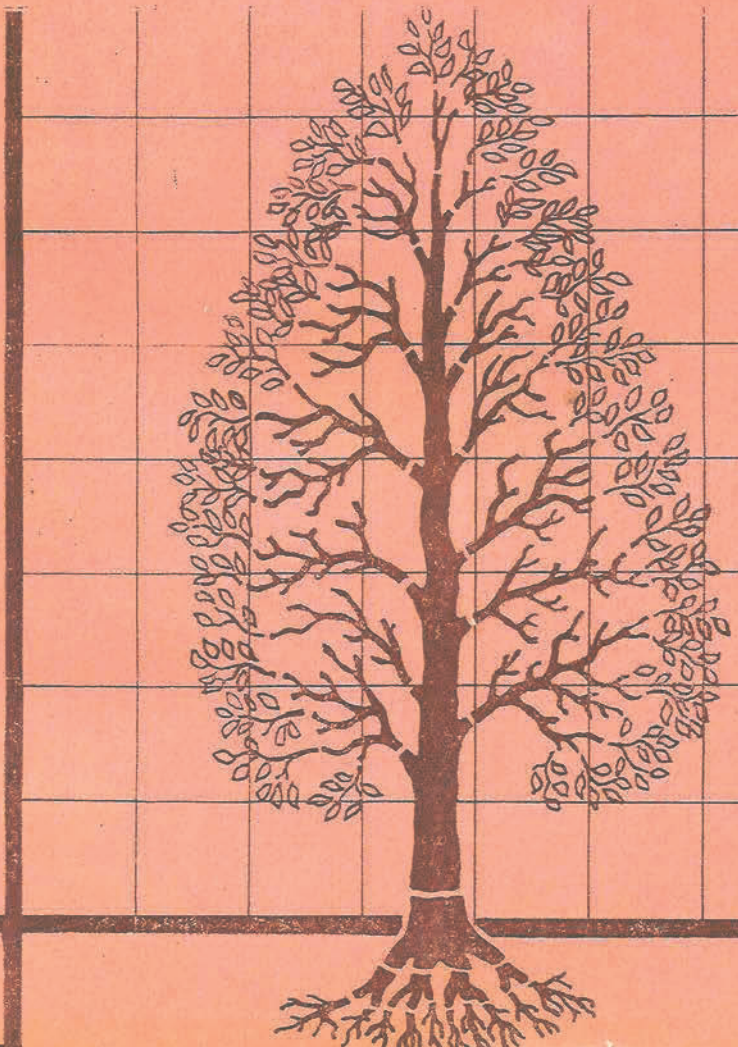
Электронный архив УГЛТУ

В. А. Усольцев

МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И ДИНАМИКИ ФИТОМАССЫ ДРЕВОСТОЕВ



Электронный архив УГЛТУ

В. А. Усольцев

МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И ДИНАМИКИ ФИТОМАССЫ ДРЕВОСТОЕВ

Издательство
Красноярского
университета
Красноярск 1985

Электронный архив УГЛТУ

УДК 630*52 : 630*174.754+630*8

Усольцев В. А. Моделирование структуры и динамики фитомассы древостоев. — Красноярск: Изд-во Краснояр. ун-та, 1985. — 192 с.

В монографии исследована структура фитомассы древостоев по ее компонентам и пространственному размещению, проанализировано изменение показателей биопродуктивности лесообразующих пород Западной Сибири и Казахстана на уровнях дерева, биогруппы и древостоя с использованием многомерного подхода. Показаны пути совершенствования полученных моделей динамики фитомассы. Предложены таблицы для учета фитомассы при комплексном освоении лесов.

Для научных работников, аспирантов и студентов-биологов, ботаников-ресурсоведов, специалистов лесного хозяйства и лесной промышленности.

Печатается по решению редакционно-издательского совета Красноярского университета

Под редакцией доктора биологических наук А. И. Уткина

Рецензенты: лаборатория математических методов Института леса и древесины СО АН СССР; д-р биол. наук, проф. И. Я. Лиепа

У $\frac{3901000000}{\text{М } 178(03)-85}$ 40—85

© Издательство Красноярского университета, 1985

Электронный архив УГЛТУ

ВВЕДЕНИЕ

Модель в самом общем понимании — это относительная истина в процессе познания, приближенно отражающая объективную реальность и использующая язык той или иной отрасли знания. В предлагаемой работе используются математические методы при описании биологических процессов и явлений, в частности динамики и структуры фитомассы лесного фитоценоза как составной части биогеоценоза — ячейки биосферы. Эти процессы имеют стохастический характер, поэтому речь пойдет о вероятностно-статистическом моделировании, в основе которого лежат методы теории вероятностей. Конечной целью моделирования являются возможность прогнозирования и управления процессами роста леса, их оптимизация. Зачастую эти понятия применяются в различном контексте, но фактически здесь используется одна и та же методология научного исследования, основанная на системном подходе.

Лес представляет собой сложную биологическую динамическую систему, и единственным объективным подходом к исследованию его структуры и динамики может быть системный анализ. Необходимость поддержания лесов в устойчивом состоянии при наличии резко возрастающего антропогенного воздействия на биосферу в целом делает реализацию системного подхода к лесным биогеоценозам особенно актуальной. На первый план, наряду с охраной природы, выдвигается создание устойчивых экологических комплексов с учетом неизбежно нарастающего антропогенного нашествия, ставятся проблемы мониторинга природных систем. Несмотря на то, что многие экосистемы уже выведены человеком на критические режимы, работы советских ученых показывают, что впадать в «экоистерику» нет оснований. В Институте прикладной математики в экспериментах с глобальной моделью Форрестера, предвещающей наступление экологической катастрофы во второй половине следующего столетия, удалось показать, что критических ситуаций можно избежать даже без корректировки демографических параметров, если определенным образом управлять распределением капиталовложений между секторами модели. При этом дополнительные затраты могут составлять десятки процентов от всех затрат общества (Левитин, Чеховская, 1975).

Проблема взаимоотношения человека и окружающей сре-

Электронный архив УГЛТУ

ды, отраженная в международной программе «Человек и биосфера», означает одновременно проблему сохранения человеческого общества. Последняя столь сложна и многообразна, что серьезно говорить о ней можно только при условии широкого применения ЭВМ и математических методов анализа (Моисеев, 1979). В качестве исходных данных при любом виде моделирования с целью изучения экологической роли леса должны использоваться количественные и качественные показатели фитомассы лесных фитоценозов (Протопопов, 1980).

Помимо экологического, моделирование лесных фитоценозов имеет не менее важный энергетический аспект. По оценкам специалистов (Sarma, 1981), при существующем уровне потребления энергии все мировые резервы ископаемых видов топлива будут исчерпаны в течение 50—100, а запасы нефти — 30 лет. Истощение сырьевой базы мировой энергетики заставляет пересмотреть отношение к возобновляемым источникам энергии, увеличение масштабов использования которых в народном хозяйстве СССР предусмотрено в решениях XXVI съезда КПСС (КПСС. Съезд, 26-й, 1981). К таким источникам относится и фитомасса лесов. Особенно перспективны в качестве «энергетической древесины» отходы лесозаготовок (крона деревьев, тонкомер) и деревообработки.

В экспериментах с математической моделью биосферы в Вычислительном центре АН СССР получены выводы о характере возможных кризисных явлений в будущем. Расчеты показали, что первоочередная опасность для населения планеты состоит не в экологическом и энергетическом кризисах. Наиболее тревожная ситуация складывается в сфере обеспечения человека белком, прежде всего пищей животного происхождения. При сохранении темпов роста народонаселения и нынешних пропорций в распределении капиталовложений уже к середине XXI столетия средняя обеспеченность животным белком составит 10—15% современного уровня (Моисеев, 1979). При всей условности подобные расчеты дают основание полагать, что значение реализации Продовольственной программы СССР, по-видимому, не ограничится текущим столетием. При этом роль фитомассы лесных биогеоценозов как надежного источника продовольственных и кормовых продуктов будет неуклонно возрастать (Эрнст, Науменко, 1977; Науменко, 1978).

Проблема взаимоотношения человека и окружающей

Электронный архив УГЛТУ

среды применительно к лесоводственной науке в силу длительности периода выращивания леса, превышающего продолжительность жизни человека или поколения людей, выдвигает задачу прогнозирования структуры и динамики лесного фитоценоза, основных параметров, определяющих его продуктивность и устойчивость. «Конечная цель исследования продуктивности лесных растительных сообществ,— пишет В. В. Кузьмичев (1977, с. 4), — заключается в создании количественной теории биологической продуктивности лесных экологических систем как основы управления их ресурсами и получения максимума полезной для человека продукции». На первом этапе моделирования продукционного процесса лесного фитоценоза предполагаются вычленение основных факторов, определяющих его структуру и динамику, и количественная оценка совокупного эффекта их воздействия с помощью множественного регрессионного анализа.

Предлагаемая книга представляет реализацию следующих задач: на основе многомерного подхода исследовать структуру и динамику фитомассы древостоев в лесах Западной Сибири и Казахстана как по компонентам фитомассы, так и по пространственному размещению; с использованием полученных регрессионных моделей составить таблицы для учета фитомассы при комплексном освоении лесов; на конкретных примерах наметить пути дальнейшего развития подхода к изучению структуры и динамики древостоев в ресурсоведческой и лесоэкологической ориентациях. В отличие от традиционного подхода к моделированию производительности древостоев по запасу стволовой древесины, в книге учитывается фитомасса деревьев и древостоев по основным ее компонентам, а в дополнение к проводимым в стране биогеоценотическим исследованиям лесной фитомассы показаны возможности применения множественного регрессионного моделирования.

Автор выражает глубокую признательность за активное содействие при выполнении работы сотрудникам ВЦ КазНИИЛХА тт. А. А. Ахременкову, Я. А. Фриккель, Г. И. Любимовой и сотруднице лаборатории лесной экологии О. Н. Передерий, а также А. И. Бузыкину, А. И. Колтуновой, Г. Б. Кофману, В. В. Кузьмичеву, И. Я. Лиепе, А. А. Макаренко, А. В. Полякову, А. И. Уткину, В. С. Чуенкову и А. З. Швиденко, высказавшим ценные замечания при подготовке рукописи к изданию.

Электронный архив УГЛТУ

Глава 1. МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ И ДИНАМИКИ ФИТОМАССЫ ДРЕВОСТОЕВ

1.1. Некоторые аспекты многомерного подхода к исследованию фитомассы

Изучение количественных и качественных характеристик фитомассы древостоев является составной частью исследований биологической продуктивности как в биогеоценотическом, так и в ресурсоведческом аспектах. Это направление развивалось в работах по Международной биологической программе и соответствует профилю разрабатываемой международной программы «Человек и биосфера». Н. П. Анучин (1977) видит здесь одну из новых, довольно сложных и малоизученных проблем лесной таксации; И. С. Мелехов (1980) рассматривает лесное ресурсоведение в качестве одного из разделов современного лесоведения, которое постепенно выходит на биосферный уровень.

В связи с возрастающей экологической и биосферной ролью леса как элемента ландшафта и увеличивающейся потребностью в использовании его «весомых» и «невесомых» полезностей исследования по биологической продуктивности, начавшись в 30—40-е годы текущего столетия, в последнее время приобрели особенно широкий размах. При этом, несмотря на публикацию программных и методических материалов (Программа..., 1966; Молчанов, Смирнов, 1967; Родин и др., 1968; Уткин, 1975; Биологическая продуктивность..., 1982), работы чрезвычайно разнообразны как по целевому, так и по методическому подходам и зачастую несопоставимы. При наличии существенного прогресса в методическом плане и возрастающих возможностей машинной обработки материалов исследований по-прежнему идет процесс накопления сведений о биологической продуктивности лесов по природно-климатическим зонам, древесным породам, типам леса и т. д. Авторы работ, отличающихся как глубиной проработки вопросов, так и степенью обобщения (Уткин, 1969, 1970, 1975; Молчанов, 1971; Смирнов, 1971; Поздняков и др., 1969; Поздняков, 1973; Габеев, 1976; Рубцов и др., 1976; Семечкина, 1978), пытаются в той или иной мере систематизировать результаты исследований. Л. К. Поздняков, В. В. Протопопов и В. М. Горбатенко (1969) выделяют два основных направления в изучении биологической продуктивности ле-

Электронный архив УГЛТУ

сов: биогеоценотическое, связанное с познанием биологического круговорота веществ и энергии в лесном биогеоценозе, и ресурсоведческое, предполагающее оценку лесной фитомассы с точки зрения ее утилизации. Л. К. Поздняков (1973) выделяет лесное ресурсоведение как самостоятельную отрасль лесных наук, В. В. Протопопов (1965) исследует структуру фитомассы лесов в биофизическом плане, М. Г. Семечкина (1978) анализирует строение древостоев по элементам фитомассы, т. е. оценивает последнюю в таксационном аспекте, А. И. Уткин и А. Ф. Ильюшенко (Биологическая продуктивность..., 1982) уделяют внимание не только соотношениям фракций, но и характеристикам состояния (плотности и влажности) фитомассы, оценивая возможность использования лесотаксационных методов и материалов лесоинвентаризации в ориентировочных расчетах биопродуктивности. Анализируются не только валовые показатели фитомассы, но и годичная продукция последней (Ватковский, 1976; Биологическая продуктивность..., 1982), что особенно важно в биологических исследованиях.

