/1000, экз/га	D, см	H, м	V, м³/га	Фитомасса, т/га		
						стволов	ветвей	листья
10Ос	29	3,959	7,5	8,7	68,3	40,3/5,11	7,00/2,99	2,41
10Ос	32	0,980	16,6	12,8	122	53,9/8,23	15,9/6,80	2,67
9Ос1Б	35	0,817	17,1	13,9	117	51,8/7,78	12,8/5,05	1,80
10Ос	41	0,524	22,0	15,0	142	56,1/7,50	27,3/10,6	2,60
10Ос	45	0,923	20,6	17,8	247	97,7/13,3	22,8/8,28	3,27
9Ос1Б	52	0,410	31,0	17,4	202	79,9/11,2	44,7/15,4	2,97
9Ос1Б	53	0,450	31,0	18,3	172	68,2/9,43	21,2/7,29	1,35
Сухие условия произрастания								
10Ос	18	6,800	5,6	7,0	69,9	36,5/6,58	9,57/4,73	2,05
10Ос	25	5,912	6,2	8,0	93,0	46,2/7,78	5,42/2,52	1,75

Приложение 6
 Экспериментальные данные фитомассы осинников в абсолютно сухом состоянии
 на территории бывшего СССР (по литературным данным)*

Тип леса	Состав	А, лет	N/1000, экз/га	D, см	H, м	V, м ³ /га	Фитомасса, т/га			
							стволов	листвей	корней	
<i>Тамм, Росс, 1979, 1980 (1)</i>										
Топляно-лабазниковый	10Ос	9	15,560	1,9	4,5	14	5,4/—	3,4	2,8	—
Кисличный	6Ос3Б1Е	19	3,020	6,8	10,2	60	23,3/—	3,2	1,3	—
Лабазниково-снытевый	10Ос	32	2,960	10,5	16,5	161	62,6/—	5,9	2,5	—
Кислично-снытевый	8Ос1Б1Е	38	1,030	17,2	21,2	233	90,6/—	4,8	2,3	—
Лабазниково-снытевый	7Ос3Б	49	0,800	22,5	27,2	358	139,3/—	7,1	1,5	—
Лабазниково-черничный	6Ос2Б2Е	57	0,690	29,5	27,1	364	141,6/—	14,0	1,8	—
<i>Ремезов и др., 1959 (2)</i>										
Липняковый	10Ос	19	3,100	8,8	11,7	88,2	34,3/—	3,8	2,2	19,4
Травяной	10Ос	55	0,980	19,2	26,3	434	169/—	11,7	2,9	32,0
<i>Вакуров, Полякова, 1982 (3)</i>										
Чернично-разнотравный	9Ос1Б	35	3,000	8,8	14,0	169	77,9/10,6	6,8	1,83	17,0
<i>Дылис, Носова, 1977 (4)</i>										
Таволгово-гравилатовый	10Ос	35	1,387	14,0	16,0	172	67,2/10,1	8,55	3,00	—
	10Ос	45	1,160	17,0	20,0	220	97,0/15,9	10,4	2,38	—
	10Ос	75	1,185	27,0	26,0	350	186,8/26,4	28,9	7,40	—
Дубово-лещиново-широко-травяной	10Ос	12	11,500	5,0	6,0	34	13,8/3,5	1,30	1,20	—
	10Ос	25	4,250	7,0	10,0	85	16,1/2,4	2,30	0,80	—
	10Ос	55	1,654	17,0	20,0	258	134/17,9	18,6	2,95	—
Папоротниково-снытевый	10Ос	55	0,937	21,0	24,0	298	160/19,7	21,5	6,10	—

		<i>Вануздаев и др., 1969, 1971 (5)</i>					<i>Рождественский, 1979, 1982 (6)</i>				
Волосисто-осоковый Снытевый Зеленчукский	100с	54	1,032	20,2	22,6	411	147/—	8,9	1,80	—	—
	100с	50	0,756	22,4	25,0	398	155/—	19,7	2,80	—	—
	100с	45	0,899	20,1	21,1	326	127/—	20,1	2,60	—	—
Снытевый	90с1Ол	15	10,080	4,9	8,3	92,9	42,0/8,72	7,69	2,61	—	—
	100с	19	7,157	6,3	11,5	128	55,6/9,15	6,26	2,55	—	—
	100с	20	3,700	8,0	12,7	126	54,4/8,26	6,04	2,65	—	—
	90с1Б	39	1,922	13,7	18,1	165	89,0/13,6	11,6	2,90	—	—
	80с2Е	85	0,504	30,9	26,3	445	137/21,3	19,1	2,01	—	—
Липняковский	50с3Б1С1Л	11	32,200	2,5	5,0	34,0	13,8/—	4,08	5,36	7,9	—
	<i>Поликарпов, 1962 (7)</i>										
Осоково-снытевый	80с1Лп1Кл	10	11,630	2,2	4,9	12,1	4,9/—	0,2	0,6	12,2	—
	100с	25	3,340	10,8	17,3	332	135/—	12,0	3,0	35,0	—
	100с	50	0,648	25,2	28,0	500	203/—	11,0	3,0	37,0	—
Снытево-осоковый	40с2Яс2Лп	26	13,350	6,1	9,6	114	67,1/12,8	11,6	3,74	48,5	—
	1Кл1Д	<i>Смирнов, Семенова, 1974 (9)</i>									
Крупнотравный Осоково-разнотравный Крупнотравный Снытево-разнотравный Папоротниковый	100с	30	2,857	11,5	16,3	215	129/—	12,2	2,90	—	—
	100с	40	1,458	20,0	23,0	430	271/—	23,6	4,34	—	—
	100с	42	1,428	19,1	21,3	386	235/—	19,3	4,28	—	—
	100с	44	1,704	13,2	18,4	210	121/—	15,3	3,26	—	—
	100с	51	1,004	19,0	22,2	292	184/—	20,0	3,81	—	—
<i>Габеев, 1976 (11)</i>											

Окончание приложения 6

Тип леса	Состав	А, лет	N/1000, экз/га	D, см	H, м	V, м³/га	Фитомасса, т/га			
							стволов	ветвей	лиственный	
Крупнотравный	100с	61	0,828	20,7	24,4	324	216/—	21,8	3,07	
	100с	67	0,571	30,5	28,0	529	328/—	28,0	3,56	
<i>Демиденко, 1978 (11)</i>										
Разнотравно-осочковый	100с	6	30,540	2,1	3,2	22,1	8,95/—	1,74	1,18	
	100с	13	8,530	4,6	7,1	56,2	20,3/—	2,66	1,54	
	100с	19	4,320	7,2	10,2	97,5	38,1/—	3,02	1,81	
	100с	6	24,120	2,5	3,8	28,3	11,3/—	2,38	2,01	
	100с	13	6,590	5,6	8,5	64,8	23,2/—	4,02	2,16	
Производный (брусничный)	100с	19	3,360	8,7	12,5	109	41,2/—	4,63	2,67	
	<i>Копосов, 1975 (12)</i>									
Высокотравный	100с	54	2,590	10,1	13,5	132	67,5/6,14	6,65	2,12	
	100с	30	2,331	10,0	9,0	96	43,5/4,5	5,1	3,80	
<i>Поздняков и др., 1969 (13)</i>										

*Цифра в скобках обозначает номер позиции на рис. 25.

Приложение 7
 Эскизы таблиц биологической продуктивности основных древостоев Центрального горного района Урала, совмещенных с соответствующими ТХР (Лесогазационный справочник..., 1991; табл. 5.48) по типам леса, в абсолютно сухом состоянии

А, лст	Н, м	D, см	N/1000, экз/га	V, м ³ /га	V, м ³ /га	Фитомасса, т/га				Всего	
						стволов	ветвей	листья	надземная		
Осинник разнотравный, II класс бонитета											
10	5,4	4,0	11,833	14,2	46	19,0	5,0	2,4	26,4	15,4	41,8
20	9,3	8,8	3,393	20,7	99	45,3	10,2	2,5	58,0	20,4	78,4
30	12,8	13,0	1,985	26,4	160	76,0	14,9	2,7	93,6	24,0	117,6
40	15,5	17,0	1,352	30,7	217	103,3	20,3	2,9	126,5	26,5	153,0
50	18,1	20,2	1,055	34,3	272	127,1	24,2	3,0	154,3	28,7	183,0
60	20,0	23,4	0,840	36,1	312	140,1	28,9	3,0	172,0	30,2	202,2
70	21,4	25,7	0,723	37,5	341	146,4	32,9	3,0	182,3	31,2	213,5
80	22,5	28,0	0,623	38,4	364	147,2	37,8	3,0	188,0	31,9	219,9
90	23,2	29,5	0,566	38,7	378	143,8	42,1	3,0	188,9	32,2	221,1
100	23,7	30,8	0,525	39,1	387	137,9	46,5	2,9	187,3	32,3	219,6
Осинник злаковый, III класс бонитета											
10	4,0	3,0	15,857	11,1	29	14,4	3,4	2,0	19,8	13,9	33,7
20	8,2	8,0	3,680	18,4	81	39,2	9,6	2,3	51,1	14,9	66,0
30	11,6	12,4	1,975	23,9	141	68,6	15,6	2,6	86,8	22,8	109,6
40	15,0	16,2	1,432	29,5	203	97,9	19,5	2,8	120,2	26,0	146,2
50	17,5	19,8	1,071	33,0	257	120,6	24,4	2,9	147,9	28,2	176,1
60	18,8	22,6	0,863	34,6	285	128,5	29,8	2,9	161,2	29,1	190,3
70	19,8	25,4	0,698	35,4	304	128,8	36,1	2,9	167,8	29,6	197,4
80	20,6	27,6	0,605	36,2	321	127,6	42,3	2,9	172,8	29,9	202,7
90	21,3	29,8	0,529	36,9	335	123,8	49,1	2,9	175,8	30,2	206,0
100	21,9	31,1	0,492	37,4	349	120,5	54,3	2,9	177,7	30,4	208,1

**Запасы фитомассы в абсолютно сухом состоянии еловых и пихтовых
древостоев Северной Евразии (литературные данные;
помер в скобках обозначает позицию на рис. 37)***

А, лет	N, тыс. экз/га	D, см	H, м	V, м ³ /га	Фитомасса, т/га			
					стволов	ветвей	хвои	корней
Северная тайга								
<i>Ель — IP; 32 пробных площади</i>								
Навас, Кубин, 1983 (4)								
250	0,550	21,5	16,0	125	67,3	17,1	6,60	37,5
Чепурко, 1972 (1)								
140	0,615	23,3	12,2	173	77,9	22,8	6,79	28,4
Манакон, Никонов, 1981 (2)								
150	1,195	12,4	9,5	83	37,3	4,99	3,29	10,6
110	0,668	14,9	10,9	64	28,9	5,32	2,80	11,3
150	1,052	15,0	12,7	117	52,9	8,55	5,35	20,6
130	1,430	13,2	10,6	111	50,1	6,93	3,81	19,1
150	1,280	15,1	15,0	115	51,9	11,4	4,93	20,1
150	0,983	17,9	15,7	208	93,7	12,7	6,82	33,1
150	1,194	16,3	12,1	155	69,6	11,0	6,19	26,1
170	1,639	16,2	14,1	238	107,2	17,6	9,04	33,7
150	0,513	9,0	6,2	16	7,37	1,17	0,85	4,92
Вакуров, Полякова, 1982 (6)								
150	1,330	12,5	11,5	168	76,8	11,6	4,75	21,0
200	0,980	13,5	11,3	135	62,5	8,86	3,49	17,2
170	0,910	11,6	9,5	64	29,9	4,60	2,18	8,31
170	0,710	11,4	8,8	48	22,8	3,40	1,63	6,37
Марченко, Карлов, 1962 (9)								
210	0,322	27,0	9,0	180	81,1	11,1	2,05	29,2
Руднева и др., 1966 (8)								
125	1,056	22,5	15,0	217	97,8	23,1	7,28	40,7
Забоева и др., 1973 (10)								
130	0,887	11,0	13,0	131	59,2	11,3	9,52	35,2
Бобкова, 1987 (11)								
120	2,460	11,0	11,0	166	65,1	14,6	9,66	27,3
135	1,780	12,0	11,0	140	61,3	12,3	7,62	29,3
155	0,770	17,0	14,0	129	41,9	8,59	5,32	24,7
185	1,730	12,0	10,0	109	51,2	10,3	6,06	38,7

Продолжение приложения 8

А, лет	N, тыс. экз/га	D, см	H, м	V, м³/га	Фитомасса, т/га			
					стволов	ветвей	хвои	корней
Чертовской и др., 1978 (12)								
290	0,758	14,2	10,2	76	36,5	5,86	2,84	36,7
150	1,115	17,8	11,3	61	25,7	6,04	3,56	33,2
180	1,656	12,9	8,4	28	11,7	2,82	1,26	18,4
Вакуров, 1974 (5)								
170	0,820	13,8	12,4	153	70,2	10,0	4,11	19,5
160	0,690	19,7	18,8	235	107,8	14,5	6,30	—
150	0,780	17,3	16,8	220	100,8	14,1	5,93	—
Чертовской и др., 1978 (12)								
240	0,348	13,1	7,7	14	7,25	2,13	1,16	—
Корняк, 1976 (7)								
180	1,147	19,2	19,1	333	131,9	17,9	8,20	—
Митрофанов, 1984 (13)								
200	0,940	14,0	13,0	107	44,7	8,20	4,60	—
Митрофанов, 1977 (14)								
100	1,670	20,0	20,0	276	135,1	16,6	9,10	—
Средняя и южная тайга								
<i>Ель — ПР; 72 пробных площади</i>								
Albrektson, 1980 (105)								
145	1,457	17,2	24,0	360	141,3	17,1	8,5	44,1
Nykvist, 1971 (15)								
100	0,544	26,4	21,0	331	138,4	26,2	14,90	31,3
Казимиров, Морозова, 1973 (16)								
22	34,800	2,1	2,6	31	13,9	6,5	5,50	6,2
37	13,750	6,3	6,8	94	42,3	10,6	9,10	14,1
45	9,240	8,0	8,8	135	56,3	12,1	9,80	15,8
54	4,820	11,1	11,1	162	73,0	14,2	10,90	21,6
68	2,336	14,2	14,2	237	106,0	15,1	11,50	29,1
82	1,898	17,0	17,1	258	116,0	16,8	11,40	33,2
98	1,319	20,3	19,6	353	158,0	16,5	10,80	41,0
109	1,080	21,1	20,0	366	165,0	17,6	9,70	45,0
126	0,856	23,8	22,6	411	184,0	16,6	8,10	46,0
138	1,087	22,9	22,8	388	176,0	17,1	7,40	47,5
37	9,010	4,3	4,2	35	16,50	6,09	5,70	6,61
42	9,410	5,4	5,8	46	20,97	7,00	6,53	7,98

А, лет	N, тыс. экз/га	D, см	H, м	V, м ³ /га	Фитомасса, т/га			
					стволов	ветвей	хвои	корней
41	9,930	6,6	6,7	57	26,00	8,19	7,53	9,47
45	9,620	6,1	6,9	63	29,00	8,68	8,21	10,1
39	9,980	7,2	7,8	107	48,2	11,2	10,21	14,6
43	6,310	9,3	9,8	133	58,4	11,5	9,50	16,8
38	4,480	11,0	12,2	154	65,3	12,2	9,91	18,3
Щербачков, Зайцева, 1971 (17)								
150	0,671	23,6	22,8	420	161,1	24,3	9,10	35,4
160	1,155	19,6	19,4	424	182,2	18,4	10,10	40,1
180	1,159	18,1	18,0	376	163,8	18,5	9,60	36,0
160	2,733	16,1	15,1	310	134,4	16,5	9,60	29,6
140	3,803	6,3	4,9	52	25,0	4,3	2,80	5,5
Марченко, Карлов, 1962 (21)								
200	0,358	38,0	31,0	450	201,0	33,6	16,30	85,1
Забоева и др., 1973 (10)								
110	2,450	15,0	13,5	227	101,4	26,9	15,10	79,3
Бобкова, 1987 (11)								
140	2,323	17,0	15,0	267	115,1	22,0	14,18	39,7
125	2,160	16,0	15,0	220	105,9	18,4	14,35	39,6
125	1,858	15,0	14,0	170	93,5	13,3	11,34	38,1
Смирнов, 1971 (19)								
105	1,456	15,6	16,4	245	104,9	14,0	11,00	64,6
Паршевников, 1962 (20)								
35	2,307	11,7	12,2	194	86,8	14,4	8,07	31,2
130	1,226	16,9	17,6	235	104,9	14,0	11,35	64,6
110	0,971	19,5	19,2	357	159,8	22,5	14,36	76,2
Марченко, Рокъянис, 1978 (18)								
160	0,638	45,6	31,8	992	443,4	23,7	22,7	75,7
Кулагина, 1986 (33)								
170	2,025	12,0	10,6	135	60,5	9,05	4,59	37,5
Смирнов, 1971 (19)								
130	1,040	17,6	17,7	226	97,3	13,0	9,10	—
Усольцев, 1997 (22)								
47	1,544	19,6	18,5	369	169,0	21,9	18,50	—
54	1,304	20,4	21,5	422	183,4	16,1	18,50	—
15	14,436	2,9	2,3	14	6,6	4,0	4,90	—

А, лет	N, тыс. экз/га	D, см	H, м	V, м ³ /га	Фитомасса, т/га			
					стволов	ветвей	хвои	корней
21	4,719	5,1	5,0	25	12,8	4,3	5,70	—
52	1,280	18,9	19,7	317	142,0	18,0	20,00	—
65	1,662	18,6	18,1	277	103,3	13,0	11,30	—
70	1,147	20,6	17,0	257	121,3	23,1	16,00	—
70	1,211	19,9	18,1	302	141,9	21,1	24,20	—
78	2,066	14,7	17,3	261	120,7	7,1	13,60	—
80	1,144	20,6	21,2	318	111,2	9,9	11,40	—
90	0,922	23,5	24,0	371	126,7	24,5	16,40	—
120	0,478	30,9	23,0	348	138,0	29,2	16,60	—
54	0,659	11,7	10,6	149	79,0	1,4	2,10	—
67	2,725	13,8	12,5	230	97,1	13,2	15,00	—
12	12,000	2,5	3,1	16	7,1	3,1	4,60	—
14	10,023	2,0	2,2	11	5,2	1,7	3,40	—
20	8,433	5,3	5,8	55	24,9	9,0	12,40	—
58	1,696	15,4	16,5	263	125,5	16,6	16,40	—
76	2,390	16,0	19,4	399	157,1	14,6	16,00	—
68	1,864	14,4	13,6	188	83,3	12,6	12,80	—
79	1,760	15,1	15,6	242	120,0	13,0	13,30	—
132	1,217	21,4	21,0	387	234,9	25,2	20,50	—
90	4,915	7,3	8,4	129	64,8	9,8	10,00	—
110	2,205	14,3	15,8	306	156,6	15,5	15,10	—
115	2,463	12,7	12,4	228	117,6	17,4	17,50	—
142	5,422	8,1	8,8	153	93,0	8,5	7,80	—
172	1,608	18,5	17,0	301	136,1	16,5	12,50	—
Митрофанов, 1983 (27)								
220	1,000	16,0	24,0	221	91,8	12,5	7,30	—
Митрофанов, 1977 (26)								
220	1,433	13,0	15,0	200	85,7	13,7	9,60	—
81	0,704	12,0	12,0	90	42,6	5,1	5,20	—
Крауклис и др., 1975 (32)								
50	3,533	14,0	12,9	377	172,9	21,2	6,33	—
Панарин и др., 1980 (38)								
200	0,220	10,0	12,0	14	6,5	1,00	0,70	—
Поздняков, 1975 (25)								
130	0,860	24,0	22,0	406	169,2	26,2	18,30	—
210	0,219	24,0	19,0	91	41,0	4,6	2,70	—
80	1,273	12,0	12,0	90	42,6	5,2	5,20	—

Продолжение приложения 8

А, лет	N, тыс. экз/га	D, см	H, м	V, м³/га	Фитомасса, т/га			
					стволов	ветвей	хвои	корней
Saito, Yamamoto, 1980 (39)								
41	1,275	24,5	21,6	568	209,0	23,7	22,10	—
<i>Пихта — ПА; 57 пробных площадей</i>								
П. Ермоленко, Л. Ермоленко, 1982 (35)								
40	3,537	7,1	7,2	169	55,2	16,4	9,80	20,7
Кузиков, 1979 (30)***								
58	1,529	14,8	13,0	180	49,2	7,9	7,70	10,2
88	0,735	21,3	20,8	260	82,2	13,6	9,85	19,8
90	0,561	27,2	22,0	345	111,5	15,7	10,60	20,8
96	0,394	25,5	20,9	233	77,7	13,4	7,90	20,0
116	0,453	28,4	22,7	325	105,7	18,7	9,33	23,9
41	3,610	6,9	6,8	75	26,8	4,9	4,66	7,46
55	1,857	12,0	11,6	152	45,4	7,45	6,65	9,65
86	0,762	20,6	19,8	244	78,2	13,0	9,22	20,5
89	0,902	19,6	18,8	246	80,1	10,8	8,47	21,3
92	0,526	26,4	22,6	339	96,6	15,3	10,63	25,8
57	3,939	7,6	7,5	80	32,2	5,13	4,73	8,53
71	0,866	16,2	15,1	160	51,4	7,03	6,85	10,7
74	1,173	14,4	14,0	147	40,8	8,62	6,00	10,6
100	0,762	20,8	19,5	256	85,4	12,0	9,48	19,7
95	0,517	22,2	19,3	219	59,4	12,0	6,44	13,7
105	0,712	22,3	20,2	244	77,2	14,3	8,61	16,4
122	0,676	23,4	21,2	299	97,3	17,9	10,11	24,0
54	2,930	7,8	6,2	69	21,9	3,91	3,61	3,72
69	1,376	15,5	14,2	198	61,1	7,83	6,31	16,4
80	0,917	16,2	15,1	153	46,6	7,02	5,12	10,4
111	0,670	22,2	20,9	270	80,7	13,0	8,28	21,5
130	0,739	23,2	21,0	290	83,6	12,8	7,80	20,7
52	1,171	14,6	13,4	176	61,6	6,1	7,80	—
70	0,649	20,3	20,6	215	77,4	12,2	9,31	—
94	0,624	22,4	21,8	268	93,8	13,8	10,96	—
101	0,465	27,2	21,2	375	127,0	19,1	11,90	—
52	2,725	8,0	7,0	66	23,6	7,55	3,48	—
86	0,617	21,4	17,0	156	51,1	9,82	6,81	—
100	0,746	20,2	16,6	236	59,9	9,66	5,80	—
79	0,708	16,8	14,3	193	54,4	7,92	7,08	—
93	0,765	19,4	16,5	218	69,5	10,4	8,00	—
124	0,637	22,3	18,0	230	84,7	11,8	7,37	—
146	0,452	23,9	20,1	256	90,7	16,2	9,05	—