Не претендуя на анализ состояния исследований по проблеме биопродуктивности в целом, с учетом целевой ориентации настоящей работы необходимо отметить недостаточное внимание к моделированию динамики и структуры фитомассы в онтоценогенезе древостоев на том или ином эдафическом фоне. Множественные регрессионные модели роста и прироста древостоев находят широкое применение главным образом в таксационных исследованиях (Vuokila, 1967; Ulbricht, 1969; Таурињь, 1969; Антанайтис, 1971; Чуенков, 1972; Кузьмичев, 1977; Матузанис, 1977; Свалов, 1979; Лиепа, 1980; Тябера, 1982) и предназначены только для ствола без учета кроны, что не дает полного представления о продуктивности древостоев. Недостаточная популярность многомерного подхода обусловлена значительной трудоемкостью учета фитомассы в сравнении с традиционной оценкой запасов стволовой древесины (это затрудняет возможность концентрации методически однородного экспериментального материала в распоряжении одного исследователя или коллектива), слабой координацией работ, разобщенных по ряду академических и отраслевых институтов различного подчинения, и недостаточным использованием современной компьютерной техники.

Однако имеется четкая тенденция перехода от формы подачи материала в исходном состоянии, в лучшем случае с

Электронный архив УГЛТУ

систематизацией его по группам признаков либо с графическим выравниванием (Данилов, 1953; Иевинь, Дикельсон, 1962; Молчанов, 1971; Смирнов, 1971), к выявлению парной связи фитомассы с одним ведущим фактором (Kittredge, 1944; Ильюшенко, 1968; Поздняков и др., 1969; Усольцев, 1972) и к объяснению изменчивости показателей фитомассы на основе многофакторного подхода. Последнее направление представлено главным образом попытками использовать в качестве факторов воздействия основные морфометрические признаки дерева в статике (Attiwill, 1962; Горбатенко, 1971; Карманова, 1976; Усольцев, Усольцева, 1977; Кричун, Усольцев, 1979; Кузиков, 1979; Биологическая продуктивность..., 1982).

Публикации первичных материалов по биопродуктивности, практиковавшиеся главным образом на первых этапах ее изучения, представляют ценность для будущих обобщающих исследований на основе системного подхода. Последующие работы с демонстрацией парных связей фитомассы с тем или иным фактором в этом плане несколько утрачивают свою ценность, но зато представляют интерес при выявлении определяющих факторов воздействия, хотя возможности таких связей в последнем направлении ограничены. Принцип единственного фактора в парных связях, реализуемый в точных науках или в так называемых «чистых» природных закономерностях, в биологии оказывается менее эффективным (Лиепа, 1980). Свидетельством этого являются безуспешные поиски так называемого «закона роста» на основе парной связи показателя роста с возрастом. Количество ростовых функций уже превысило сотню (Peschel, 1938). С внедрением ЭВМ появилась возможность опробования множества функций с одним аргументом для описания исследуемой закономерности. Однако в силу невозможности элиминировать при этом влияние остальных факторов та или иная аппроксимирующая функция оказывается наиболее приемлемой при данном сочетании или фоне неучтенных варьирующих факторов и менее приемлемой или совершенно непригодной при другом их сочетании (Лиепа, 1980).

При исследовании структуры фитомассы простого одновозрастного древостоя, представляющего сравнительно однородный биологический объект, высокие показатели точности аппроксимирующих уравнений достигаются при использовании лишь одного аргумента, например диаметра ствола. Число таких уравнений, предложенных в разное время разными

Электронный архив УГЛТУ

авторами, по-видимому, не уступает количеству имеющихся функций роста. Исследуя в простых одновозрастных древостоях взаимосвязи показателей фитомассы с морфологическими параметрами деревьев, М. Г. Семечкина (1978), Ю. А. Тамм, В. А. Росс (1980) приходят к выводу, что применение множественной регрессии не дает преимущества в сравнении с парной связью. Однако установленный М. Г. Семечкиной факт, что наилучшие результаты дает включение в модель параметра, представленного произведением квадрата диаметра на высоту ствола дерева (D^2H), уже свидетельствует в пользу множественной связи, поскольку учитываются основные два объемообразующих признака дерева, хотя при этом и использована техника аппроксимации парной связи. Представляется вполне закономерным, что дальнейшее наращивание названным автором количества включенных в модель морфометрических параметров практически не повышает точности учета, поскольку какая-то доля их влияния уже учтена фактором D^2H либо непосредственным образом (когда дополнительно включены площадь сечения, объем и высота ствола), либо косвенно (например, длина и диаметр кроны опосредованы с D^2H через площадь роста дерева).

Аналогичная ситуация имела место в работе Ю. А. Тамма и В. А. Росса (1980), когда в дополнение к определяющему фактору $D^2/D_{ср}$, где в знаменатель входит значение среднего диаметра древостоя, они последовательно включали в уравнение другие морфометрические параметры дерева (D, H и др.), тесно коррелирующие между собой. По-видимому, от таких ситуаций предостерегал Н. П. Бусленко (1968, с. 48): «...Стремление к учету очень большого круга действующих факторов не всегда оказывается оправданным. Как правило, учет факторов, влияние которых не является определяющим для оценки характеристик и параметров данного процесса, приводит лишь к тому, что математические модели становятся чересчур громоздкими и плохо обозримыми, а точность решения задачи практически не увеличивается».

Аппроксимация показателей фитомассы по вышеупомянутым комбинированным факторам давала чисто технический выигрыш, позволяя использовать простой алгоритм расчета парной связи. В век компьютеров этот мнимый выигрыш не компенсирует проигрыша в точности модели, обусловленного тем, что составляющие аргументы связаны между собой жесткими соотношениями показателей степени (один показа-

Электронный архив УГЛТУ

тель вдвое больше другого по абсолютной величине), чего в действительности, строго говоря, не бывает.

Кроме того, включение фактора $D^2/D_{ср}$ в парную регрессию имеет смысл при аппроксимации совокупности показателей фитомассы 140 модельных деревьев на всех пробных площадях, и тогда $D_{ср}$ представляет таксационную характеристику древостоев. Использование этого фактора применительно к отдельной пробной площади не представляется правомерным, так как в этом случае аргумент $D_{ср}$ не несет функции, объясняющей изменчивость фитомассы дерева в пределах отдельного древостоя, а несколько больший (на 3,3%) коэффициент корреляции названного фактора с показателями фитомассы в сравнении с фактором D, по-видимому, объясняется наличием линейной или почти линейной связи фитомассы с D^2, описываемой прямой Копецкого, тогда как связь с D обычно нелинейна.

По свидетельству Т. Сато (Satoo, 1966), у двух деревьев криптомерии японской одинакового ценотического положения и с близкими морфометрическими параметрами в пределах одной пробной площади различие по массе ветвей составило —71%, а по массе листвы +11%. По-видимому, с помощью одних только морфометрических параметров деревьев, взятых в статике, невозможно объяснить весь размах варьирования фитомассы, поскольку в данных морфологических показателях и структуре фитомассы аккумулирована реакция дерева на эколого-ценотические воздействия за всю историю его роста. Более того, если масса ствола дерева является интегральным показателем роста в течение всего периода жизни, то масса листвы представляет годичный прирост, а масса ветвей, вследствие непрерывного их отмирания в процессе роста дерева, занимает между ними промежуточное положение. Таким образом, отдельные фракции фитомассы аккумулируют реакцию дерева на среду обитания за периоды различной длительности, а морфологические показатели (диаметр на высоте груди, высота дерева) отражают конечный результат роста (Satoo, 1966). Вследствие этого их связь, во-первых, не может быть реализована одной и той же функцией, во-вторых, имеет различную надежность для разных фракций. Наиболее изменчива вследствие высокой чувствительности к экзо- и эндогенным факторам масса ассимиляционного аппарата, особенно в экстремальных условиях роста, где резкое сокращение или нарастание хвои в отдельные годы объясняется проявлением механизма экологической адап-

Электронный архив УГЛТУ

тации деревьев: при снижении влагообеспеченности, например, на 50% запасы хвои у девятилетних сосен могут сократиться втрое (Воронков, Невзоров, 1979). Береза в процессе эволюции выработала способность сбрасывать ежегодно часть «лишних» мелких ветвей или их верхушечных частей. Наибольшее их количество приходится на низшие ранги деревьев. Это способствует улучшению роста оставшихся ветвей и тем самым повышает устойчивость и жизнеспособность особи в растительном ценозе (Усольцев, Данченко, 1981).

Другими возможными причинами остаточной дисперсии при включении в уравнение регрессии только морфометрических параметров могут быть разные экологические условия роста отдельных деревьев, а также различия, обусловленные генетическим разнообразием популяции древесной породы (Satoo, 1966; Биологическая продуктивность..., 1982). Таблицы фракций фитомассы (наряду с объемными лесотаксационными таблицами), составленные на основе регрессионных моделей по морфометрическим параметрам деревьев (диаметр, высота), находят применение при перечислительной таксации с целью оценки общих ресурсов фитомассы. Связи показателей фитомассы с объемообразующими параметрами деревьев могут быть использованы для математического описания лишь отдельных фрагментов многообразного биопродукционного процесса лесного фитоценоза в статике. Представляется перспективным выявление роли онтогенетического фактора в динамике как качественных, так и количественных соотношений различных фракций фитомассы в увязке с эколого-ценотическими характеристиками местообитания, часть которых может быть опосредована через морфометрические характеристики деревьев и древостоев. Лишь в единичных работах динамика фитомассы описана регрессиями, включающими онтогенетический и эколого-ценотические факторы (Токмурзин, Нурпеисов, 1976; Тябера, 1981).

Возрастная динамика фитомассы выражена обычно уравнениями, аппроксимирующими единовременные данные статических состояний древостоев разного возраста (симультанный метод), соответствующих так называемому естественному ряду. Помимо этого метода существует возможность исследования продукционного процесса путем длительных стационарных наблюдений (Родин и др., 1968; Горбатенко, 1971). Однако опыт многих поколений лесоводов по составлению таблиц хода роста древостоев показывает, что наряду с большой трудоемкостью и растянутостью во времени такой подход

Электронный архив УГЛТУ

также не обеспечивает постоянства варьирующих факторов (например, климатических, эдафических, антропогенных и др.) во времени и пространстве. Изменяется не только класс бонитета (за 50 лет — на два класса), но и вся экологическая обстановка, тип леса (Сеннов, 1983). Это явление согласуется с принципом саморазвития открытых экосистем (Мауринь, 1978; Уткин, 1981; Антанайтис, 1983), с представлением об эволюции биогеоценозов, подтверждаемым сведениями о смене палеогеографических ландшафтов (Тимофеев-Ресовский и др., 1977), и с понятием экогенеза как необратимого процесса становления, развития и смены биогеоценозов (Смагин, 1980). Вследствие необратимости процессов динамики лесных биогеоценозов для их количественного описания могут быть использованы математические модели, построенные на аналитических методах термодинамики неравновесных процессов (Михайловский, 1978; Уткин, 1981) и выполняющие объяснительную функцию.

В отличие от названного подхода имитационное моделирование, основанное на блочном принципе с реализацией его на ЭВМ, несет не столько объяснительную, сколько предсказательную функцию, и выполняется на пределе наших знаний о системе, поскольку учитывает возможно большее число входящих в систему элементов и связей между ними (Миркин, Розенберг, 1983). Имитационная модель позволяет выводить описание исследуемого процесса за рамки жесткой схемы, прогнозировать поведение сложной системы с учетом динамики факторов воздействия в различных конкретных ситуациях, исследовать различные стратегии управления поведением системы (Розенберг, 1981; Schneider, Kreysa, 1981). Моделирование на основе имитационных экспериментов возникло в связи с развитием ЭВМ. Его цель в нашем случае — определить поведение лесного биогеоценоза в условиях, отличающихся от конкретных реальных условий его существования, а также при изменениях состояния самого ценоза. Насаждение состоит из деревьев, реагирующих на среду обитания индивидуально. Структура и динамика его неповторимы и поэтому плохо вписываются в стандартизованные схемы, например, таблицы хода роста. Необходимы надежные данные о возможных линиях развития насаждений.

Существует два подхода к имитационному моделированию лесных биогеоценозов. При первом моделирование выполняется на энергетическом уровне. Ю. К. Росс (1978) определяет такие модели как физиолого-математические. Они

Электронный архив УГЛТУ

включают в той или иной мере описание процессов обмена веществ и энергии в биогеоценозе: балансы радиационный, водный, газовый, питательных веществ и пр. Сравнительный анализ некоторых из них, выполненный Г. Агреном (Ågren, 1981) с целью иллюстрации проблем моделирования роста дерева, показал, что из структурных переменных наиболее информативна листва как самая динамичная переменная. Решающим элементом моделей является собственно рост как необратимый процесс связывания углерода в структурном материале. Однако его механизм трактуется слишком упрощенно, что не дает основания считать такие модели перспективными в решении проблем роста. Как правило, проверка адекватности моделей не предусматривается. Трудности верификации связаны с отсутствием точных данных, например, по корневым системам, содержанию углеводов и др., и с деструктивным характером измерений. Однако модель такого рода, выполненная П. Рачко (1979), дает основания для оптимизма не только в отношении прогнозирования роста дерева, но главным образом в экологическом плане — в решении проблемы устойчивости лесного фитоценоза. Численная идентификация модели, выполненная по экспериментальным данным Н. И. Казимирова (1971) по ельникам Карелии, показала наличие отклонений в пределах 10%. Следует признать, однако, что сведения, аналогичные изложенным в работах Н. И. Казимирова, являются уникальными.

Второй подход в имитационном моделировании лесного биогеоценоза в той или иной мере связан с возможностями и достижениями лесной таксации и лесной морфологии. Это модели морфометрического плана. Факторы внешней среды или какая-то их часть опосредуются через морфометрические характеристики фитоценоза. По степени детальности (и точности) выделяют три основные группы (Munro, 1974) моделей, выполненных:

— на уровне насаждения в целом; в качестве базовой единицы моделирования используются показатели древостоев (Clutter, Allison, 1974);

— на уровне дерева; не учитывают расстояние между деревьями; включают, как правило, наряду с прочими, факторы конкуренции и отпада (Lemmon, Schumacher, 1962; Галицкий, Комаров, 1976);

— на уровне дерева; учитывают, наряду с конкуренцией и отпадом, расстояние между деревьями и их размещение (Newnham, Smith, 1964; Schneider, Kreysa, 1981).

В ряде разработок помимо морфометрических признаков в модель включаются некоторые эмпирические, физиологические, климатические и другие закономерности, что сближает второй подход с первым (Botkin etc., 1972; Оя, 1978).

При втором подходе прогноз динамики определяющих факторов, в частности отпада, выполняется моделями феноменологического характера (Lee, 1971). Поскольку процесс отпада не поставлен в зависимость от определяющих экологических факторов, такие модели не в состоянии предсказать некоторые явления, например, скачкообразное снижение производительности древостоев на 40—45%, наблюдаемое иногда на постоянных пробных площадях и пока не поддающееся интерпретации (Кузьмичев, 1980). В последней ситуации может оказаться плодотворным применение одного из недавних достижений математики — метода теории катастроф, отраженного в работах Р. Тома и Е. Зимана (Чиллингуорт, 1979). Метод позволяет в рамках одной математической модели описывать некоторые нарушения непрерывности развивающихся процессов, когда, казалось бы, устойчивое состояние может скачком перейти в другое устойчивое состояние под воздействием малого возмущения в точках бифуркации (Мак-Лоун, 1979).

Упомянутые выше феноменологические модели имеют ограниченные возможности в решении проблем устойчивости лесных фитоценозов. Тем не менее в прикладном значении второй подход является перспективным, особенно третья разновидность моделей. Она представляет наибольший интерес и в плане настоящей работы. Для идентификации этих моделей обычно имеется обширный материал перечетов на постоянных пробных площадях, используется накопленный в лесной таксации арсенал закономерностей роста насаждений, связи его с возрастом, густотой, условиями местообитания, морфометрическими характеристиками деревьев и распределениями последних по этим характеристикам. Подобные модели (Schneider, Kreysa, 1981) на основе известной начальной морфоструктуры древостоя, характеристик конкурентных отношений деревьев, взаимосвязей морфометрических и продуктивностных показателей, известных режимов хозяйственного вмешательства и т. д. в состоянии давать прогноз роста при любом пространственном размещении деревьев (равномерном, групповом или случайном), в чистых и смешанных древостоях, при любой стратегии ухода.

Основным этапом моделирования является содержатель-

Электронный архив УГЛТУ

ный, или качественный, анализ изучаемых многомерных процессов (Бусленко, 1968; Четыркин, 1977; Лиепа, 1980). Это этап, необходимый в биологических, экологических, экономических, социологических, технологических разработках — во всех отраслях знания, где исследуемый процесс определяется как совокупный эффект множества одновременно действующих факторов, когда имеют дело с системой в самом широком смысле этого слова и успех возможен лишь при использовании системного подхода как методологии исследования. Основополагающий характер качественного анализа, его первостепенная роль по отношению к количественному описанию — это главный принцип общей теории устойчивости, применимой к различным математическим моделям (Чиллингуорт, 1979). Когда говорят, что моделированию нельзя научить, что моделирование — это искусство (Мак-Лоун, 1979), то, очевидно, имеют в виду отсутствие каких-либо формальных правил для выбора характеристик состояний и параметров изучаемых систем и необходимость овладения индуктивным методом познания вкупе с определенными профессиональными навыками. «Исследователь,— пишет Н. П. Бусленко (1968, с. 42), — в этом отношении может руководствоваться лишь собственной интуицией, опирающейся на постановку прикладной задачи и понимание природы функционирования системы». Можно сказать, что процесс моделирования, или формализации изучаемого явления, начинается лишь когда удается вскрыть основные причинно-следственные связи, механизм воздействия определяющих факторов на изучаемый процесс.

Этой концепции противостоит теория самоорганизации моделей (Ивахненко, 1982), решительно отвергающая роль ЭВМ как «большого арифмометра» в диалоге человека и машины. Не отрицая перспективности принципа самоорганизации в многомерных задачах количественного прогноза, когда целью является «получение не самой достоверной, а самой регулярной модели» (адекватной при любых условиях), нельзя в то же время согласиться с противопоставлением А. Г. Ивахненко метода самоорганизации моделей как объективного подхода имитационному моделированию как чисто субъективному, отражающему представления автора модели о способе действия объекта. По-видимому, более перспективно создание комбинированных моделей, в которых используются методы имитационного моделирования и самоорганизации, т. е. сочетаются дедуктивный и индуктивный принци-

пы. П. М. Брусиловский и Г. С. Розенберг (цит. по: Лиепа, 1982), объединив эти два подхода, улучшили прогноз динамики фитомассы исследованных растительных сообществ почти в два раза. Поскольку и те, и другие методы не поддаются содержательной интерпретации и служат лишь в качестве прогностического аппарата, количественные описания биоэкологических систем могут быть дополнены теоретическими оптимизационными моделями (Розенберг, 1981), а также аналитической процедурой расчета термодинамики неравновесных процессов (Михайловский, 1978; Уткин, 1981). Имитационные модели, построенные по принципам системной динамики Форрестера, основаны на концепции равновесия экосистем, что противоречит принципу необратимости происходящих в них процессов. Поэтому важное значение придается определению временных интервалов, на протяжении которых нет качественных скачков в динамике прогнозируемой системы (Розенберг, 1981). Проблема верификации таких моделей на больших временных интервалах остается открытой.

Необходимым исходным этапом моделирования биопродукционного процесса лесного фитоценоза, его динамики является множественное регрессионное моделирование, предполагающее вычленение основных определяющих факторов воздействия и количественную оценку их совокупного эффекта. В качестве исходных объектов моделирования могут быть взяты деревья и их совокупности — биогруппы как элементарные единицы лесного фитоценоза. При регрессионном анализе конкретизируется воздействие отдельных факторов, создается база для экспериментирования с моделями с целью получения ответов на вопросы типа «Что будет, если...?» (Четыркин, 1977; Лиепа, 1980). Для целей прогнозирования такой аппарат, как правило, оказывается несовершенным в силу того, что множественные регрессионные модели недостаточно пластичны для отражения функционирования биологического объекта исследования во всем его многообразии. Тем не менее для краткосрочных прогнозов, как показали исследования Г. С. Розенберга и П. А. Феклистова (1982) по предсказанию величин годичного прироста сосны и ели по метеорологическим факторам, возможно использование классических регрессионных моделей. При длительных прогнозах прироста лучший результат дают самоорганизующиеся модели А. Г. Ивахненко, относящиеся к классу регрессионных уравнений с использованием принципа внешнего дополнения.

Электронный архив УГЛТУ

В последующих главах предлагаются множественные регрессионные модели динамики количественных и качественных характеристик фитомассы, выполненные на уровнях дерева, биогруппы и древостоя. Эти модели включают в качестве определяющих факторов возраст и эколого-ценотические характеристики местопроизрастания, опосредованные через морфометрические (таксационные) параметры дерева и древостоя, и не претендуют на роль прогностических. Они не могут дать надежных придержек относительно уровня того или иного показателя фитомассы конкретного древостоя, достигаемого к возрасту, например, его количественной спелости или к возрасту рубки, как и большинство таблиц хода роста древостоев. Однако такие придержки могут быть даны с той или иной мерой определенности в случае, если какие-то конечные таксационные параметры дерева и древостоя известны либо условно заданы. Тем самым прогнозирование фитомассы лесного фитоценоза сводится к параметрическому прогнозированию (Лиепа, 1980), т. е. сначала на основе динамических моделей (например, имитационных) предсказываются соответствующие параметры древостоя, а по ним с использованием множественных регрессий — фитомасса. Учет фитомассы в регрессиях на уровне биогрупп как исходных структурных единиц древостоя является средством повышения надежности прогноза.

1.2. Вопросы подбора и оценки регрессионных моделей

Если в ходе качественного анализа выявляются характер и последовательность взаимозависимостей, то на долю количественного и, в частности, регрессионного анализа приходится количественная оценка причинно-следственного механизма явлений. Количественный анализ начинается с измерения тех или иных взаимодействий в определенной системе единиц. Он дает оценки в числовом выражении, формализует процесс, делает содержательный анализ доказательным (Четыркин, 1977).

Лесоводственная информация представлена, как правило, многомерными массивами данных, и приходится учитывать целый комплекс признаков. Современный многомерный анализ объектов увеличивает возможности извлечения информации из исходных данных. Существует обширный круг его методов: факторный, кластерный, дисперсионный, главных

Электронный архив УГЛТУ
компонент, корреляционных плеяд и др. В физике, химии, технике, сельском хозяйстве и т. д. широко используют метод Бокса—Уилсона при планировании эксперимента (Адлер и др., 1976): задают различные уровни варьирующих факторов, получают для каждого уровня отклик (значение результирующего фактора) и затем строят многомерную поверхность отклика. В лесоводстве это трудно реализуемо, поскольку в конкретном диапазоне лесорастительных условий практически невозможно получить полный набор пробных площадей с заранее заданными лесоводственными и таксационными характеристиками. В лесоводственных исследованиях находит широкое применение техника классического регрессионного анализа как математический аппарат выявления множественных связей, достаточно хорошо разработанный (Дукарский, Закурдаев, 1971; Митропольский, 1971; Дрейпер, Смит, 1973; Никитин, Швиденко, 1978). Характерное отличие множественных регрессий от других видов многомерного анализа состоит в том, что они дают аналитическое выражение для исходных соотношений и характеристик процесса, а это является важным условием последующего динамического (имитационного) моделирования (Бусленко, 1968).

Основная проблема при моделировании многомерных процессов и явлений, с которой исследователь сталкивается еще на этапе качественного анализа,— сокращение размерности массива данных, поскольку в общем случае многомерное пространство характеризуется отсутствием наглядности и трудно поддается непосредственному качественному анализу. В таких случаях используют методы многомерной классификации. В биоэкологических исследованиях наиболее популярно применение факторного и компонентного анализов (Лиепа, 1980).