А, лет	N, тыс. экз/га	D, см	H, м	V, м ³ /га	Фитомасса, т/га			
					стволов	ветвей	хвои	корней
Тепикин, Кириллова (неопубл.) (24)								
50	5,301	7,0	6,8	185	60,6	23,5	16,80	—
42	2,608	8,5	8,2	72	23,7	11,4	6,80	—
70	1,797	17,0	17,7	414	135,5	22,3	11,80	—
22	12,732	2,0	2,2	27	8,7	9,2	5,80	—
73	1,177	19,9	18,1	434	141,9	32,7	24,20	—
Ханбеков, 1972 (23)								
26	5,793	8,7	8,5	144	47,0	11,7	5,97	—
Митрофанов и др., 1986 (28)								
70	2,090	11,0	11,0	192	84,7	11,9	6,50	—
70	0,905	16,0	15,0	423	173,2	19,5	6,90	—
156	0,520	25,0	22,0	341	120,6	12,9	6,30	—
Крауклис и др., 1975 (31)								
70	3,067	16,0	16,0	542	177,2	22,4	10,63	—
61	2,211	15,2	15,0	496	162,2	14,2	7,53	—
50	5,889	9,3	8,0	235	77,0	11,7	10,54	—
70	3,311	16,2	14,0	525	171,7	17,0	9,07	—
Ермоленко, 1983 (34)								
21	4,960	5,2	6,5	122	39,9	10,2	5,90	—
26	4,880	5,3	6,4	141	46,0	11,6	6,70	—
31	4,190	6,0	9,3	158	51,8	13,0	7,50	—
Онучин, Борисов, 1983 (36)								
70	2,236	8,3	9,0	61	27,7	7,4	6,51	—
108	2,080	15,7	15,9	181	86,5	13,7	8,83	—
140	2,305	17,0	16,2	172	79,0	12,0	7,91	—
100.	2,272	14,5	10,6	109	51,3	6,85	5,11	—
Храмов, Валуцкий, 1977 (29)								
180	0,395	30,1	25,5	320	121,5	21,9	10,54	—
Поздняков, 1975 (25)								
140	0,424	28,0	20,0	251	109,8	17,1	9,60	—
120	0,222	33,0	22,0	198	69,3	11,0	5,70	—
Широколиственно-темпохвойные леса								
<i>Ель — ПНР; 86 пробных площадей</i>								
Вгаекке, 1985, 1986 (41)								
25	4,844	5,4	5,2	37	15,1	7,2	9,24	—

Продолжение приложения 8

А, лет	N, тыс. экз/га	D, см	H, м	V, м ³ /га	Фиттомасса, т/га			
					стволов	ветвей	хвои	корней
25	5,312	6,0	6,0	54	21,8	10,2	12,85	—
25	2,995	7,2	6,6	46	19,1	8,8	11,08	—
25	5,155	6,5	6,5	66	25,7	11,9	15,03	—
32	5,156	8,1	8,2	122	53,4	14,9	16,00	—
32	5,208	8,8	9,3	164	66,0	18,6	19,70	—
32	2,969	10,7	10,3	149	59,0	17,0	17,50	—
32	3,203	10,6	10,5	163	63,5	18,3	18,80	—
Holmen, 1964 (42)								
71	0,987	20,8	19,9	312	127,7	29,3	15,90	—
Nihlgard, 1972 (43)								
55	0,880	27,7	24,6	802	262,0	25,0	22,00	59,0
Кылли, Кяхрик, 1970а (44)								
51	1,100	14,3	17,5	240	105,5	24,6	11,70	45,8
84	0,608	23,0	23,7	287	130,1	26,6	13,80	64,6
Кылли, Кяхрик, 1970б (44)								
85	0,340	36,2	28,5	475	225,9	37,5	7,05	70,9
Дыхмус, Оя, 1983 (45)								
40	1,550	19,4	18,6	451	192,0	21,6	18,60	48,3
Freu, Korpe, 1983; Freu, 1977 (46)								
80	0,362	31,0	26,0	450	155,0	43,0	11,00	63,0
90	0,245	30,5	26,3	300	106,0	32,8	8,20	48,0
100	0,376	30,5	27,1	445	167,0	17,6	4,40	60,0
Palumets, 1991 (3)								
91	0,920	12,2	8,9	34	14,3	6,1	4,90	13,6
Рокъянис, 1978, 1981 (47)								
10	80,000	4,6	5,6	368	164,0	40,7	22,60	57,8
29	13,224	12,7	13,0	349	153,0	25,8	17,90	62,3
48	1,404	23,5	21,5	890	383,0	37,2	31,20	107,0
71	0,622	34,5	29,9	755	324,0	41,7	31,80	72,0
89	0,612	40,0	30,3	955	409,0	60,3	33,70	120,0
Сидорович и др., 1985 (48)								
50	0,890	18,7	19,2	256	108,9	15,3	18,25	28,9
55	1,324	16,4	21,4	276	140,9	15,6	17,75	45,0
Ватковский, 1976 (52)								
15	281,00	0,66****	0,5	4,5	1,9	0,6	2,60	1,0

А, лет	N, тыс. экз/га	D, см	H, м	V, м ³ /га	Фитомасса, т/га			
					стволов	ветвей	хвои	корней
30	0,885	6,9	8,1	125	58,7	20,1	23,40	23,2
80	0,415	35,4	29,6	560	198,1	42,5	18,70	81,9
Ремезов и др., 1959 (54)								
38	3,950	9,0	12,5	169	71,9	6,3	7,10	28,8
60	1,940	14,2	20,3	400	170,5	10,3	10,90	63,4
72	1,244	17,9	22,0	415	176,8	10,8	9,10	56,6
93	1,124	22,5	26,8	619	263,9	14,9	11,60	76,1
51	1,615	17,0	20,6	364	154,9	20,3	15,50	60,9
83	0,725	25,9	26,9	427	182,0	27,0	15,00	61,5
115	0,424	32,0	29,6	419	178,6	19,4	10,70	53,3
Абражко, 1973; Алексеев и др., 1973 (55)								
110	0,678	26,7	26,5	455	168,5	23,5	12,50	68,1
110	1,235	17,8	19,3	294	126,3	20,6	11,30	69,1
120	1,237	13,4	13,7	137	78,0	12,7	5,40	39,7
Ермаков, Асютин, 1988 (51)								
15	18,180	2,3	3,8	32	13,4	6,8	7,30	7,6
27	10,216	5,2	8,8	105	46,3	18,5	17,20	26,3
30	6,750	6,7	10,2	122	54,1	24,8	19,30	31,3
35	3,146	10,0	14,1	194	87,2	30,6	21,80	52,4
51	1,528	15,9	19,4	299	133,9	40,4	20,20	83,5
62	0,669	24,6	23,1	363	162,5	52,9	11,20	105,1
75	0,647	25,1	26,7	421	186,6	53,1	10,90	125,3
90	0,378	33,2	27,7	438	196,1	58,0	8,50	130,4
Головенко и др., 1981 (57)								
60	2,128	7,6	16,0	500	213,0	17,4	6,38	59,3
80	0,675	34,3	27,3	616	262,4	42,6	12,40	89,2
80	0,600	31,8	27,0	589	250,9	40,7	11,80	75,4
90	0,534	23,5	25,2	439	187,0	30,7	8,94	64,7
90	0,507	34,0	29,0	506	215,5	34,9	10,20	73,2
93	0,824	22,5	25,2	625	266,1	28,6	6,57	48,4
Бойко и др., 1975 (50)								
70	1,277	25,3	26,0	285	96,0	11,8	14,84	34,9
90	1,067	19,0	27,7	345	130,0	16,7	16,81	45,2
80	0,895	20,1	27,0	430	159,7	19,4	20,41	55,4
80	1,061	16,0	19,5	215	79,5	11,1	11,16	28,9
Писаренко и др., 1979 (59)								
28	1,742	13,5	15,3	251	64,0	18,0	22,00	19,0
28	3,264	10,5	12,4	221	73,0	11,0	16,00	18,0

Электронный архив УГЛТУ

Продолжение приложения 8

А, лет	N, тыс. экз/га	D, см	H, м	V, м³/га	Фитомасса, т/га			
					стволов	ветвей	хвои	корней
28	4,717	7,8	10,6	176	61,0	9,0	19,00	15,0
Смирнов, 1971 (60)								
85	0,594	27,4	22,5	378	161,8	30,1	17,10	46,3
Уткин, Дылис, 1966 (61)								
85	0,796	24,0	23,6	413	176,1	24,6	16,70	63,5
Письмеров и др., 1979 (63)								
21	7,036	5,7	7,5	86,2	27,8	2,07	1,10	10,0
15	6,755	4,3	5,6	37,1	13,9	3,15	1,64	5,0
Смирнов, 1971 (53)								
21	13,591	4,1	6,8	68	24,2	7,5	6,30	8,6
26	8,358	8,2	8,7	117	39,8	13,2	9,20	13,6
75	0,539	28,6	26,6	438	194,3	27,4	12,80	—
Нестеров др., 1967 (56)								
64	0,640	25,8	25,8	331	135,4	24,3	13,00	—
70	0,692	27,7	26,3	530	178,2	29,6	9,30	—
73	0,540	29,3	27,0	487	151,8	20,7	6,30	—
Гульбе, Рождественский, 1985 (58)								
27	3,900	11,3	13,0	232	98,80	17,0	16,80	—
Дылис, Носова, 1977 (62)								
85	0,742	24,0	22,6	361	204,8	33,3	27,40	—
89	0,717	26,4	22,4	349	184,7	17,6	17,60	—
93	0,490	25,0	27,0	220	139,8	15,3	11,40	—
Валетов, 1988 (49)								
65	0,808	20,1	23,0	414	124,9	18,8	5,40	—
65	1,205	19,2	17,8	249	88,4	9,9	3,70	—
60	1,252	17,2	17,3	218	53,5	8,9	2,90	—
55	1,265	14,3	12,2	174	25,4	4,5	1,20	—
75	1,185	18,8	15,6	259	67,8	10,2	3,90	—
55	1,730	13,3	13,1	185	40,3	7,0	3,20	—
Дюкарев и др., 1971 (40)								
36	10,300	12,1	14,7	61	27,9	7,04	4,50	—
64	3,160	11,5	9,9	243	111,4	18,0	9,00	—
94	1,360	17,6	15,6	365	167,5	24,5	12,30	—
121	0,770	26,7	20,8	444	203,6	27,7	12,80	—
133	0,600	30,6	24,2	477	218,8	28,8	12,20	—
149	0,550	29,7	24,5	471	216,0	28,9	11,40	—
100	3,190	12,7	12,7	267	122,8	18,2	10,10	—