Однако на практике специалист-нематематик использует приемы сокращения размерности интуитивно, на основе качественного анализа объекта, когда после выявления определяющих факторов воздействия анализируются парные связи каждого фактора с зависимой переменной. В этом отношении в работах последних лет заслуживает внимания подход, который можно определить как метод последовательного сокращения размерности. На первом этапе проводится анализ парной связи зависимой переменной с определяющим фактором воздействия на фоне остальных учитываемых факторов. Эта связь выражается монотонной функцией с минимальным числом констант. Поскольку линейная связь является частным случаем более общей нелинейной связи, то лучший ре-

Электронный архив УГПТУ

зультат дает использование нелинейных (степенной, экспоненциальной и др.) функций, которые можно с помощью простых операций привести к линейным. Дальнейшему анализу подвергается связь констант первого уравнения с определяющим фактором из числа оставшихся, затем следует анализ связи констант второго уравнения с очередным ведущим фактором и т. д. Одна из первых попыток применения названного метода в исследованиях первичной продуктивности лесных фитоценозов предпринята Т. Сато (Satoo, 1966), который найденные константы аллометрических уравнений, аппроксимирующих связь фитомассы дерева с его таксационным диаметром, пытался связать с высотой, средним диаметром, возрастом, густотой древостоя и степенью конкурентных отношений деревьев.

Г. В. Стадницкий (1971), В. Е. Федоряк и В. А. Усольцев (1978) использовали подобную процедуру при моделировании выживания насекомых-фитофагов в течение поколения в зависимости от начальной плотности популяции и текущего времени. Исследуемый временной интервал разбит на периоды. Для каждого вначале рассчитаны уравнения связи с ведущим фактором — текущим временем в сутках, а затем аналитически выражена связь констант уравнений с начальной плотностью. В итоге получены нелинейные модели, расчет констант которых в общем случае может быть выполнен с помощью итерационной процедуры нелинейного метода наименьших квадратов.

В одной из публикаций автора (Усольцев, 1976б) для различных классов возраста березовых и осиновых древостоев с использованием аллометрической функции выведены зависимости массы листьев дерева от его толщины и затем константы полученных уравнений скоррелированы с возрастом. В итоге установлен идентичный вид связи с возрастом для аллометрической константы и для массы листвы на 1 га, имеющий, по-видимому, региональный характер. Метод последовательного сокращения размерности массива данных широко использует в своих работах В. В. Кузьмичев (1977). Он устанавливает, например, прямолинейную связь высоты древостоя в 30 лет с высотами в других возрастах и затем полученные константы коррелирует с возрастом. В другой работе (Кузьмичев, Савич, 1979) рассчитывается прямолинейная связь среднего диаметра древостоя со средним расстоянием между деревьями и затем исследуются зависимости полученных констант от возраста. В обеих работах в итоге по-

Электронный архив УГЛТУ

лучены двухфакторные регрессионные уравнения, в общем случае рассчитываемые обычным методом наименьших квадратов.

По существу, тот же принцип лежит в основе предложенного М. Джекобсом и Т. Куниа (Jacobs, Cunia, 1980) метода «гармонизации», или согласования, регрессионных зависимостей массы ствола от его диаметра на высоте груди при различных размерах получаемого сортимента, характеризуемых диаметром в верхнем отрезе. На первом этапе аллометрическим уравнением описывается связь массы сортимента с диаметром ствола на высоте груди отдельно для каждого фиксированного значения диаметра в верхнем отрезе, которое определяют как фиктивную переменную. Последующее аналитическое описание связи полученных констант с фиктивной переменной в итоге дает обычную двухфакторную регрессионную модель.

А. А. Кулешис (1981) установил, что при описании зависимости высот H от диаметров D деревьев наилучшим является уравнение $(H-1{,}3)^{-1/3}=a+b/D$. Исследовав зависимость констант a и b от возраста A, он рассчитал регрессии $a=c_0+c_1/A$ и $b=d_0+d_1 \lg A$, где c_1 и d_1 — константы, и получил регрессионную модель, по его мнению, обладающую способностью описать все существующие в природе закономерности изменения высот деревьев с изменением их диаметра и возраста.

Процедура последовательного сокращения размерности позволила М. Коватсу (Kovats, 1977) оптимизировать не только форму уравнения связи, но и интервал, в котором один из факторов воздействия оказывается наиболее результативным. Метод М. Коватса существенно отличается от вышеизложенных. На первом этапе по совокупности 100 деревьев рассчитывают зависимость объема ствола V от высоты дерева H и от диаметра ствола D_h, замеренного на относительной высоте h ствола, выраженной в долях от общей высоты H. Для каждого значения h получают уравнение

$$\lg V=a_0+a_1 \lg H+a_2 \lg D_h \qquad (1.1)$$

и для интервала относительных высот, обеспечивающего минимальную ошибку уравнения (1.1), коррелируют константы a_0, a_1 и a_2 с h. В итоге получена трехфакторная регрессионная модель с указанием оптимальной зоны действия одного из факторов.

Реализация проблемы сокращения размерности объекта возможна и в другом, принципиально отличном направлении,

Электронный архив УГЛТУ
когда используются один или несколько интегральных показателей, характеризующих комплексный эффект всех факторов. Таким показателем является, например, текущий прирост по запасу наличного древостоя (Антанайтис, Загреев, 1969; Лиепа, 1980). С самого зарождения лесотаксационной науки подобные методы сокращения размерности широко практиковались с целью свести многомерную задачу к парным связям. В качестве фактора воздействия использовали среднюю высоту древостоя, обуславливаемую возрастом и условиями местообитания, выделяли древостои одного естественного ряда, вводили нормативные показатели полноты и т. д. (Кузьмичев, 1980). Названные приемы не потеряли своей актуальности и ныне, однако для реализации системного подхода требуются вскрытие механизма воздействия факторов на результирующий признак, расчленение интегральных показателей на исходные составляющие. Известно, например, что сумма площадей сечения древостоя является интегральным показателем — функцией площади сечения среднего дерева и числа стволов на 1 га. Последние, в свою очередь, — монотонные функции возраста, первая из которых возрастающая, а вторая — убывающая. Г. Б. Кофман и В. В. Кузьмичев (1979), В. В. Кузьмичев (1980) расчленили закономерность изменения суммы площадей сечения с возрастом на названные составляющие и установили, что эти суммы для древостоев разной густоты меняются с возрастом по колоколообразным кривым, максимумы которых разнесены по возрасту и величине и расположены на одной огибающей. Таким образом, процессы сокращения и повышения размерности объекта находятся в диалектическом единстве, и одностороннее предпочтение одного из них приводит либо к чрезмерному упрощению, либо к усложнению задачи. Реализация описанного выше принципа последовательного сокращения размерности означает одновременно увеличение последней, поскольку снижение размерности по неучтенным факторам сопровождается ее повышением по учтенным.

Как упоминалось выше, метод последовательного сокращения размерности предполагает использование на первом этапе парной связи, описываемой нелинейной функцией с минимальным числом констант. В сравнении с обычными полиномами этому условию в большей степени удовлетворяют логарифмические полиномы первого и второго порядков, называемые в теоретической биологии соответственно как функ-

Электронный архив УГПТУ

ции аллометрическая и Корсуня—Бакмана, константы которых имеют определенную биологическую интерпретацию.

Известно, что изменение формы организмов в процессе роста обычно происходит согласно уравнению

$$\frac{dy}{dA} \cdot \frac{1}{y} = a \frac{dx}{dA} \cdot \frac{1}{x}, \qquad (1.2)$$

где a — аллометрическая константа; A — время; x, y — объемы (массы, размеры) двух частей организма.

Интегрирование дифференциального уравнения (1.2) дает аллометрическую функцию $\ln y = \ln b + a \ln x$, или

$$y = bx^a, \qquad (1.3)$$

где b — константа начального роста.

Закономерность аллометрического роста основана на предположении, что в результате обмена веществ в растении его части получают прирост массы, пропорциональный доле их представительства. При этом константа a показывает, в какой мере часть организма в состоянии присвоить прирост всего растения. Эта закономерность может проявляться в трех вариантах (Huxley, 1932): $a>1$ — y растет быстрее, чем x (позитивная аллометрия); $a<1$ — y растет медленнее, чем x (негативная аллометрия); $a=1$ — y растет пропорционально x (изометрия).

Первые попытки применения зависимости (1.3) в количественной биологии относятся к концу прошлого века (Snell, 1891, цит. по: Reeve, Huxley, 1945). Позднее идея аллометрического роста развита Дж. Гексли (Huxley, 1932), С. Гулдом (Gould, 1966), М. В. Миной и Г. А. Клевезаль (1976). Последние обсудили онтогенетическую и статическую аллометрии и взаимосвязь между ними. В последние годы аллометрия исследована Г. Б. Кофманом с позиций теории подобия (Кофман, 1981; Кофман, Кузьмичев, 1981). Он показал теоретический характер аллометрической формулы как проявления подобия в сравниваемой совокупности состояний и исследовал нетрадиционные варианты подобия, в частности в процессах роста и изреживания древостоев.

Функция (1.3) известна в теоретической биологии и как функция параболического роста (Шмальгаузен, 1935). И. А. Терсков и М. И. Терскова (1980) делили период большого роста древостоев на несколько возрастных этапов и аппроксимировали таксационные показатели уравнением ступенчатого параболического роста, при этом рассчитывались констан-

Электронный архив УГПТУ

ты функции (1.3) для каждого этапа. Не отрицая общебиологической концепции авторов о наличии физиологически обусловленных точек перелома кривой, характеризующей рост организма, мы тем не менее склонны интерпретировать логарифмический полином n-го порядка как «исправленную» параболическую функцию. Действительно, прологарифмировав (1.3), получим $\lg y = \lg b + a \lg x$. Предположив, что константа a изменяется не дискретно от одного возрастного периода к другому, а непрерывно, например, $a = c_1 + c_2 \lg x$, и обозначив $\lg b = c_0$, получим логарифмический полином второго порядка, или функцию Корсуня—Бакмана, математические и биологические основы которой в литературе детально проанализированы (Korsun, 1935; Мауринь, 1980):

$$\lg y = c_0 + c_1 \lg x + c_2 \lg^2 x. \qquad (1.4)$$

В свою очередь, если в (1.4) $c_2 = d_2 + d_3 \lg x$, то имеем логарифмический полином третьего порядка

$$\lg y = d_0 + d_1 \lg x + d_2 \lg^2 x + d_3 \lg^3 x. \qquad (1.5)$$

(Возможность построения подобного рода рекуррентных соотношений указана автору Г. Б. Кофманом.)

Уравнение (1.5) в сравнении с (1.4) дает кривую, более близкую к опытным данным, однако по мере повышения степени, как и в случае обычного полинома, возрастает опасность описания случайных флуктуаций, что фактически является искажением тренда. В этой связи фраза Р. Мак-Лоуна (1979, с. 12): «Всякое уравнение длиной более двух дюймов скорее всего неверно!» — содержит определенный здравый смысл. Невозможность нахождения единственной модели по конечному числу экспериментальных данных составляет основной принцип теории множественности моделей. На основе теоремы неполноты Геделя А. Г. Ивахненко (1982) для отыскания уравнения оптимальной сложности разработал алгоритмы самоорганизации моделей. Ряд исходных данных в простейшем случае делится на обучающую и проверочную последовательности, причем среднеквадратическая ошибка, определяемая на проверочной последовательности, является внешним критерием для выбора структуры модели, синтезируемой по данным обучающей последовательности. Например, в случае нелинейного поля из 10 точек, расчлененного на две последовательности по 5 точек в каждой, при повышении степени полинома с 1 до 2 ошибка снизится, а по мере приближения степени к 5 будет стремиться к максимуму, так как кривые, аппроксимирующие ту и другую совокупности, пройдут точно через соответствующие 5 точек при

Электронный архив УГЛТУ

максимальном расхождении параметров кривых. Наличие минимума внешнего критерия и определяет выбор оптимального уравнения. Метод А. Г. Ивахненко дает особенно надежные результаты в экстраполяционных задачах. В задачах интерполяции и при краткосрочных прогнозах удовлетворительные результаты могут быть получены и при классическом регрессионном анализе (Розенберг, Феклистов, 1982).