А, лет	N, тыс. экз/га	D, см	H, м	V, м³/га	Фиттомасса, т/га			
					стволов	ветвей	хвои	корней
Широколиственные леса								
<i>Ель — IVP; 113 пробных площадей</i>								
Carey, O'Brien, 1979 (103)								
33	3,760	15,9	15,9	586	219,2	34,5	14,60	56,5
Ford, 1982 (104)								
17	3,817	9,4	8,0	110	56,3	25,0	26,6	25,0
Devillez et al., 1973 (65)								
39	1,156	20,5	19,4	282	86,4	12,0	22,72	37,8
Kestemont et al., 1977 (64)								
55	1,065	22,3	19,0	449	167,9	16,6	16,10	70,0
Ellenberg et al., 1986 (66)								
38	1,490	16,5	15,5	252	89,7	16,3	16,45	29,6
43	1,330	18,7	18,4	329	115,1	19,9	20,10	37,7
48	1,130	21,0	20,2	400	135,6	22,6	22,70	44,3
85	0,595	30,3	24,3	512	186,3	26,8	17,40	66,6
90	0,564	32,1	25,8	566	206,9	28,9	17,80	76,2
95	0,545	33,4	26,4	602	223,1	30,5	18,10	83,9
113	0,300	39,3	31,1	525	186,9	23,7	12,40	75,2
118	0,284	41,2	31,9	553	200,8	24,9	12,50	82,7
123	0,284	42,6	32,0	592	219,5	26,6	13,00	92,0
DeAngelis et al., 1981 (67)								
87	0,595	31,0	24,9	530	198,4	28,2	17,90	71,7
115	0,300	40,0	31,3	523	195,7	24,6	12,70	74,9
40	1,490	17,4	17,5	281	105,1	18,7	18,90	34,6
Feger et al., 1991 (69)								
100	0,664	27,3	25,20	499	203,0	27,0	20,00	65,5
Černý, 1990 (74)								
57	1,615	19,4	21,2	497	240,0	22,7	18,90	55,0
78	0,643	32,2	29,6	637	277,5	33,9	20,80	88,2
106	0,504	34,8	30,2	577	247,2	32,8	18,90	91,6
Vinš, Šika, 1981 (75)								
93	0,850	25,4	25,8	573	171,2	28,9	20,60	52,5
Vinš, Šika, 1977 (76)								
96	0,435	33,4	17,2	350	132,9	30,2	22,20	54,9
82	0,667	29,2	20,4	369	140,2	27,7	14,60	58,5

Электронный архив УГЛТУ

Продолжение приложения 8

А, лет	N, тыс. экз/га	D, см	H, м	V, м³/га	Фитомасса, т/га			
					стволов	ветвей	хвои	корней
88	0,909	20,4	23,3	336	127,8	26,7	19,40	71,9
61	1,000	19,5	21,5	354	134,5	28,9	19,20	61,4
Vyskot, 1980, 1981 (78)								
25	2,500	11,0	10,2	120	52,5	17,2	9,50	8,1
52	1,004	21,8	22,1	483	214,4	17,4	17,00	40,1
68	1,332	19,5	20,7	507	219,4	33,1	20,90	40,5
Vyskot, 1990 (77)								
123	0,230	48,9	31,5	679	253,8	36,9	11,10	183,1
Грозева и др., 1986 (92)								
90	0,385	36,0	26,6	773	296,4	58,6	45,40	119,3
Антонов, 1991 (93)								
120	0,610	34,0	23,6	579	216,4	43,6	18,90	58,2
100	0,600	38,0	31,6	1000	405,3	50,5	21,80	101,2
Малиновский, Колищук, 1971 (87)								
20	9,540	5,6	6,4	104	38,9	7,77	9,83	12,9
Голубец, Половников, 1975 (85)								
35	2,763	9,8	9,8	145	47,0	13,3	13,60	17,3
50	1,825	14,7	14,4	360	143,1	13,3	15,30	24,2
80	0,835	21,8	19,8	482	176,2	17,7	13,50	26,0
120	0,370	33,4	23,4	518	198,4	31,6	12,20	44,4
120	0,582	25,4	19,8	440	187,6	40,8	15,90	50,9
120	0,757	21,0	19,0	355	153,4	28,5	18,00	51,8
65	0,801	20,8	23,3	525	199,3	16,2	11,90	22,7
65	0,534	24,0	24,9	486	187,0	15,5	8,70	16,1
65	0,461	24,3	25,3	431	167,9	17,7	8,70	14,3
50	1,634	15,0	12,2	265	99,6	29,7	20,20	34,9
55	0,796	22,3	23,8	617	221,3	20,7	13,10	23,6
50	1,088	19,6	20,2	540	197,1	16,7	10,60	13,6
50	1,503	16,8	16,6	406	145,2	14,9	13,10	15,5
30	1,997	11,9	13,3	253	81,2	6,2	7,00	12,2
30	2,685	11,6	12,5	332	112,4	7,5	9,20	14,0
30	3,979	10,6	11,1	218	60,3	6,1	6,70	7,8
Калинин, 1983 (86)								
5	6,000	1,2****	0,47	0,4	0,14	0,17	0,28	0,13
10	5,000	2,6	2,75	12	4,67	2,8	3,16	3,24
Пастернак, Чернявский, 1977 (88)								
20	16,733	5,9	7,4	153	53,2	10,1	10,50	30,1
20	16,523	6,1	6,5	127	43,1	10,6	8,40	38,6
20	28,889	3,3	3,9	92	40,5	6,1	5,80	21,1

А, лет	N, тыс. экз/га	D, см	H, м	V, м ³ /га	Фитомасса, т/га			
					стволов	ветвей	хвои	корней
Чернявский, 1976 (84)								
89	1,907	27,5	23,1	719	283,6	31,5	25,20	78,9
80	0,900	38,2	30,5	763	316,2	35,1	23,50	87,3
90	1,324	32,2	28,2	618	264,4	30,5	22,50	81,2
90	1,768	34,5	26,8	827	367,7	33,5	21,10	91,9
Розанова, 1960; Уткин, 1970 (90)								
27	3,276	11,5	10,5	224	83,6	23,9	21,60	41,3
Ремезов и др., 1959 (91)								
45	1,573	14,5	17,0	230	86,0	10,9	6,80	44,6
Raisch, 1983 (68)								
130	0,320	37,0	27,0	461	167,8	33,1	18,20	—
75	1,078	25,0	20,0	497	180,5	41,2	27,40	—
50	2,488	15,0	14,0	335	122,0	28,1	18,60	—
25	4,077	7,0	5,4	61	26,2	16,9	13,70	—
15	3,333	5,0	4,9	27	11,6	9,61	9,53	—
Dietrich, 1968 (72)								
65	1,629	14,5	13,4	198	92,2	10,7	6,51	—
Klapfenbauer, Buchleitner, 1981 (71)								
100	0,561	35,2	29,5	845	316,0	22,7	17,60	—
Fiedler, 1987 (73)								
90	0,652	27,0	25,2	464	197,5	16,4	10,80	—
100	0,678	27,4	26,8	492	209,3	17,8	11,70	—
Droste zu Huelshoff, 1969 (70)								
76	0,802	30,2	27,5	728	268	28,3	15,90	—
Lakida et al., 1995 (89)								
90	0,454	38,5	36,5	778	305,0	17,1	14,00	—
64	0,516	35,0	31,4	734	258,0	18,4	11,00	—
30	1,160	21,7	19,1	372	121,0	20,5	16,70	—
38	1,128	24,8	22,9	575	188,0	35,7	21,80	—
82	0,402	48,3	36,0	742	281,0	17,8	11,90	—
70	0,582	34,6	32,6	682	245,0	12,9	7,50	—
45	1,049	26,6	25,3	537	178,0	14,4	12,40	—
82	0,560	33,2	30,9	679	257,0	23,7	17,00	—
68	0,781	32,0	29,0	741	264,0	11,8	10,40	—
32	1,971	17,0	18,4	338	110,0	21,7	15,50	—

Электронный архив УГЛТУ

Продолжение приложения 8

А, лет	N, тыс. экз/га	D, см	H, м	V, м ³ /га	Фитомасса, т/га			
					стволов	ветвей	хвои	корней
32	2,716	15,5	17,8	310	101,0	21,4	18,90	—
16	3,400	7,6	6,3	32	11,0	12,7	11,30	—
28	3,850	10,8	11,9	219	71,0	14,7	11,60	—
33	3,985	10,1	9,6	187	61,0	17,4	14,40	—
30	5,400	8,3	7,9	162	53,0	19,6	12,80	—
104	0,242	46,4	38,6	556	234,0	30,5	19,50	—
20	5,653	6,7	7,8	63	21,0	7,7	7,40	—
33	3,248	10,4	12,2	196	63,0	11,9	11,60	—
35	2,065	13,3	13,9	212	69,0	9,8	7,20	—
17	7,420	4,3	3,8	27	9,0	6,1	6,90	—
26	2,740	10,8	10,6	142	46,0	11,6	11,10	—
33	2,900	13,8	16,3	374	122,0	16,8	13,10	—
35	3,360	14,7	17,2	419	136,0	12,5	12,60	—
31	3,167	12,2	12,2	207	67,0	15,8	13,20	—
12	2,650	6,0	5,1	23	8,0	4,9	9,40	—
19	4,150	6,9	6,2	52	17,0	7,9	13,40	—
11	2,600	3,7	3,1	9	3,0	3,9	6,50	—
17	2,417	5,8	4,8	20	7,0	4,6	7,60	—
22	3,813	9,1	8,9	93	30,0	10,9	16,10	—
42	1,708	23,0	21,3	511	168,0	23,5	17,40	—
135	0,512	39,5	31,2	649	323,0	23,3	15,60	—
41	1,280	20,4	21,8	403	132,0	14,5	13,70	—
23	3,453	7,8	6,6	57	19,0	15,5	13,00	—
32	4,607	15,5	15,7	399	130,0	46,7	25,10	—
59	1,035	24,5	23,4	384	133,0	17,3	9,60	—
48	2,136	17,5	19,3	326	109,0	17,9	11,40	—
95	0,892	30,8	31,1	872	351,0	16,6	9,60	—
Sato, 1971 (94)								
47	0,488	29,1	23,5	427	208,6	16,7	18,60	—
46	0,756	20,0	18,3	244	119,3	14,1	14,40	—
46	0,756	20,5	18,3	252	123,2	18,5	14,70	—
45	0,914	17,3	15,6	193	94,1	12,2	16,90	—
39	2,240	17,2	16,5	386	188,5	8,57	23,90	—
Yoshimura, 1967 (101)								
30	1,072	22,2	15,3	269	120,2	31,3	24,60	—
Пихта — IVA; 43 пробных площади								
Одинак и др., 1986 (82)								
55	1,096	21,2	21,3	323	140,2	10,5	10,10	40,4
60	0,826	24,7	24,9	506	230,4	20,6	11,30	58,6