Модели, построенные по принципу самоорганизации, совершенно не поддаются содержательной интерпретации, и применять этот метод в «чистом» виде нужно с определенной долей осторожности. Нельзя не согласиться с мнением Н. А. Плохинского (1978, с. 197), что «...недостаточное понимание специфики биологических объектов и особенностей биологических исследований приводит в некоторых случаях к проникновению в биологию элементов математического формализма, к отрыву математической формы от биологического содержания». Трудно и, по-видимому, невозможно претендовать на биологическую интерпретацию всех констант в множественных регрессиях. Практически суть проблемы зачастую состоит в отыскании координатной системы, в которой объект наиболее четко проявляет характерные свойства. На рис. 1 представлены зависимости между массой облиственных побегов $P_{дз}$ и диаметром D ствола березы в прямоугольных, полулогарифмических и логарифмических координатах, которым соответствуют полином первого порядка (прямая), экспоненциальная и аллометрическая (степенная) функции. Даже на основе поверхностного визуального анализа можно

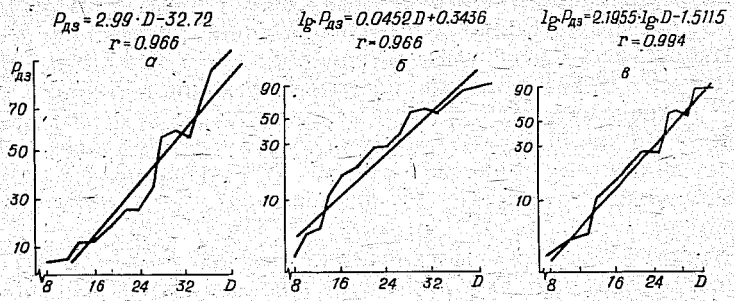


Рис. 1. Зависимость массы облиственных побегов березы от диаметра ствола в координатах: а — обычных, б — полулогарифмических, в — логарифмических ($P_{дз}$—в кг, D—в см)

Электронный архив УГЛТУ

сделать вывод о преимуществе аллометрической функции перед двумя другими. Результаты статистической обработки и сравнение их по коэффициенту корреляции для линеаризованных данных подтверждают этот вывод, хотя лишь на уровне значимости 0,1 (Усольцев, 1971). Показатель линейности связи (Лакин, 1973) во всех случаях меньше 3, и поэтому вполне применимо уравнение прямой. Если же проанализировать эту зависимость по показателю Дарбина—Уотсона (Четыркин, 1977), то вывод будет противоположным и подтверждающим первоначальный, сделанный на основе визуальной оценки. Таким образом, нельзя не согласиться с заключением Е. М. Четыркина (1977), К. Е. Никитина и А. З. Швиденко (1978) о невозможности выбора оптимального уравнения регрессии по тому или иному статистическому критерию. С учетом вышесказанного о принципе самоорганизации моделей ясно, что в данном случае речь идет о внутренних критериях, оцененных по всей совокупности исходных данных, объективность которых принципом самоорганизации отвергается.

При сравнительно простых многомерных задачах, подобных обсуждаемым в последующих главах, отыскание наиболее подходящей координатной системы для анализируемой связи может быть выполнено на основе визуальной оценки. Известно (Nokoe, 1980), что кривая лучше приближается к экспериментальным данным при визуальном выравнивании, чем при аналитической интерполяции (при использовании внутренних критериев).

При многомерном подходе к биологическому объекту изучения факторы (аргументы), как правило, коррелируют между собой (Дукарский, Закурдаев, 1971; Никитин, Швиденко, 1978). При этом имеют место синергизмы, или совместные эффекты двух или нескольких факторов, объясняющие, в частности, нелинейную часть их воздействия. А. А. Мауринь с соавт. (1977) показали, что введение квадратичной аппроксимации и синергизмов в трехфакторную линейную модель прогноза плодоношения тсуги канадской повысило коэффициент множественной детерминации с 0,476 до 0,790. Естественно, ввод комбинированных переменных вызывает необходимость дополнительного анализа действия последних, поскольку они могут исказить смысл влияния на отклик основных факторов (Никитин, Швиденко, 1978). Однако достаточно надежного математического аппарата для описания и анализа таких взаимовлияний пока не разработано (Лиепа, 1980). На-

личие в моделях даже статистически достоверных синергизмов может быть обусловлено влиянием фона неучтенных факторов. При опробовании структуры данной модели на других объектах неучтенные факторы могут стать причиной недостоверности или смены синергизмов. Поэтому желательно каждую константу множественного уравнения характеризовать показателем ее достоверности. Это определенным образом будет ориентировать исследователя при применении данной модели к другим аналогичным объектам.

Электронный архив УГЛТУ

При описании зависимости фитомассы дерева y от его морфометрических показателей x часто используют уравнение множественной статической аллометрии (Attiwill, 1962; Горбатенко, 1971; Карманова, 1976; Кричун, Усольцев, 1979)

$$y = a_0 x_1^{a_1} x_2^{a_2} \ldots x_n^{a_n}, \qquad (1.6)$$

где a_i — константы, известное в эконометрии как производственная функция Кобба—Дугласа (Dixon etc., 1980). Уравнение

$$y = a_0 (x_1^2 x_2)^{a_1}, \qquad (1.7)$$

упоминаемое в предыдущем разделе, представляет частный случай (1.6), когда $n=2$ и $a_2=2a_1$. Множественная статическая аллометрия в виде (1.6), а тем более ее частный случай (1.7), представляют в биологических исследованиях такое же исключение, как линейная парная связь среди множества нелинейных зависимостей, поскольку предполагают, что аллометрическая константа уравнения парной связи с одним из признаков никак не коррелирует с другим признаком. Это идеальный случай для множественного регрессионного анализа, но в реальной ситуации такой вариант можно допустить лишь с определенным приближением. Фактически, как правило, приходится иметь дело с синергизмами, и так же, как в парной связи ввод в уравнение факторов x и x^2 гарантирует их взаимную корреляцию, так и в множественной связи имеется та же ситуация при вводе x_1 и x_1x_2 или x_1 и x_1/x_2 и т. д. Поэтому стремление обеспечить при описании закономерности математическую корректность в известной мере приходит в противоречие с необходимостью адекватного описания.

Поскольку нелинейные регрессии трансформируются посредством логарифмирования и их статистический анализ выполняется в логарифмических единицах, то при ретрансформации теоретических данных в арифметические единицы происходит смещение оценок. Процедура введения поправок,

Электронный архив УГЛТУ

предложенная Бичемпом и Олсоном (Beauchamp, Olson, 1973), намного сложнее таковой по П. В. Мелентьеву (1962), но дает лучшее приближение к исходным данным. При высокой корреляции признаков, например, массы и диаметра ствола, смещение составляет менее 1% и возрастает по мере увеличения степени разброса данных, но всегда остается в пределах доверительного интервала регрессии. При исследовании связей фитомассы деревьев с их морфометрическими признаками (Уткин и др., 1979) установлено, что смещения при логарифмировании настолько незначительны, что корректировка данных на это смещение практически не улучшает результата. Дж. Флевеллинг и Л. Пиенар (Flewelling, Pienaar, 1981) анализируют множественные регрессии с логнормальной ошибкой и вводят соответствующие критерии. Несмотря на наличие компьютерных программ для несмещенных регрессионных оценок (Beauchamp etc., 1973), все перечисленные процедуры усложняют процесс расчета, особенно когда в модель приходится вводить трансформированные и нетрансформированные признаки, а также их синергизмы. При этом устраняемое смещение не имеет практического смысла, поскольку находится в пределах доверительной зоны регрессии. Кроме того, подобная коррекция смещений оправдана лишь в случае, если логарифмированные значения имеют достоверно логнормальное (Flewelling, Pienaar, 1981), а исходные — нормальное распределение. На практике же обычно сталкиваемся с асимптотически нормальными распределениями исходных данных, т. е. стремящимися к нормальным с увеличением объема выборки (Четыркин, 1977).

Резюмируя сказанное, необходимо, по-видимому, согласиться с мнением Е. М. Четыркина (1977), что если выполнять все статистические предписания как залог корректности многофакторной модели, то от применения множественного статистического моделирования придется отказаться и довольствоваться скудным инструментарием. По-видимому, при аппроксимации опытных данных практический смысл имеет оценка регрессий по соотношению остаточной и общей дисперсий, по стандартной ошибке с указанием пределов применимости регрессии и достоверности констант по критериям Стьюдента или Фишера. Требуемую точность необходимо соотносить с возможностью реализовать ее на практике, так как бессмысленно доводить модель до точности 5%, если исходные данные могут быть получены с ошибкой не ниже 10% (Мак-Лоун, 1979). При моделировании струк-

Электронный архив УГЛТУ

туры и динамики фитомассы древостоев автором применялось логическое обоснование аргументов с приведением их к линейному виду путем трансформирования на основе предварительного графического анализа, что хотя и не представляется бесспорным, но по крайней мере не уводит далеко от истины. При этом методе обеспечивается бо́льшая компактность модели и исходя из биологических и таксационных соображений дается предварительное общее представление о взаимосвязи переменных величин, число которых обычно не превышает 5—6. Большее число аргументов существенно не повышает точности модели, но делает ее более громоздкой и снижает критерии значимости констант.

Процесс этот чрезвычайно трудоемкий. При одновременном анализе нескольких факторов воздействия надежную модель можно получить лишь при условии, что исходные данные по каждому фактору получены в максимально широком диапазоне. В итоге приходится оперировать с массивом данных, измеряемым иногда тысячами дат.

Глава 2. КРАТКАЯ ПРИРОДНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

Районы исследований (юг Западной Сибири, север и юг Казахстана) характеризуются сложным и разнообразным орографическим устройством. Выделяются четыре крупные орографические, или геоморфологические, области (Берг, 1913; цит. по: Доскач, 1960): Западно-Сибирская низменность; Киргизская складчатая страна к югу от 54° с. ш., или, по современной терминологии (Грибанов и др., 1970), Казахский мелкосопочник; Тургайская столовая страна в пределах Тургайского прогиба, представляющего область относительного погружения между Казахским мелкосопочником и Уралом (Доскач, 1960; Грибанов и др., 1970); Сырдарьинская равнина в пределах обширной Туранской равнины в Средней Азии.

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 особенно-

Электронный архив УГПТУ

стей, в первую очередь климата, а также почвенного и растительного покровов, Западно-Сибирская низменность в широтном направлении расчленена на ряд природных зон — от полярных пустынь на севере до степи на юге (Крылов Г. В., Крылов А. Г., 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 выступающую на север часть Северо-Казахстанской области Северного Казахстана. А. Г. Доскач (1960) выделяет к югу от южной лесостепи колочную (нетипичную) лесостепь, простирающуюся на юг примерно до 54° с. ш.

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). Тургайская столовая страна примыкает к Западно-Сибирской низменности с юго-запада (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 чеганских глинах залегает толща (2—30 м) континентальных песчано-суглинистых осадков верхнеолигоценового, неогенового и четвертичного возрастов. 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).

Важнейшей чертой климата лесостепной и степной зон района исследований является его резкая континентальность,

Электронный архив УГПТУ

которая выражается в большой амплитуде максимума и минимума температур — 86° (Гудочкин, Чабан, 1958) и в малом количестве атмосферных осадков — 250—350 мм в год. Большое число часов солнечного сияния (2100—2400 в год), приходящееся на летнее время при сравнительно высоком стоянии солнца, обеспечивает значительный приход солнечной энергии. Испаряемость в летний период намного превосходит количество выпадающих осадков, что приводит к весьма засушливым условиям, особенно в степной зоне. Засушливые периоды опасны тем, что в конце их (в процессе трансформации воздушных масс) возникает суховейно-засушливая погода слабой интенсивности в лесостепи и в районах мелкосопочника и повышенной интенсивности в степных областях. Максимум повторяемости суховейно-засушливых погод приходится на июнь.

Климат пустынной зоны характеризуется еще большей континентальностью в сравнении со степной зоной. Средняя летняя температура 23—28° С; средняя зимняя —18° С; среднегодовое количество осадков 91—107 мм (Гудочкин, Чабан, 1958).

Лесная растительность в районах исследований представлена основными лесообразователями: сосной обыкновенной (Pinus silvestris L.), в т. ч. подвидом кулундинским (P. silvestris L. sub sp. kulundensis Sucaczev.), березой повислой (Betula pendula Roth.), пушистой (B. pubescens Ehrh.) и березой Крылова (B. krylovii G. Kryl.), осиной (Populus tremula L.), саксаулом белым (Haloxylon persicum Bge. ex Boiss) и черным (H. aphyllum (Minkw.) Iljin). По совокупности биоэкологических и географических признаков лесная растительность разделяется на ряд территориально обособленных типов лесных массивов. Ниже приводится краткая характеристика основных из них, приуроченных к вышеперечисленным природным зонам.