Электронный архив УГЛТУ

Продолжение приложения 8

А, лет	N, тыс. экз/га	D, см	H, м	V, м³/га	Фитомасса, т/га			
					стволов	ветвей	листв	корней
Калинин, 1983 (83)								
18	5,640	6,5	5,4	46	17,70	7,9	6,45	5,6
Tadaki et al., 1967, 1970 (100)								
75	3,179	15,5	13,6	516	190,2	15,7	16,70	61,8
55	9,700	7,6	6,8	285	107,6	15,5	17,60	36,9
20	19,500	4,3	4,5	114	45,7	8,67	13,95	16,3
90	1,204	24,0	16,3	568	205,7	32,3	18,80	54,2
43	3,814	12,8	10,1	341	129,2	16,9	13,30	40,6
23	2,076	13,1	8,5	138	45,0	17,0	21,30	25,9
25	12,106	5,5	5,3	117	42,1	13,6	18,30	17,5
Ando et al., 1977 (102)								
120	0,288	47,5	26,3	777	301,7	56,4	14,90	113,8
Bindiu, 1973 (цит. по: DeAngelis et al., 1981) (81)								
110	0,485	44,8	36,0	1000	405,5	37,8	26,70	—
Sato, 1974 (96)								
26	2,400	13,9	10,9	166	64,00	16,3	14,80	—
Hellrigl, 1974; Cantiani, 1974 (80)**								
20	2,548	11,0	9,2	173	64,7	15,0	6,60	—
25	2,180	13,7	11,6	249	92,8	17,9	9,60	—
30	1,902	15,9	13,9	335	124,8	20,0	10,00	—
35	1,679	18,2	15,8	416	154,9	21,6	13,30	—
40	1,500	20,2	17,7	500	186,2	23,8	14,30	—
45	1,320	22,5	19,3	580	216,1	25,7	15,50	—
50	1,189	24,4	20,9	655	243,8	28,2	15,80	—
55	1,060	26,5	22,2	723	269,1	30,3	16,40	—
60	0,940	28,6	23,5	786	292,6	32,5	16,70	—
65	0,821	31,0	24,6	844	314,2	34,3	16,80	—
70	0,759	32,8	25,6	896	333,4	36,0	17,40	—
75	0,694	34,7	26,5	943	351,0	37,8	17,50	—
80	0,633	36,7	27,2	986	366,9	39,4	17,50	—
85	0,594	38,3	27,9	1025	381,3	40,9	17,60	—
90	0,549	40,2	28,5	1060	394,4	42,2	17,70	—
95	0,512	41,9	29,0	1095	406,1	43,4	17,80	—
Vyskot, 1972, 1973 (79)								
51	1,667	11,9	14,2	216	103,8	18,7	6,80	14,7
Yamamoto, Sanada, 1970 (95)								
8	2,870	2,8****	1,0	0,8	0,3	0,3	0,40	—

Окончание приложения 8

A, лет	N, тыс. экз/га	D, см	H, м	V, м³/га	Фитомасса, т/га			
					стволов	ветвей	хвои	корней
12	2,726	5,0	3,8	22	8,5	2,6	4,20	—
23	1,849	11,0	8,2	86	33,1	8,6	11,30	—
29	1,427	15,0	10,4	125	48,1	15,8	13,40	—
35	1,178	23,0	16,2	321	123,6	50,6	22,00	—
Oohata, Oniishi, 1974 (98)								
100	2,850	12,2	2,9	60	23,0	8,3	4,20	—
100	2,325	17,9	4,2	235	90,4	31,8	13,20	—
100	2,400	14,1	3,4	106	40,9	14,9	7,30	—
Kimura, 1963 (97)								
70	4,625	13,0	11,0	400	154,0	28,0	21,00	55,0
Tadaki et al., 1977 (99)								
36	96,000	1,1	2,6	179	74,9	10,6	17,10	—
65	20,800	6,2	5,4	230	97,2	12,2	13,60	—
96	10,200	9,1	7,4	307	130,3	15,7	14,30	—
126	4,133	12,7	8,1	232	92,2	11,3	8,30	—

*При неполной таксационной характеристике пробных площадей недостающие таксационные показатели были получены автором расчетным путем (когда это было возможно).

**Показатели фитомассы получены по данным 123 модельных деревьев шхты белой в возрасте от 27 до 105 лет путем расчета регрессий по D и H с последующим использованием распределений числа деревьев на 1 га по ступеням D и H (см. Hellrigl, 1974; Santiani, 1974).

***Значения D, H и N взяты из диссертации И. Е. Кузикова (фонды КГТУ).

****Диаметр у шейки корня.

Приложение 9

Эскиз таблицы биологической продуктивности словых древостоев подзоны северной тайги (IP) северо-востока европейской части России, совмещенной с ТХР полных одновозрастных ельников III класса бонитета для северотаежного лесотаксационного подрайона (Лесотаксационный справочник..., 1986; табл. 5.1.12), в абсолютно сухом состоянии

А, лет	D, см	H, м	N/1000, экз/га	V, м³/га	Фитомасса, т/га					
					стволов в коре	ветвей в коре	хвои	надземная	корней	всего
40	9,7	9,4	2,585	99	40,0	9,1	6,0	55,1	13,1	68,2
50	12,0	12,2	2,104	151	61,2	11,0	6,8	79,0	19,0	98,0
60	14,2	14,6	1,755	204	83,1	12,8	7,5	103,4	25,0	128,4
70	16,5	17,0	1,464	261	106,7	14,6	8,1	129,4	31,6	161,0
80	17,9	18,6	1,347	306	125,8	16,0	8,5	150,3	37,3	187,6
90	19,7	19,8	1,178	341	140,9	17,6	8,9	167,4	42,3	209,7
100	21,4	20,6	1,043	369	153,4	19,2	9,3	181,9	46,9	228,8
120	24,0	22,2	0,882	420	176,3	22,1	10,1	208,5	55,7	264,2
140	25,8	23,3	0,796	457	193,7	24,5	10,7	228,9	63,2	292,1
160	27,2	24,1	0,695	457	195,7	25,5	10,8	232,0	66,6	298,6
180	28,3	24,7	0,583	424	183,7	24,9	10,3	218,9	65,7	284,6
200	29,2	25,2	0,481	379	166,2	23,7	9,5	199,4	62,5	261,9

Приложение 10

Эскиз таблицы биологической продуктивности ельника кисличного подзоны средней и южной тайги (IP) северо-востока европейской части России, совмещенной с ТХР полных одновозрастных древостоев III класса бонитета для среднетаежного лесотаксационного подрайона (Лесотаксационный справочник..., 1986; табл. 5.1.11), в абсолютно сухом состоянии

А, лет	D, см	H, м	N/1000, экз/га	V, м³/га	Фитомасса, т/га					
					стволов в коре	ветвей в коре	хвои	надземная	корней	всего
30	5,9	6,3	4,974	53	25,2	4,9	4,6	34,7	7,8	42,5
40	8,9	9,2	3,006	95	44,8	6,6	5,7	57,1	12,7	69,8
50	12,2	12,4	2,070	155	71,8	9,2	7,3	88,3	19,4	107,7
60	14,9	15,3	1,657	220	100,2	12,1	9,1	121,4	26,5	147,9
70	16,9	17,3	1,427	271	121,9	14,4	10,3	146,6	32,6	179,2
80	18,6	18,7	1,259	310	138,2	16,2	11,1	165,5	37,8	203,3
90	20,4	19,9	1,096	341	150,7	17,6	11,5	179,8	42,4	222,2
100	22,0	20,8	0,984	371	163,0	19,1	12,0	194,1	47,2	241,3
120	24,4	22,2	0,847	415	180,5	21,8	12,9	215,2	55,3	270,5
140	26,1	23,1	0,766	447	193,2	24,2	13,6	231,0	62,3	293,3
160	27,4	23,9	0,673	450	193,5	25,1	13,4	232,0	65,9	297,9
180	28,5	24,4	0,571	415	177,5	23,9	12,3	213,7	64,8	278,5
200	29,2	24,9	0,476	371	158,0	22,1	11,0	191,1	61,6	252,7

**Эскиз таблиц биологической продуктивности сомкнутых еловых древостоев
подзоны средней тайги уральского региона, совмещенных с ТХР
Д. В. Миловановича (1928) для бывшего Нижне-Тагильского округа,
в абсолютно сухом состоянии**

А, лет	Н, м	D, см	N/1000, экз/га	V, м ³ /га	Фитомасса, т/га					
					стволов в коре	ветвей в коре	хвои	надзем- ная	корней	всего
II класс бонитета										
30	9,9	7,4	5,557	122	57,0	12,0	14,5	83,5	14,6	98,1
50	15,5	13,4	2,170	227	103,1	13,7	14,7	131,5	25,8	157,3
70	20,1	19,2	1,226	332	146,5	16,9	16,3	179,7	38,0	217,7
90	23,5	24,3	0,838	422	182,2	20,4	17,9	220,5	50,1	270,6
110	25,6	28,3	0,655	483	205,4	23,6	19,1	248,1	60,4	308,5
130	26,5	31,1	0,556	512	216,1	25,8	19,7	261,6	67,9	329,5
150	27,1	33,4	0,488	530	222,4	27,9	20,1	270,4	74,5	344,9
170	27,4	35,0	0,450	540	225,8	29,8	20,4	276,0	80,1	356,1
III класс бонитета										
30	8,0	6,6	5,846	82	38,4	8,3	10,3	57,0	11,0	68,0
50	13,0	11,5	2,522	164	75,4	10,5	11,6	97,5	20,3	117,8
70	16,9	16,5	1,441	244	109,6	13,0	13,0	135,6	30,3	165,9
90	20,0	21,5	0,928	313	137,7	15,5	14,0	167,2	40,0	207,2
110	22,5	25,4	0,707	372	161,0	18,4	15,3	194,7	49,3	244,0
130	23,9	28,0	0,604	410	175,7	20,9	16,4	213,0	56,9	269,9
150	24,8	29,7	0,550	436	185,7	23,3	17,2	226,2	63,3	289,5
170	25,3	30,7	0,520	448	190,1	25,0	17,8	232,8	68,1	300,9
IV класс бонитета										
30	5,4	5,8	6,018	44	20,7	4,5	5,8	31,0	7,2	38,2
50	10,1	10,0	2,852	112	52,3	7,5	8,5	68,3	15,5	83,8
70	13,6	13,5	1,908	180	82,5	10,5	10,8	103,8	24,1	127,9
90	16,3	16,9	1,364	241	108,8	13,1	12,4	134,3	32,6	166,9
110	18,1	19,9	1,035	282	125,8	15,0	13,2	154,0	39,5	193,5
130	19,3	22,1	0,865	309	136,7	16,7	13,7	167,1	45,2	212,3
150	20,1	23,8	0,762	328	144,3	18,2	14,2	176,7	50,1	226,8
170	20,6	25,1	0,695	340	148,9	19,5	14,5	182,9	54,3	237,2

**Сопоставление запасов фитомассы пихты Урала (1) и Сибири (2),
рассчитанных по моделям (192)—(194) и (188) на базе ТХР
нормальных пихтовых посадений Уфимского плато (Башкирия)
по классам бонитета (Лесотаксационный справочник..., 1991; табл. 5.17),
в абсолютно сухом состоянии**

А, лет	Н, м	D, см	N/1000, экз/га	V, м³/га	Фитомасса, т/га		
					стволов		ветвей
					(1), (2)	(1)	
II класс бонитета							
60	17,6	18,9	1,378	322	100,5	20,8	11,6
70	19,7	21,8	1,115	378	117,5	24,2	13,5
80	21,6	24,7	0,921	428	132,8	27,4	15,2
90	23,4	27,3	0,793	478	148,6	30,9	17,2
100	24,8	29,7	0,695	520	162,3	34,2	19,1
110	25,8	32,0	0,614	548	172,2	36,9	20,5
120	26,5	34,0	0,553	571	181,1	39,6	22,0
130	26,7	35,5	0,509	576	185,0	41,4	23,0
III класс бонитета							
50	13,0	13,1	2,348	205	65,5	15,8	8,8
60	15,0	15,2	1,917	249	79,6	18,8	10,5
70	17,0	18,6	1,412	297	94,4	21,2	11,8
80	18,8	21,4	1,111	340	107,9	24,1	13,4
90	20,4	24,0	0,916	383	121,6	27,3	15,2
100	21,5	26,4	0,777	412	131,4	29,7	16,5
110	22,4	28,5	0,678	438	140,6	32,3	18,0
120	22,8	30,3	0,610	448	145,4	33,9	18,9
130	23,0	31,8	0,562	453	149,1	35,3	19,7
IV класс бонитета							
70	12,8	13,3	2,259	190	65,0	17,3	9,6
80	14,2	16,0	1,672	220	74,6	19,1	10,6
90	15,6	18,5	1,331	252	85,3	21,3	11,9
100	16,7	20,7	1,113	279	94,8	23,5	13,1
110	17,7	22,6	0,965	303	103,7	25,7	14,3
120	18,3	24,3	0,854	319	110,4	27,4	15,3
130	18,5	25,5	0,781	324	114,1	28,7	16,0

Электронный архив УГЛТУ

Окончание приложения 12

А, лет	Фитомасса, т/га						
	хвощ		надрезанная		корней	всего	
	(1)	(2)	(1)	(2)	(1), (2)	(1)	(2)
II класс бонитета							
60	12,4	7,7	133,7	119,8	20,4	154,1	140,2
70	14,1	8,8	155,6	139,8	24,3	179,9	164,1
80	15,5	9,7	175,7	157,7	28,1	203,8	185,8
90	16,9	10,5	196,4	176,3	32,0	228,4	208,3
100	18,1	11,3	214,6	192,7	35,7	250,3	228,4
110	19,0	11,9	228,1	204,6	38,8	266,9	243,4
120	19,8	12,4	240,5	215,5	41,7	282,2	257,2
130	20,4	12,7	246,8	220,7	43,6	290,4	264,3
III класс бонитета							
50	9,5	6,0	90,8	80,3	13,8	104,6	94,1
60	11,2	7,0	109,6	97,1	16,8	126,4	113,9
70	12,7	7,9	128,3	114,1	20,3	148,6	134,4
80	14,1	8,8	146,1	130,1	23,6	169,7	153,7
90	15,6	9,7	164,5	146,5	27,0	191,5	173,5
100	16,6	10,4	177,7	158,3	29,8	207,5	188,1
110	17,6	11,0	190,5	169,6	32,5	223,0	202,1
120	18,1	11,3	197,4	175,6	34,4	231,8	210,0
130	18,6	11,6	203,0	180,4	36,1	239,1	216,5
IV класс бонитета							
70	10,9	6,8	93,2	81,4	14,5	107,7	95,9
80	12,1	7,5	105,8	92,7	17,0	122,8	109,7
90	13,2	8,3	119,8	105,5	19,7	139,5	125,2
100	14,3	8,9	132,6	116,8	22,2	154,8	139,0
110	15,3	9,5	144,7	127,5	24,6	169,3	152,1
120	16,0	10,0	153,8	135,7	26,6	180,4	162,3
130	16,5	10,3	159,3	140,4	27,8	187,1	168,2

Эскиз таблицы биологической продуктивности пихтарников сибирского подрегиона подзоны средней и южной тайги, совмещенной с ТХР пихтовых древостоев Восточно-Саянской провинции III класса бонитета (Ход роста..., 1975; табл. 100), в абсолютно сухом состоянии

A, лет	H, м	D, см	N/1000, экз/га	V, м³/га	Фитомасса, т/га					
					стволов в коре	ветвей в коре	хвои	надземная	корней	всего
50	14,6	15,1	1,184	171	56,5	7,5	5,4	69,4	11,4	80,8
70	17,5	19,4	0,819	217	69,9	9,5	6,7	86,1	15,3	101,4
90	19,7	21,9	0,695	246	79,1	11,6	7,5	98,2	18,5	116,7
110	20,8	23,5	0,622	273	89,5	13,9	8,5	111,9	21,5	133,4
130	21,6	24,5	0,596	284	96,8	15,6	9,1	121,5	23,8	145,3
150	22,3	25,3	0,479	251	88,1	15,6	8,6	112,3	22,6	134,9

Эскиз таблицы биологической продуктивности сомкнутых пихтовых древостоев подзоны средней тайги уральского региона, совмещенных с ТХР Д. В. Миловановича (1928) для бывшего Нижне-Тагильского округа, в абсолютно сухом состоянии

A, лет	H, м	D, см	N/1000, экз/га	V, м³/га	Фитомасса, т/га					
					стволов в коре	ветвей в коре	хвои	надземная	корней	всего

II класс бонитета

30	9,9	7,4	5,557	122	39,1	11,8	5,6	56,5	8,2	64,7
50	15,5	13,4	2,170	227	71,7	17,4	9,7	98,8	14,5	113,3
70	20,1	19,2	1,226	332	103,8	23,8	13,2	140,8	21,5	162,3
90	23,5	24,3	0,838	422	131,9	30,4	16,1	178,4	28,3	206,7
110	25,6	28,3	0,655	483	152,9	36,2	18,2	207,3	34,1	241,4
130	26,5	31,1	0,556	512	166,2	40,9	19,7	226,8	38,4	265,2
150	27,1	33,4	0,488	530	177,4	45,2	20,9	243,5	42,1	285,6
170	27,4	35,0	0,450	540	188,2	49,2	21,9	259,3	45,2	304,5

III класс бонитета

30	8,0	6,6	5,846	82	26,9	9,1	4,6	40,6	6,2	46,8
50	13,0	11,5	2,522	164	53,1	14,4	8,4	75,9	11,5	87,4
70	16,9	16,5	1,441	244	78,3	19,8	11,5	109,6	17,1	126,7
90	20,0	21,5	0,928	313	100,2	24,9	14,1	139,2	22,6	161,8
110	22,5	25,4	0,707	372	120,4	30,5	16,2	167,1	27,8	194,9

А, лет	Н, м	D, см	N/1000, экз/га	V, м³/га	Фитомасса, т/га					
					стволов в коре	ветвей в коре	хвои	надземная	корней	всего
130	23,9	28,0	0,604	410	136,2	35,5	17,8	189,5	32,1	221,6
150	24,8	29,7	0,550	436	150,4	40,2	19,3	209,9	35,8	245,7
170	25,3	30,7	0,520	448	162,1	44,4	20,4	226,9	38,5	265,4

IV класс бонитета

30	5,4	5,8	6,018	44	15,0	5,7	3,5	24,2	4,1	28,3
50	10,1	10,0	2,852	112	37,3	11,2	7,1	55,6	8,8	64,4
70	13,6	13,5	1,908	180	60,2	16,9	10,4	87,5	13,6	101,1
90	16,3	16,9	1,364	241	81,7	22,3	13,2	117,2	18,4	135,6
110	18,1	19,9	1,035	282	97,5	26,7	15,3	139,5	22,3	161,8
130	19,3	22,1	0,865	309	110,6	30,6	16,8	158,0	25,5	183,5
150	20,1	23,8	0,762	328	122,6	34,2	18,1	174,9	28,3	203,2
170	20,6	25,1	0,695	340	133,5	37,5	19,1	190,1	30,6	220,7

Приложение 15

Эскиз таблицы биологической продуктивности ельников подзоны широколиственно-темнохвойных лесов, совмещенной с ТХР нормальных словых древостоев Белоруссии кисличного типа леса Ia класса бонитета (Нормативные материалы..., 1984; табл. 41), в абсолютно сухом состоянии

А, лет	H, м	D, см	N/1000, экз/га	V, м³/га	Фитомасса, т/га					
					стволов в коре	ветвей в коре	хвои	надземная	корней	всего
20	8,6	7,0	4,885	89	34,4	9,8	10,7	54,9	14,0	68,9
30	13,0	11,1	2,842	183	71,4	14,7	13,6	99,7	25,5	125,2
40	17,1	14,9	1,973	290	113,9	18,8	15,3	148,0	38,4	186,4
50	20,2	18,2	1,491	379	150,2	21,9	16,2	188,3	50,0	238,3
60	23,0	21,3	1,181	463	184,9	24,8	16,8	226,5	61,7	288,2
70	25,6	24,0	0,984	539	216,8	27,2	17,2	261,2	72,9	334,1
80	27,8	26,4	0,844	604	244,5	29,4	17,6	291,5	83,4	374,9
90	29,8	28,6	0,738	661	269,3	31,5	17,9	318,7	93,4	412,1
100	31,6	30,5	0,662	713	292,2	33,5	18,3	344,0	103,0	447,0
110	33,0	32,3	0,599	753	310,3	35,5	18,6	364,4	111,7	476,1
120	34,2	33,8	0,553	787	326,1	37,4	19,0	382,5	119,8	502,3
130	35,2	35,2	0,514	815	339,4	39,4	19,4	398,2	127,4	525,6
140	35,9	36,4	0,484	838	350,7	41,6	20,0	412,3	134,4	546,7

Приложение 16

Эскиз таблицы биологической продуктивности ельников подзоны широколиственных лесов, совмещенной с ТХР полных условно-однообразных древостоев среднегорного пояса Украинских Карпат Ia класса бонитета (Нормативно-справочные..., 1987; табл. 3.2.6), в абсолютно сухом состоянии

А, лет	H, м	D, см	N/1000, экз/га	V, м³/га	Фитомасса, т/га					
					стволов в коре	ветвей в коре	хвои	надземная	корней	всего
20	7,2	6,1	5,784	71	25,7	7,4	8,5	41,6	9,0	50,6
30	13,9	12,3	2,736	229	82,4	13,8	13,6	109,8	22,5	132,3
40	19,5	17,7	1,755	411	148,5	18,8	16,2	183,5	37,3	220,8
50	24,2	22,4	1,279	587	213,3	23,0	17,7	254,0	52,0	306,0
60	28,1	26,5	1,003	741	271,1	26,4	18,5	316,0	65,9	381,9
70	31,3	30,1	0,822	868	319,7	29,5	19,1	368,3	78,5	446,8
80	33,8	33,3	0,696	967	358,7	32,3	19,5	410,5	89,8	500,3
90	35,8	36,2	0,601	1042	389,1	34,9	19,9	443,9	99,9	543,8
100	37,3	38,8	0,530	1098	412,7	37,6	20,2	470,5	108,8	579,3
110	38,4	41,2	0,474	1138	430,5	40,3	20,7	491,5	116,8	608,3
120	39,1	43,4	0,429	1160	441,5	43,1	21,1	505,7	123,7	629,4