Сосновые леса

Сосновые леса в зоне умеренно засушливых и сухих степей Казахстана представляют интразональное явление. Травянистая растительность вместо типичных лесных форм зачастую представлена необычными для леса представителями степной флоры. Классификация сосновых лесов выполняется обычно по комплексу признаков экотипа и растительности (Бирюков, 1982). Леса произрастают на склонах возвышенностей Казахского мелкосопочника (Кокчетавская, Целино-

Электронный архив УГЛТУ

градская, Карагандинская обл.), в ложбинах древнего стока на флювиогляциальных и аллювиальных отложениях в пределах Западно-Сибирской низменности (ленточные боры Обь-Иртышского междуречья — Алтайский край и правобережье Иртыша в Павлодарской и Семипалатинской областях) и Тургайского прогиба (островные боры Кустанайской области).

Характерными группами типов леса Казахского мелкосопочника являются: очень сухие сосняки на бурых мелкопрофильных супесчаных скелетных почвах (V—Va — здесь и далее в скобках класс бонитета); сухие сосняки на бурых элювиированных слабодерновых мелко- и среднепрофильных почвах (IV—V); свежие сосняки на бурых лесных вторично-дерновых элювиированных глубокопрофильных скелетных, а также дерновых осолоделых почвах (II—III). Менее характерна группа влажных сосняков на бурых лесных вторично-дерновых элювиированных глееватых и дерновых аллювиальных почвах (I—II). Незначительна по распространению группа мокрых сосняков на торфянисто-болотных и торфяно-болотных почвах (III—IV). Островные и ленточные сосняки представлены группами типов леса: очень сухие сосняки на дерново-боровых слабодифференцированных песчаных почвах (IV—Va); сухие сосняки на дерново-боровых почвах (III—IV); свежие сосняки на дерново-боровых грунтово-глееватых почвах (II—III). Сосняки Казахского мелкосопочника локализованы по склонам горных кряжей и мелкосопочных гряд, а сосняки островных и ленточных боров — на равнинных, бугристо-котловинных и полого-бугристо-грядовых песках. Соответственно различаются и почвы. Лесорастительный эффект тех и других, выраженный классом бонитета, сходный и дифференцируется главным образом условиями увлажнения.

В целом сосняки степной зоны исследуемого региона рассматриваются как Уральско-Казахстанские остепненные, обедненные травяные и травяно-кустарниковые леса, являющиеся пирогенными и антропогенными вариантами сосняков Южного Урала, южной тайги Западно-Сибирской низменности и Рудного Алтая (Грибанов и др., 1970).

Колочные березово-осиновые леса

На пластовых равнинах Тургайского плато (южная часть Курганской и Челябинской областей и Кустанайская область), на юге Западно-Сибирской низменности (юг Тюмен-

Электронный архив УГЛТУ

ской и Омской областей и Северо-Казахстанская область) и в Прииртышье (северная часть Павлодарской области) неотъемлемую часть природного ландшафта составляют колочные леса из берез повислой, пушистой и Крылова, а также из осины. Сглаженная поверхность пластовых равнин нарушается системой грив (увалов), разделенных лощинообразными депрессиями различной ориентации, формы и размеров. По гривам и межгривным понижениям разбросаны микропонижения — почти плоские блюдцеобразные впадины, или западины. Возникновение их объясняют оседанием грунта вследствие выщелачивания и вымывания почвообразующих пород. В этих отрицательных элементах рельефа обычно и произрастают небольшие березовые рощи, или колки. Южнее 54—55° с. ш. острова березового леса все более мельчают. В их составе начинает преобладать береза повислая, совершенно исчезает береза Крылова, пушистая сохраняется только в понижениях. Снижается класс бонитета: с I—II в лесостепи до IV—V в степи. Изменяется формовой состав осины: если в колках южной лесостепи произрастает осина зеленокорой формы Iа—I классов, то в колочной лесостепи она постепенно сменяется серокорой менее продуктивной формой осины II—III классов, а в зоне степи продуктивность снижается до IV—V классов. Уменьшение продуктивности осины сопровождается увеличением фаутности вследствие наличия стволовой гнили. В наиболее жестких лесорастительных условиях степной зоны осиновые древостои распадаются в возрасте 35—40 лет. Тем не менее в условиях Казахского мелкосопочника по нижним частям склонов, на дренированных террасах и ложбинах стока сосновые и особенно сосново-березовые древостои сменяются осинниками и березняками вегетативного происхождения производного типа. Примерно на 90% площадей колочных лесов преобладает береза, остальные 10% площадей представлены колками с преобладанием осины (Грибанов и др., 1970).

В разное время различными авторами предложено несколько лесотипологических классификаций колочных лесов. Одни являют собой чисто ботанические классификации, в других учитываются генезис почв и эволюция растительности. К последним относится классификация В. В. Кузьмичева (1963а), который расчленяет колочные леса на две группы: березняки на осолоделых почвах и черноземах и березняки на солодях и болотных почвах. В каждой выделяются типы леса по напочвенному покрову. Л. Н. Грибанов с соавт.

Электронный архив УГЛТУ

(1970) в зависимости от комплекса экологических факторов и их режимов систематизируют колочные леса в три группы типов: сухие березняки на гривах и водораздельных плато с господством березы повислой; свежие и влажные березняки, чистые и с осиной по западинам на солодях; сырые и мокрые ивовые березняки с березой пушистой в западинах с избыточным увлажнением.

В. Н. Бирюков (1982) выделяет в колочных лесах четыре группы типов леса для березы и три — для осины. Березовые леса представляют: свежие березняки (береза повислая) на черноземах выщелоченных и солонцеватых по вершинам грив и в межгривных западинах (III—IV); влажные березняки (береза пушистая) на солодях оглеенных и лугово-черноземных почвах по плоским западинам (I—II); сырые березняки (береза пушистая) на солодях лугово-болотных по западинам с глубокими локальными понижениями (IV); мокрые березняки (береза пушистая) на лугово-болотных почвах по глубоким западинам (V). По аналогии с березняками рассматриваются три группы типов леса для осины: свежие, влажные и сырые осинники (I—V). В Казахском мелкосопочнике выделяется одна группа типов леса для временных березняков на бурых лесных вторично-дерновых почвах (II—III) и три группы — для коренных березняков: влажные, сырые и мокрые на почвах соответственно лугово-черноземных солонцеватых, солодях глеевых и глееватых, торфяно- и лугово-болотных (II—V). Для осины характерны одна группа временных осинников на темно-серых осолоделых почвах, а также влажные осинники на лугово-черноземных почвах и сырые осинники на солодях (II—III). Типология В. Н. Бирюкова принята Казахским лесоустроительным предприятием в качестве основной при устройстве лесов КазССР.

Леса лесостепной и степной зон выполняют важные почвозащитные функции, предохраняя колхозные и совхозные поля от губительного иссушающего действия ветров. Они повышают урожайность полей, имея, таким образом, то же значение, что и полезащитные лесные полосы.

Саксауловые леса

На юге СССР от низовьев Волги и Каспийского моря на западе до Китая на востоке на территории Туркменской, Узбекской и Казахской ССР раскинулись огромные пустынные и полупустынные территории, значительная часть которых

занята саксаульниками. Саксаул — дерево семейства маревых (Chenopodiacea), до 6—7 м высотой. В отличие от других древесных видов, саксаул за вегетационный период не образует настоящих годичных колец, поэтому определить его возраст с достаточной точностью невозможно. Отсутствует также листва в обычном понимании. Ассимиляционный аппарат представлен сосудисто-волокнистыми пучками в виде сочных ярко-зеленых веточек длиной 10—20 см. Белый саксаул отличается более светлыми веточками и характером их сочленений. Преобладающий возраст саксаульников 25—30 лет. Запас древесной массы обычно не более 2—3 т/га, иногда до 20—70 т/га. Саксаульники сильно отличаются от обычных хвойных и лиственных лесов, они почти не дают тени, деревья расположены редко, сомкнутость крон не превышает 0,4—0,5 (Грибанов и др., 1970). Саксаул — характерное дерево пустыни. Его насаждения образованы биоморфами, хорошо различающимися по высоте, долголетию и степени одревеснения. Некоторые исследователи относят саксаульник к типу лесопастбищных угодий, однако Л. Н. Грибанов с соавт. (1970) считают, что саксаульник вполне отвечает понятию «лес», по Г. Ф. Морозову, и называют саксаульники пустынными лесами. Они делят эти леса на восемь лесорастительных районов. Наши исследования фитомассы белого саксаула выполнены лишь в одном из них — Кызылкумском, расположенном к западу и востоку от Сырдарьи, в пределах Джамбульской и Чимкентской областей. В. Н. Бирюков (1982) выделяет в белосаксаульниках три группы типов леса: белосаксаульники полынные предпесков на песках, закрепленных без признаков почвообразования; белосаксаульники жузгуновые на песках, закрепленных и развеваемых без признаков почвообразования; белосаксаульники травяные на пустынных песчаных корковых солончаковатых или солончаковых почвах. Белый, или песчаный, саксаул — характерный представитель рыхлых песков с глубоким (10—40 м) залеганием грунтовых вод (Грибанов и др., 1970). Белосаксаульники играют значительную почвозащитную роль. Они широко используются в качестве топлива местным населением, а также как весенние и осенние пастбища.

Электронный архив УГЛТУ

Глава 3. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ДИНАМИКИ БИОПРОДУКТИВНОСТИ ДРЕВОСТОЕВ

3.1. Общеметодические вопросы учета фитомассы

3.1.1. Характеристика объектов исследований. Исследования биопродуктивности основных пород-лесообразователей: березы, осины, сосны и саксаула — в описанных выше регионах выполнялись на основе предварительного изучения лесорастительных условий. По материалам лесоустройства выбирались характерные группы типов леса и лесхозы, где эти группы наиболее полно представлены. Далее по таксационным описаниям и планам насаждений подбирались таксационные выделы с заданными характеристиками древостоев: составом, возрастом, происхождением, полнотой и т. д. При последующей рекогносцировочной работе отбирались лишь выделы, в действительности соответствующие требованиям. Размер выдела должен быть достаточным, чтобы можно было в его пределах заложить прямоугольную пробную площадь с относительно равномерной сомкнутостью крон, без прогалин и разрывов в пологе, без видимых следов повреждений и рубок. В молодняках семенного происхождения для этой цели подбирались крупные биогруппы деревьев, а в порослевых березовых молодняках основное внимание уделялось сравнительно равномерному распределению порослевых гнезд по площади. Конечно, «равномерность» эколого-ценотических условий в пределах пробной площади вследствие группового сложения древостоев была чисто условной. Стремление к «равномерности» продиктовано соображениями получения более надежных средних таксационных показателей древостоя, из которого впоследствии брали модельные деревья. По этим же соображениям определяли размер пробной площади, число деревьев на которой составляло от 100 до 300, редко больше.

Необходимо отметить, что подобрать древостои с целью получения динамических рядов по каждому таксационному признаку, чтобы остальные признаки находились на каком-то постоянном фиксированном уровне, в реальных условиях практически невозможно. Как уже говорилось, для сокращения размерности объекта исследования такие приемы ранее применялись с той или иной степенью их реализации. При наличии современных методов многомерного анализа эта кропотливая и сомнительно реализуемая работа потеряла

Электронный архив УГЛТУ

свою былую актуальность. Поэтому при подборе древостоев для исследования зависимости структуры и динамики фитомассы от основных факторов особое внимание уделялось тому, чтобы каждый исследуемый фактор был представлен возможно более широким диапазоном его значений. Минимальный возраст древостоев, отобранных для закладки пробных площадей, определялся минимальной высотой деревьев, равной 1,3 м, с целью учета всех деревьев данной популяции. В порослевых древостоях минимальный возраст составил 5 лет, в семенных березовых — 10, в сосняках — 13—20 лет. Как правило, выбирали простые одновозрастные древостои. Порослевые березняки вследствие вторичных генераций поросли относятся к условно одновозрастным. Смешение пород имело место на единичных пробных площадях в березово-осиновых древостоях, по степени представленности не уступающих чистым березовым и осиновым.

Пробные площади (17 для березы и 12 для осины) заложены в зоне лесостепи в Согровском лесхозе на границе Тюменской и Северо-Казахстанской областей во влажных березняках и осинниках на солодях и единично — в сырых. Класс бонитета березы I—II, осины Ia—I. Пять площадей березы II класса бонитета в условиях несколько меньшего увлажнения подобрано в Полудинском лесхозе, на юге лесостепной зоны. На названных площадях преобладают береза пушистая и осина зеленокорой формы с полным отсутствием поражений в виде стволовой гнили. В степной зоне площади (19 для березы и 5 для осины) заложены в свежих березняках и осинниках на черноземах выщелоченных и лугово-черноземных почвах на территории Боровского и Аракарагайского лесхозов Кустанайской области. Класс бонитета березы III—IV, осины III—V. Преобладают береза повислая и осина серокорой формы. В подзоне лесостепного высотного пояса (Казахский мелкосопочник) площади (4 для березы и 15 для осины) подобраны во временных и коренных типах березняков и осинников II—IV классов бонитета на территории Буландинского лесхоза на границе Целиноградской и Кокчетавской областей и на территории Бармашинского опытного лесхоза КазНИИЛХА и Золотоборского лесоохотничьего хозяйства Кокчетавской области. Общее число пробных площадей березы — 45 и осины — 32 с числом модельных деревьев, соответственно, 525 и 325 (табл. 3.1).

Исследования надземной фитомассы сосновых лесов прове-

Таблица 3.1

Характеристика пробных площадей, заложенных в березовых и осиновых древостоях лесостепной и степной зон

Возраст, лет	Число пробных площадей	Число модельных деревьев	Таксационные показатели древостоев: средний диаметр, см	средняя высота, м	сумма площадей сечения стволов, м²/га	число стволов на 1 га	относительная густота *	класс бонитета
Береза								
5—19	8	82	2,0— 5,5	3,2— 9,3	2,0—14,7	6550—33080	0,20—4,46	I—III
22—29	7	86	4,4— 9,7	8,9—14,0	13,1—25,8	2210—13688	0,76—6,29	I—III
32—36	7	75	7,3—12,7	10,1—17,6	16,6—30,2	1460—4050	0,90—2,23	I—III
43—49	4	39	11,0—16,4	12,2—18,3	16,1—37,5	861—1743	0,54—1,62	II—IV
50—59	6	56	14,3—19,0	13,7—18,0	14,1—29,1	495—1410	0,37—1,25	III—IV
60—68	5	63	17,2—20,4	17,0—20,3	16,8—38,8	555—1210	0,43—1,05	II—IV
70—86	8	124	17,0—25,0	19,3—21,6	16,3—31,2	343—843	0,41—0,91	II—III
Осина								
10—19	8	94	2,3— 9,2	4,0—11,9	6,6—24,7	3386—12620	0,56—1,92	I—IV
22—29	6	49	6,2—12,5	8,0—14,8	17,6—18,7	1431—5325	0,51—1,72	Ia—IV
35—36	7	85	16,6—20,0	12,8—20,5	18,0—33,8	800—1883	0,54—1,57	Ia—III
41—49	9	82	20,1—25,1	15,0—23,0	17,6—37,2	524—1061	0,57—1,51	I—III
52—53	2	15	31,0	17,4—18,3	26,6—28,8	410—450	0,66—0,75	II—III

* Фактическое число стволов на 1 га, отнесенное к числу стволов данного возраста и класса бонитета по таблицам хода роста сомкнутых древостоев (Усольцев, Кричун, 1982).

Электронный архив УГЛТУ

Электронный архив УГЛТУ

дены в Тургайском прогибе (Кустанайская обл.) и в Казахском мелкосопочнике (Кокчетавская обл.). В силу общности лесорастительных условий ленточных боров Тургайского прогиба и Обь-Иртышского междуречья (Бирюков, 1982) излагаемые ниже результаты могут быть отнесены на все островные и ленточные сосняки степной зоны региона. Пробные площади для учета фитомассы сосны (15 шт.) подобраны в Аракарагайском и Семиозерном лесхозах Кустанайской области в свежих сосняках на дерново-боровых грунтово-глееватых почвах, а также в Бармашинском опытном лесхозе КазНИИЛХА и Золотоборском лесоохотничьем хозяйстве Кокчетавской области (30 шт.) в очень сухих сосняках на бурых мелкопрофильных скелетных почвах (табл. 3. 2). Число модельных деревьев, взятых в свежих сосняках, — 147, в сухих — 336 (частично использованы экспериментальные данные А. С. Аткина).

Исследования фитомассы саксаула (Кричун, Усольцев, 1979) выполнены в белосаксаульниках жузгуновых на песках, закрепленных и развеваемых без признаков почвообразования (Бирюков, 1982) на территории Чимкентской области. По методике М. В. Гудочкина (1961) заложено 14 пробных площадей, на которых срублено и взвешено 335 модельных деревьев. Площади охватывают саксаульники трех классов бонитета (Iа—II) по шкале, составленной Казахским лесоустроительным предприятием. Представлены наиболее полнотные, производительные древостои. Кроме названных, использовано 11 площадей и 127 модельных деревьев Казахского лесоустроительного предприятия.

На всех площадях выполнен перечет деревьев по ступеням толщины от 0,5 до 4,0 см. Размер ступени толщины выбирался с учетом среднего диаметра древостоя таким образом, чтобы общее число ступеней было близким к 10. Обычно закладывались временные площади с фиксированием их по углам установкой столбов. Графики высот деревьев в зависимости от их диаметров строили по данным модельных деревьев. По результатам перечетов и замеров высот рассчитывали таксационные показатели древостоев.

В саксаульниках на площадях размером 0,25—0,50 га проводили перечет всех деревьев с замером диаметров ствола у шейки корня по двухсантиметровым ступеням толщины. Рейкой измеряли высоты и диаметры крон с точностью до 10 см. После построения графика средневзвешенных высот из всех замеров по ступеням толщины подбирали и взвешивали

Таблица 3.2

Характеристика пробных площадей, заложенных в сосновых древостоях

Возраст, лет	Число пробных площадей	Число модельных деревьев	Таксационные показатели древостоев					
			средний диаметр, см	средняя высота, м	сумма площадей сечения стволов, м²/га	число стволов на 1 га	относительная густота*	Класс бонитета
Сосняки Казахского мелкосопочника								
18—22	6	76	1,6— 2,6	2,9— 3,6	13,4—16,0	24924—75303	0,76—2,31	V
35—40	11	136	3,6— 8,8	5,1— 8,4	21,2—25,4	3840—22734	0,19—1,12	V
60—70	10	87	4,9— 9,0	6,4— 9,4	29,4—43,0	4644—21139	0,45—2,05	V
90—92	3	37	13,8—19,7	14,0—17,7	28,4—37,0	1330—2470	0,24—0,45	V
Сосняки Тургайского прогиба								
13	1	9	1,7	2,7	18,5	82400	1,13	III
22—27	3	30	3,2— 4,3	5,6— 6,8	28,3—36,7	19276—43810	1,61—2,8	III
31—35	4	38	4,0— 9,0	7,8—11,8	33,6—48,7	6947—19910	1,63—2,56	III
54—70	4	40	11,6—22,4	14,3—21,6	29,6—41,7	874—3950	0,55—2,50	III
101—104	3	30	20,0—27,0	20,5—23,0	22,1—38,0	402—528	0,53—0,78	III

* Фактическое число стволов на 1 га, отнесенное к числу стволов для данного возраста по таблицам хода роста (Макаренко, 1980).

Электронный архив УГЛТУ

Электронный архив УГЛТУ
модельные деревья. Затем все деревья на пробной площади выламывали и взвешивали с выделением товарной категории древесины.

3.1.2. Отбор модельных деревьев. Известно, что точность учета фракций фитомассы древостоя зависит в первую очередь от метода отбора модельных деревьев (Молчанов, Смирнов, 1967; Горбатенко, Протопопов, 1971; Семечкина, 1978). На начальном этапе исследований практиковался расчет фитомассы древостоя по данным среднего дерева. Низкая точность такого метода (с отклонением от 74 до 110% от фактической массы крон древостоя, Поздняков и др., 1969) объясняется тем, что место среднего дерева различается в зависимости от признака, по которому составлен ряд распределения, т. е. разным фракциям фитомассы соответствуют различные средние деревья (Семечкина, 1978). Кроме того, в ряду распределения даже по одному признаку место среднего дерева обладает определенной изменчивостью (Семечкина, 1978). Лучшие результаты дает отбор модельных деревьев, взятых в пределах всего диапазона варьирования их размеров на пробной площади. Количество деревьев и метод их отбора в каждом конкретном случае должны определяться из оптимального соотношения трудозатрат и требуемой точности. Естественно, в зависимости от конкретного древостоя и целевой установки методы взятия модельных деревьев и общее их число различными исследователями рекомендуются самые разнообразные. Обзор этих методов дан в работах В. М. Горбатенко и В. В. Протопопова (1971), М. Г. Семечкиной (1978). Лучшим признается отбор деревьев по пропорционально-ступенчатому представительству (Горбатенко, Протопопов, 1971). Сильное варьирование массы кроны требует взятия большого числа модельных деревьев. М. Г. Семечкина (1978) с целью повышения точности учета фитомассы рекомендует тщательный отбор деревьев по ступеням толщины с высотами, близкими к средним значениям, полученным по графику высот. При числе деревьев 1, 5 и 15 ошибки имели соотношение 100 : 40 : 24. Т. Котимаки и Т. Куниа (Kotimaki, Cunia, 1981) предлагают отбирать деревья по кластерам. При этом вводят несколько модификаций в регрессионный анализ, поскольку обычная техника, основанная на допущении простой рандомизированной, а не кластерной выборки, дает существенные смещения.

Электронный архив УГЛТУ

Чтобы выяснить, как влияют на точность учета фитомассы метод отбора модельных деревьев и общее их число, нами выполнена специальная методическая работа. В 45-летнем березняке порослевого происхождения на площади 0,16 га срублено и обработано 104 дерева.

Класс бонитета древостоя III, полнота 0,9, запас 134 м³/га, средний диаметр 15,5 см, средняя высота 15,4 м. Листву отделяли полностью от всех ветвей кроны. Работа выполнялась звеном из 15—17 человек, так что время обработки даже самых крупных деревьев было в пределах одного часа. Массу ствола определяли обмером диаметров в коре и без коры по относительным высотам 0; 0,05; 0,1; 0,2; ..., 0,9 с переводом объема древесины и коры в массу по значениям плотности, полученной по дискам, выпиленным на тех же относительных высотах. Масса коры ветвей найдена расчетным путем по методу, который будет изложен ниже. Учтено шесть фракций: листва, древесина и кора ветвей, древесина и кора ствола и отмершие ветви. Выполнено две систематизации (группировки) деревьев: по 11 двухсантиметровым ступеням толщины и по 10 группам рангов толщины (по децилям). Каждая группа представляет класс роста деревьев, определенный несколько формально, но зато объективно (в отличие от назначения классов по Крафту). Отбор деревьев произведен в количестве 1, 5, 10, 15 и 20 шт. в такой последовательности: одно дерево из ступени толщины и группы рангов, в которые входит среднее дерево древостоя, одно дерево от каждой ступени толщины и от каждой группы рангов, далее по 2 дерева и т. д., пока не набиралось вышеуказанное количество деревьев.

Подбор по группам рангов отличается от подбора по ступеням толщины тем, что при одном и том же количестве деревьев последние перераспределяются по толщине, при этом большее их число приходится на центральные ступени за счет сокращения числа в крайних ступенях. Подбор деревьев по группам рангов, таким образом, практически не отличается от рекомендованного методом пропорционально-ступенчатого представительства. В пределах каждого из указанных вариантов осуществлялись систематическая и случайная выборки деревьев. Построены графики зависимости высот деревьев от диаметра ствола и от ранга. Поле рассеяния опытных значений высот расчленено в первом случае по 11 ступеням толщины, во втором — по 10 группам рангов. В систематическую выборку вошли деревья, высоты которых в пределах

Электронный архив УГЛТУ

ступени толщины или группы рангов наиболее близки к даваемым графиком высот, а в случайную—деревья в тех же ступенях, отбираемые по таблице случайных чисел. Каждый вариант выполнен в трех повторностях, рассчитаны аллометрические уравнения связи фракций фитомассы с диаметром ствола как наиболее информативным морфометрическим показателем дерева. Таким образом, для каждой фракции получено по 48 уравнений (4 градации по числу моделей×4 градации по способу отбора × 3 повторности). Уравнения идентифицированы по опытным данным для всех 104 деревьев, и рассчитаны ошибки:

систематическая $$O_p = \frac{1}{n} \sum_i [(y_i - \bar{y}_i)/\bar{y}_i] \cdot 100\%;$$

случайная $$O_\sigma = \pm \sqrt{\frac{1}{n} \sum_i \{[(y_i - \bar{y}_i)/(\bar{y}_i] \cdot 100\% - O_p\}^2};$$

относительное отклонение в пересчете на совокупность модельных деревьев

$$O_o = (\sum_i y_i - \sum_i \bar{y}_i) \cdot 100\% / \sum_i \bar{y}_i, \qquad (3.1)$$

где y_i и $\bar{y}_i$ — расчетное и фактическое значения фитомассы; $n=104$ деревьям.