Эскиз таблицы биологической продуктивности пихтарников (*A. alba*, *A. Veitchii*, *A. sachalinensis*) подзоны широколиственных лесов, совмещенной с ТХР полных естественных пихтовых древостоев Карпат Ia класса бонитета (Нормативно-справочные..., 1987; табл. 3.2.8), в абсолютно сухом состоянии

А, лет	H, м	D, см	N/1000, экз/га	V, м³/га	Фитомасса, т/га					
					стволов	ветвей	хвои	надземная	корней	всего
Пихта белая										
20	5,7	6,4	3,250	39	15,5	3,5	2,7	21,7	5,6	27,3
40	15,9	16,0	1,945	328	127,8	17,5	10,7	156,0	31,7	187,7
60	24,2	27,0	0,950	656	252,8	27,7	14,4	294,9	61,7	356,6
80	29,8	35,6	0,613	883	341,0	31,4	14,9	387,3	85,3	472,6
100	33,4	41,5	0,474	1027	399,8	31,9	14,2	445,9	107,0	552,9
120	35,4	45,4	0,405	1108	435,8	31,1	13,1	480,0	121,5	601,5
140	36,8	48,5	0,360	1168	463,8	30,1	12,1	506,0	139,4	645,4
Пихта Вича										
20	5,7	6,4	3,250	39	13,9	3,5	4,4	21,8	5,6	27,4
40	15,9	16,0	1,945	328	114,4	17,5	17,6	149,5	31,7	181,2
60	24,2	27,0	0,950	656	226,4	27,7	23,7	277,8	61,7	339,5
80	29,8	35,6	0,613	883	305,5	31,4	24,5	361,4	85,3	446,7
100	33,4	41,5	0,474	1027	358,1	31,9	23,3	413,3	107,0	520,3
120	35,4	45,4	0,405	1108	390,3	31,1	21,5	442,9	121,5	564,4
140	36,8	48,5	0,360	1168	415,4	30,1	19,8	465,3	139,4	604,7
Пихта сахалинская										
20	5,7	6,4	3,250	39	15,5	4,8	5,4	25,7	5,6	31,3
40	15,9	16,0	1,945	328	127,8	24,1	21,5	173,4	31,7	205,1
60	24,2	27,0	0,950	656	252,8	38,0	29,0	319,8	61,7	381,5
80	29,8	35,6	0,613	883	341,0	43,1	29,9	414,0	85,3	499,3
100	33,4	41,5	0,474	1027	399,8	43,8	28,4	472,0	107,0	579,0
120	35,4	45,4	0,405	1108	435,8	42,6	26,2	504,6	121,5	626,1
140	36,8	48,5	0,360	1168	463,8	41,2	24,2	529,2	139,4	668,6

Фрагмент "аэротаблицы" запасов стволовой древесины одновозрастных древостоев пихты дугласовой для северо-запада США (Avery, Burkhart, 1983)

Денцифровочная средняя высота, футы	Запасы древесины (сотни куб. футов на акр) при денцифровочной сомкнутости полого (%)								
	15	25	35	45	55	65	75	85	95
40	5	8	11	13	14	15	15	14	13
60	9	15	20	24	27	29	30	29	28
80	14	24	31	38	43	46	48	49	49
100	21	33	45	54	61	67	72	74	75
120	28	45	60	73	83	92	99	103	106
140	35	57	77	94	108	121	130	138	143
160	44	71	96	118	136	153	166	177	185
180	54	87	117	144	168	188	206	220	232
200	64	104	140	173	202	228	250	269	284
220	75	122	165	204	239	271	298	322	342
240	87	142	192	238	280	317	351	380	406
260	100	163	221	274	323	367	408	443	474

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
Глава 1	
Глобальные экологические аспекты оценки фитомассы лесов	
1.1. ПРОБЛЕМА ИЗМЕНЕНИЯ ГЛОБАЛЬНОГО УГЛЕ- РОДНОГО ЦИКЛА И КЛИМАТА	8
1.2. РЕКОМЕНДАЦИИ ИЮФРО ПО МЕЖДУНАРОДНО- МУ МОНИТОРИНГУ ЛЕСОВ	16
1.2.1. Уровни мониторинга лесов	17
1.2.2. Виды мониторинга	19
1.2.3. Источники информации для мониторинга	21
1.2.4. План выборочного учета	27
1.2.5. Построение инфраструктуры мониторинга	33
1.3. ГЛОБАЛЬНЫЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОГРАММЫ.....	36
Глава 2	
Применение систем связанных регрессионных уравнений при оценке фитомассы лесов	
2.1. ОБЩИЕ ПОНЯТИЯ.....	43
2.1.1. Структурные формы систем связанных уравнений... ..	43
2.1.2. Проблема оценки параметров в одновременных системах.....	48
2.1.3. Проблема идентификации системы одновремен- ных уравнений	54
2.2. СОВМЕСТИМЫЕ СИСТЕМЫ УРАВНЕНИЙ РОСТА И ПРИРОСТА ДРЕВОСТОЕВ	57
2.2.1. Краткая предыстория появления совместимых моделей прироста и роста древостоев.....	58
2.2.2. Совместимые модели наличного запаса и его при- роста в разновозрастных древостоях	61
2.2.3. Совместимые модели запаса и его прироста в раз- новозрастных древостоях	64
2.2.4. Совместимые модели общей производительности и ее прироста в разновозрастных древостоях	69
2.3. РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ОДНОВРЕМЕН- НЫХ СОВМЕСТИМЫХ МОДЕЛЕЙ В ЛЕСОВОДСТ- ВЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ	75

Электронный архив УГЛТУ

2.3.1. Оценка параметров совместимых уравнений роста и прироста древостоев методом максимального правдоподобия.....	75
2.3.2. Оценка параметров несовместимых систем уравнений роста и прироста методами ОМНК, 2МНК и 3МНК.....	78
2.3.3. Оценка параметров совместимых моделей роста и прироста древостоев методом 3МНК.....	86
2.3.4. Продвинутое варианты линейного метода 3МНК для расчета одновременных систем уравнений.....	99
2.4. ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ СВЯЗАННЫХ УРАВНЕНИЙ ПРИ ОТСУТСТВИИ МЕЖРЕГРЕССИОННОЙ КОРРЕЛЯЦИИ ОШИБОК.....	114
2.5. ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМ РЕКУРСИВНЫХ УРАВНЕНИЙ ПРИ ТАКСАЦИИ ФИТОМАССЫ ДРЕВОСТОЕВ.....	120
2.5.1. Рекурсивные взаимосвязи при анализе региональной изменчивости фитомассы древостоев.....	121
2.5.2. Использование рекурсивной системы уравнений для корректной спецификации модели.....	125
2.5.3. Системы рекурсивных уравнений при многоцелевом использовании оценочной модели фитомассы.....	126
2.5.4. Рекурсивная система уравнений как способ согласования оценок фитомассы древостоев по составляющим фракциям.....	128
2.5.5. Система рекурсивных взаимосвязей как способ совмещения оценочной модели фитомассы с традиционными таксационными нормативами и банками данных государственного учета лесного фонда (ГУЛФ).....	130
2.5.6. Система рекурсивных уравнений при оценке предельных запасов фитомассы древостоев.....	132
2.5.7. Рекурсивная система зависимостей как основа параметрического прогнозирования.....	138

Глава 3

Регрессионные модели переводных коэффициентов фитомассы и их применение при составлении эскизов таблиц биопродуктивности древостоев

3.1. ПЕРЕВОДНОЙ КОЭФФИЦИЕНТ.....	142
3.2. МЕТОДЫ СОСТАВЛЕНИЯ ЭСКИЗОВ ТАБЛИЦ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ПРОДУКТИВНОСТИ ДРЕВОСТОЕВ.....	150
3.2.1. Выравнивание показателей фитомассы древостоев одного возрастного ряда.....	150

3.2.2. Совмещение моделей фитомассы деревьев с возрастной динамикой взятых из ТХР показателей среднего дерева и числа стволов на 1 га	151
3.2.3. Совмещение моделей фитомассы деревьев с моделями распределения числа деревьев по толщине в возрастной динамике ТХР	152
3.2.4. Совмещение моделей фитомассы древостоев с ТХР по совокупности массоопределяющих показателей..	155
3.3. ОБОБЩЕННЫЕ МОДЕЛИ ПЕРЕВОДНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ ФИТОМАССЫ И СОСТАВЛЕНИЕ РЕГИОНАЛЬНЫХ ЭСКИЗОВ ТАБЛИЦ БИОПРОДУКТИВНОСТИ ДРЕВОСТОЕВ.....	156
3.3.1. Сосняки Урала и Северного Казахстана.....	156
3.3.2. Березняки Урала и Северного Казахстана.....	166
3.3.3. Осинники на территории бывшего СССР	174
3.3.4. О географических закономерностях распределения фитомассы древостоев	182
3.3.5. Ельники и пихтарники Северной Евразии.....	190

Глава 4

Экстраполяция экспериментальных данных о фитомассе лесов на лесопокрытую площадь региона

4.1. ПОВЫДЕЛЬНАЯ ЭКСТРАПОЛЯЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ ФИТОМАССЫ НА ПЛОЩАДЬ СОСНЯКОВ УЧЕБНО-ОПЫТНОГО ЛЕСХОЗА УГЛТА	207
4.1.1. Сортировка площадей выделов по возрасту и классу бонитета	209
4.1.2. Сортировка площадей выделов по возрасту, классу бонитета, среднему диаметру и густоте древостоев	212
4.2. ПОВЫДЕЛЬНАЯ ЭКСТРАПОЛЯЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ ФИТОМАССЫ НА ПЛОЩАДЬ БЕРЕЗНЯКОВ НЕВЬЯНСКОГО ЛЕСХОЗА СВЕРДЛОВСКОЙ ОБЛАСТИ	217
4.2.1. Регрессионные модели переводных коэффициентов фитомассы березы разных уровней приближения	217
4.2.2. Совмещение регрессионных моделей переводных коэффициентов фитомассы с повыдельным банком данных ГУЛФ.....	219
4.2.3. Расчет систематических ошибок при использовании существующих методов оценки фитомассы.....	223

Электронный архив УГЛТУ

- 4.3. ПРИНЦИПЫ ФОРМИРОВАНИЯ БАНКА ДАННЫХ
О ФИТОМАССЕ ЛЕСОВ ШВЕЙЦАРИИ 229

Глава 5

Моделирование предельных показателей фитомассы древостоев

- 5.1. ОБЩИЕ ПОНЯТИЯ 236
- 5.2. ГУСТОТНЫЕ ТРАЕКТОРИИ ВЕРХНИХ ПРЕДЕЛОВ
ДИАМЕТРА СРЕДНЕГО ДЕРЕВА ДРЕВОСТОЯ 242
- 5.3. ГУСТОТНЫЕ ТРАЕКТОРИИ ВЕРХНИХ ПРЕДЕЛОВ
ВЫСОТЫ СРЕДНЕГО ДЕРЕВА ДРЕВОСТОЯ 245
- 5.4. ГУСТОТНЫЕ ТРАЕКТОРИИ ВЕРХНИХ ПРЕДЕЛОВ
ЗАПАСА СТВОЛОВОЙ ДРЕВЕСИНЫ 251
- 5.5. ГУСТОТНЫЕ ТРАЕКТОРИИ ВЕРХНИХ ПРЕДЕЛОВ
ФИТОМАССЫ ДРЕВОСТОЕВ 263
- 5.6. СОПОСТАВЛЕНИЕ ПРЕДЕЛЬНЫХ И “НОРМАЛЬ-
НЫХ” ГУСТОТНЫХ ТРАЕКТОРИЙ ФИТОМАССЫ... 267

Глава 6

Использование физиологически обусловленных взаимосвязей при формировании банка данных и выявлении региональных различий фитомассы лесов

- 6.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ 273
- 6.2. ПРИМЕНЕНИЕ ПАЙП-МОДЕЛИ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ
БАНКА ДАННЫХ О ФИТОМАССЕ ЛЕСОВ. 280
- 6.3. ИЗМЕНЕНИЕ ПРОДУКТИВНОСТИ ХВОИ В СВЯЗИ
С АТМОСФЕРНЫМ ЗАГРЯЗНЕНИЕМ И ЕГО ОЦЕНКА
НА ОСНОВЕ ПРОДВИНУТОЙ ПАЙП-МОДЕЛИ. 286
- 6.4. ОЦЕНКА ФИТОМАССЫ ПО ВОЗРАСТНЫМ СЛОЯМ
КРОНЫ В ЕСТЕСТВЕННЫХ СОСНЯКАХ И
КУЛЬТУРАХ 292

Глава 7

Исследование структуры и фитомассы лесного полога путем лазерного профилирования

- 7.1. СТАНОВЛЕНИЕ И СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ
ЛАЗЕРНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ 306

7.1.1.	Начальный этап лазерного и радиолокационного зондирования земной поверхности.....	307
7.1.2.	Применение лазера непрерывного действия.....	310
7.1.3.	Применение импульсно-периодического лазера	312
7.1.4.	Лазерное сканирование.....	320
7.1.5.	Некоторые бортовые лазерные системы.....	321
7.2.	МЕТОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ЛАЗЕРНОЙ ОЦЕНКИ МАССООБРАЗУЮЩИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДРЕВОСТОЕВ	328
7.2.1.	Имитация бортовой лазерной съемки в наземных экспериментах.....	328
7.2.2.	Бортовая лазерная оценка массообразующих показателей древостоев.....	343
7.3.	МЕТОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ЛАЗЕРНОЙ ОЦЕНКИ ФИТОМАССЫ ДРЕВОСТОЕВ	379
7.3.1.	Вывод оценочных регрессионных моделей.....	379
7.3.2.	Проверка пригодности регрессионных моделей.....	385
7.3.3.	Регрессионные модели для оценки фитомассы древостоев при их лазерном зондировании.....	396

Глава 8

Лазерная оценка качественных характеристик лесного полога

8.1.	ОЦЕНКА ПОРОДНОГО СОСТАВА И СТРЕССОВЫХ СОСТОЯНИЙ ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМ ПО НАВЕДЕННОЙ ЛАЗЕРОМ ФЛУОРЕСЦЕНЦИИ (НЛФ) ХЛОРОФИЛЛА	420
8.1.1.	Фотосинтез и флуоресценция хлорофилла.....	420
8.1.2.	Переходное и устойчивое состояния флуоресценции.....	421
8.1.3.	Идентификация древесных пород по флуоресцентным спектрам.....	424
8.1.4.	Диагностика стресса растений под влиянием атмосферных загрязнений.....	428
8.1.5.	Диагностика стресса, обусловленного дефицитом элементов питания.....	431
8.1.6.	Диагностика стресса, обусловленного засухой.....	432
8.1.7.	Совмещенная лазерная оценка количественных и качественных характеристик лесного полога.....	434
8.2.	ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ КРОНЫ ПО СТЕПЕНИ ДЕПОЛЯРИЗАЦИИ ЛАЗЕРНОГО СИГНАЛА	436
8.2.1.	Общие сведения.....	436

Электронный архив УГЛТУ

8.2.2. Экспериментальное определение породного состава дровостоев по степени деполяризации лазерного сигнала .	441
Заключение	445
Conclusions	450
Список литературы	455
Приложения	487
Оглавление	530
Contents	536

CONTENTS

Introduction	3
Chapter 1	
Global ecological aspects of forest biomass estimating	
1.1. PROBLEMS OF GLOBAL CARBON CYCLE AND CLIMATE CHANGE	8
1.2. IUFRO INTERNATIONAL GUIDELINES FOR FOREST MONITORING	16
1.2.1. Forest monitoring levels	17
1.2.2. Types of monitoring	19
1.2.3. Sources of information for monitoring	21
1.2.4. Sampling design	27
1.2.5. Building an infrastructure	33
1.3. GLOBAL ECOLOGICAL PROGRAMS	36
Chapter 2	
Application of systems of related regression equations to forest biomass estimating	
2.1. COMMON CONCEPTS	43
2.1.1. Structural forms of related equation systems	43
2.1.2. A problem of estimating simultaneous system parameters	48
2.1.3. A problem of a simultaneous equation system identification	54
2.2. COMPATIBLE SYSTEMS OF A STAND GROWTH AND YIELD EQUATIONS	57
2.2.1. A short history forestalling an origin of compatible models of a stand growth and yield	58
2.2.2. Compatible models of current yield and growth of even-aged stands	61
2.2.3. Compatible models of yield and growth of uneven-aged stands	64
2.2.4. Compatible models of gross yield and growth of even-aged stands	69
2.3. DEVELOPMENT OF TECHNIQUES FOR FITTING SIMULTANEOUS COMPATIBLE MODELS IN FORESTRY RESEARCH	75

2.3.1. Estimation of parameters of compatible yield and growth equations for forest stands by applying the method of maximum likelihood	75
2.3.2. Estimation of parameters of noncompatible yield and growth equations for forest stands by applying the method OLS, 2SLS and 3SLS	78
2.3.3. Estimation of parameters of compatible yield and growth equations for forest stands by applying the methods 3SLS	86
2.3.4. Advanced versions of the linear 3SLS technique for fitting systems of simultaneous equations	99
2.4. ESTIMATING PARAMETERS OF A RELATED EQUATIONS SYSTEM HAVING NO SERIAL CORRELATION OF ERROR TERMS ACROSS EQUATIONS	114
2.5. APPLICATION OF A SYSTEM OF RECURSIVE EQUATIONS TO FOREST BIOMASS ESTIMATION	120
2.5.1. Recursive relationships concerned regional variability of forest biomass	121
2.5.2. Use of a system of recursive equations for correct specification of a model	125
2.5.3. Systems of recursive equations concerned multipurpose use of a biomass model	126
2.5.4. A system of recursive equations as a means of harmonizing biomass estimates according to its components	128
2.5.5. A system of recursive equations as a means of combining a biomass model with traditional forest measurement standards	130
2.5.6. Use of a system of recursive equations when calculating limiting values of forest biomass	132
2.5.7. A recursive system of dependences as a base of parametric forecasting	138

Chapter 3

Regression models of biomass conversion factors and their application to compiling forest bioproductivity tables

3.1. CONVERSION FACTOR	142
3.2. METHODS OF COMPILING FOREST BIOPRODUCTIVITY TABLES	150
3.2.1. Smoothing biomass indices of forest stands belonging to the same age series	150

Электронный архив УГЛТУ

7.1.1. Initial stage of laser and radar remote sensing a terrain surface.....	307
7.1.2. Use of continuous wave laser.....	310
7.1.3. Use of pulsed laser.....	312
7.1.4. Raster and conical laser scanning.....	320
7.1.5. Some airborne laser systems.....	321
7.2. METHODS AND RESULTS OF LASER ESTIMATION OF VOLUME-DETERMINING STAND INDICES.....	328
7.2.1. Simulation of airborne laser profiling in ground experiments.....	328
7.2.2. Airborne laser estimating volume-determining stand indices.....	343
7.3. METHODS AND RESULTS OF LASER ESTIMATION OF FOREST BIOMASS.....	379
7.3.1. Calculating biomass regressions.....	379
7.3.2. Testing biomass regressions.....	385
7.3.3. Regressions to estimate forest biomass by means of airborne laser sensing.....	396

Chapter 8

Laser estimation of qualitative indices of forest canopy

8.1. RECOGNITION OF PLANT TYPES AND OF CERTAIN TYPES OF ENVIRONMENTAL STRESS OF PLANT ECOSYSTEMS USING LASER-INDUCED CHLOROPHYLL FLUORESCENCE.....	420
8.1.1. Photosynthesis and chlorophyll fluorescence.....	420
8.1.2. Fluorescence transients and steady states.....	421
8.1.3. Identifying plant types.....	424
8.1.4. Detecting plant stress caused with air pollution.....	428
8.1.5. Detecting nutrient stress.....	431
8.1.6. Detecting drought stress.....	432
8.1.7. Simultaneous (joint) airborne laser estimation of quantitative and qualitative characteristics of forest canopy.....	434
8.2. STUDYING CROWN STRUCTURE USING DEPOLARIZATION DEGREE OF LASER ILLUMINATION.....	436
8.2.1. Common information.....	436
8.2.2. Experimental identifying plant types using depolarization degree of laser illumination.....	441

Электронный архив УГЛТУ

Conclusions in Russian	445
Conclusions in English	450
Literature cited	455
Appendix	487
Contents in Russian	530
Contents in English	536

Электронный архив УГЛТУ

Научное издание

Владимир Андреевич Усольцев

**ФОРМИРОВАНИЕ БАНКОВ ДАННЫХ
О ФИТОМАССЕ ЛЕСОВ**

Рекомендовано к изданию ученым советом Института леса
и НИСО УрО РАН

Электронный архив УГЛТУ

Редактор С. С. Гаврилова
Технический редактор Е. М. Бородулина
Корректоры Г. Н. Старкова, Н. В. Каткова
Компьютерная верстка И. И. Глазыриной

ЛР № 020764 от 24.04.98

НИСО УрО РАН № 54(98)—137. Сдано в набор 03.07.98. Подписано в печать 03.11.98. Формат 60 × 84 1/16. Бумага типографская. Гарнитура "Таймс". Усл. печ. л. 34,5. Уч.-изд. л. 35. Тираж 300. Заказ № 105.

620134. Екатеринбург, Ж-134, ул. Билимбаевская, 32а. Институт леса.
620210, Екатеринбург, ГСП-169, ул. С. Ковалевской, 18.
Типография УрО РАН.