По формуле (3.1) определены также отклонения значений фитомассы, рассчитанных по одному среднему дереву.

Дисперсионный анализ ошибок по трехфакторному равномерному комплексу показал, что их варьирование не объясняется достоверно ни числом отобранных деревьев в пределах от 5 до 20, ни методом отбора как по ступеням толщины и по группам рангов, так и случайной и систематической выборками. Отклонение расчетных значений фитомассы от опытных наибольшее при взятии одного среднего дерева, а при 10 и более деревьях — ниже и практически не зависит от числа деревьев. Изложенное дает основание полагать, что метод отбора модельных деревьев по группам рангов толщины и объем выборки в количестве 10 деревьев, практикуемые нами, вполне правомерны. Это позволяет сократить количество наиболее крупных модельных деревьев, увеличение времени обработки которых не адекватно возрастанию их размеров. Увеличение числа деревьев сверх 10 приводит к чрезмерным тратам времени и средств, которые не компенсируются повышением точности.

Электронный архив УГЛТУ

3.1.3. Обработка модельных деревьев. Точность учета фитомассы зависит не только от метода отбора модельных деревьев, но и от процедуры их обработки: времени года и суток, погодных условий, способов расчленения, обмера и взвешивания различных фракций фитомассы и т. д. Эти факторы объясняют различную изменчивость получаемых показателей фитомассы, обусловленную, во-первых, разной степенью участия прироста текущего года в общей массе той или иной фракции (особенно чувствительна к этому листва); во-вторых, различным содержанием влаги во фракциях (обусловленным, в свою очередь, изменением физиологической активности дерева в зависимости от ценотического положения, погодных условий, изменения радиационного режима в течение суток, различной продолжительностью обработки крупных и мелких деревьев, потерями влаги у взятых образцов и т. д.); в-третьих, точностью методов взятия модельных ветвей или какой-то части кроны с целью сокращения времени расчленения листвы и ветвей, а также методом определения массы ствола (весовым или стереометрическим) и, наконец, точностью выполнения самих операций измерения и взвешивания.

А. А. Молчанов и В. В. Смирнов (1967) рекомендуют для обработки модельных деревьев период с середины июля по 20 августа. А. Ф. Ильюшенко (1968) установил, что масса листвы березы с середины мая по первые числа июня нарастает от нуля до 70—80% от максимальной, М. Г. Семечкина (1978) и А. И. Уткин (Биологическая продуктивность..., 1982) считают наиболее подходящим период с середины августа до начала листопада. В лесостепной и степной зонах исследуемого региона полное распускание листвы березы и осины обычно приурочено к началу июня, а рост хвои заканчивается у сосны к началу июля. Поэтому основная масса модельных деревьев лиственных пород обработана в период с конца июня по август, а сосны — с июля по август. Названные сроки удобны и в другом отношении. Для пересчета массы фракций на абсолютно сухое состояние необходимо знать показатели влажности. В. В. Смирновым (1964) выявлена стабилизация влажности фракций фитомассы, начиная с середины вегетационного периода после окончания ростовых процессов и до начала подготовки растений к зиме. Обработка моделей в период относительной стабилизации влажности позволяет получить более надежные результаты.

Модельные деревья спиливали на уровне корневой шейки,

Электронный архив УГЛТУ

измеряли общую высоту ствола от среза и длину кроны. Ствол размечали по относительным высотам — 0; 0,05; 0,1; 0,2; ...; 0,9 и вблизи отметок выпиливали диски в сечениях с наименьшими локальными флуктуациями формы. Измеряли диаметры дисков в коре и без коры с точностью 0,1 мм штангенциркулем в двух взаимно перпендикулярных направлениях, а также толщину по центрам дисков. По результатам замеров рассчитывали объемы древесины и коры ствола. Не вдаваясь в анализ преимуществ и недостатков различных способов взятия образцов для определения плотности и влажности древесины, отметим лишь, что метод дисков при сравнительно меньшей точности стереометрического определения объема дает возможность исследовать названные показатели на всех возрастных этапах деревьев, включая начальный, когда толщина стволика составляет доли сантиметра. Метод позволяет брать образцы не только древесины, но также коры, не только ствола дерева, но и ветвей. Древесину и кору дисков сушили в термостате при 100—105° С до постоянного веса, взвешивали до и после сушки с точностью 0,1 г и рассчитывали плотность и содержание сухого вещества. Полученные значения использовали для пересчета показателей объема на массу. Крупные диски рассекали на секторы в 1/2 или 1/4 диска. Для предотвращения потерь влаги в период между выпиливанием и взвешиванием диски помещали в отдельные полиэтиленовые пакеты известной массы. Возраст деревьев определяли по годичным кольцам на пне.

Расчленение кроны на листву и ветви производили комбинированным способом. Ветви каждого дерева обрубали и взвешивали на пружинных весах с точностью 50 г (у мелких деревьев — до 5 г). Облиственные побеги обрезали секаторами при составе звена 3—4 человека. Затем ветви взвешивали вновь, а для определения соотношения масс листвы и побегов в середине кроны брали модельную ветвь, взвешивали с точностью 5 г, обрезали с нее облиственные побеги, взвешивали их, вручную освобождали от листвы, затем вновь взвешивали. У крупных деревьев брали одну модельную ветвь, у более мелких — две-три из разных частей кроны с таким расчетом, чтобы масса побегов была не ниже 1—3 кг. Массу побегов без листвы прибавляли к массе ветвей. Варьирование доли листвы в массе облиственных побегов незначительно — 2—5%. У мелких деревьев листву отделяли со всей кроны. В молодняках осуществляли полное отделе-

ние листвы у всех деревьев на пробной площади, а в более старших возрастных группах — лишь у деревьев низших рангов с таким расчетом, чтобы время на отделение всей листвы не превышало суммарного времени отделения облиственных побегов секаторами и ручной обработки модельной ветви у самого крупного дерева. Подобная комбинированная процедура позволяет снизить погрешность определения массы листвы за счет сокращения и выравнивания сроков обработки деревьев различной величины при незначительной ошибке выборочного значения доли листвы в массе облиственных побегов. Генеративные органы и отмершие ветви взвешивали отдельно и брали образцы на влажность. Влажность листвы находили по навескам, взятым из верхней, средней и нижней частей кроны, каждая в объеме почвенного стаканчика (бюкса).

Массу ветвей пересчитывали на абсолютно сухое состояние также по дискам. Взято от каждого модельного дерева произвольно по длине ветвей и независимо от положения в кроне в среднем три диска — от ветвей крупных, средних и тонких. Учитывая, что варьирование массы ветвей намного превышает таковое для ствола, применена упрощенная процедура определения доли коры в массе ветвей и пересчета массы ветвей на абсолютно сухое состояние. Она предусматривает перечет всех ветвей кроны по диаметру у основания с градацией 0,2; 0,5; 1,0; 2,0; 3,0; 5,0 см и т. д. Порядок ветвей не учитывается, у каждой ветви обрезаются все ответвления следующего порядка, с последними производится то же и т. д.

Определение массы корневых систем методом полной раскопки всех фракций, включая самые тонкие, чрезвычайно трудоемко. Для получения статистически достоверных и достаточно репрезентативных данных названный метод совмещен с электрометрическим (Якушев, 1972). У 170 модельных деревьев сосны, взятых по 9—10 штук на каждой из 18 пробных площадей, масса корневых систем определена электрометрическим способом. Из указанного количества на 8 пробных площадях полностью раскопаны 15 корневых систем, принадлежащих средним деревьям, на глубину проникновения корней в пределах рассчитанной площади роста дерева (Усольцев, Крепкий, 1984). Корни отбирали в процессе просеивания почвогрунта на сите с размером ячеек 3 мм и сортировали по толщине. Самые тонкие фракции толщиной менее 1 мм отмывали из почвогрунта. Корневую систему вы-

Электронный архив УГЛТУ

сушивали полностью при температуре 100—105° С и взвешивали. Ошибки электрометрического метода (случайная ±4,8%, систематическая +0,07%) незначительны вследствие групповой раскопки корневых систем (в молодняках) либо подбора среднего дерева, для удобства раскопки достаточно удаленного от соседей. Однако при подеревном электрометрическом учете в биогруппах наблюдается завышение массы корней вследствие их срастания.

3.2. Оценка древесины и коры ветвей

Крона дерева образует довольно сложную по архитектонике систему (кластер) ветвей и побегов, закономерности прикрепления и ориентации которых в пространстве трудно поддаются формализации, и в целях оценки валовых показателей биопродуктивности древостоев этими закономерностями можно пренебречь. Масса кроны может быть оценена по аналогии с массой ствола стереометрическим способом, применяющимся в таксации запаса древостоев, и весовым, получившим распространение в исследовании биопродуктивности древостоев.

3.2.1. Стереометрический способ учета массы ветвей. В литературе имеется опыт составления объемных таблиц ветвей с использованием методики В. К. Захарова (1967) по двум факторам — длине и диаметру у основания — для пихты, осины и сосны (Голиков, 1963; Данилин, 1965; Воробьева, 1968). Для березы подобных таблиц нет. Определение объема ветви, как и ствола, связано с исследованием их формы и полнодревесности. Последнее имеет не только прикладной, но и теоретический аспект, поскольку является составной частью исследований динамики морфометрических признаков структурных элементов, образующих древесный полог.

Форма и объем ветвей исследовались нами на двух пробных площадях в спелых березняках III класса бонитета (Кричун, Усольцев, 1978) в районе Казахского мелкосопочника (Бармашинский лесхоз КазНИИЛХА). Один из древостоев представляет весьма распространенную группу временных березняков на бурых лесных вторично-дерновых почвах, второй относится к группе коренных мокрых березняков на торфяно-болотных почвах на гранитах. На пробных площадях срублено, соответственно, 183 и 384 дерева. Деревья

раскряжевывались на относительных высотах. Для определения формы стволов и ветвей на каждой пробе методом случайной выборки взято 100 деревьев и по относительным длинам h обмерено 100 ветвей.

В результате анализа полученных статистических данных относительного сбега стволов и ветвей по относительным длинам не было выявлено различия формы стволов и ветвей по условиям местопроизрастания. Суммарный показатель различия индексов диаметров стволов (Чуенков, 1960) составил 1,4%, ветвей — 3,6%; различие нормальных видовых чисел для стволов и ветвей не превышало 2%. Это позволило объединить в одну совокупность показатели формы стволов и ветвей по обеим пробам и установить их форму и полнодревесность (табл. 3.3).

Таблица 3.3

Статистики сбега стволов и ветвей и объем ветвей по относительным длинам

h	Ствол				Ветви					Объем ветви, %
	$\bar{X}\pm m$	σ	C_v	P	$\bar{X}\pm m$	σ	C_v	P	t	
0,0	141,8±1,04	1,5	10,4	0,7	111,7±0,52	7,2	6,5	0,5	12,8	—
0,1	100	—	—	—	100	—	—	—	—	23,2
0,2	90,2±0,34	4,8	5,3	0,4	92,2±0,37	5,2	5,6	0,4	4,0	44,0
0,3	83,8±0,39	5,5	6,6	0,5	83,9±0,46	6,5	7,8	0,6	4,3	62,0
0,4	76,2±0,45	6,4	8,3	0,6	73,6±0,55	7,7	10,5	0,7	5,5	74,0
0,5	67,5±0,46	6,6	9,7	0,7	63,6±0,64	9,1	14,3	1,0	7,8	85,0
0,6	57,9±0,50	7,0	12,2	0,9	51,7±0,64	9,1	17,5	1,2	7,6	92,0
0,7	46,0±0,49	6,9	14,9	1,1	39,8±0,66	9,3	23,3	1,7	6,5	97,0
0,8	31,9±0,45	6,4	20,0	1,4	26,6±0,57	8,1	30,2	2,1	7,2	99,0
0,9	17,4±0,31	4,4	25,0	1,8	14,7±0,43	6,0	41,1	2,9	5,1	99,7

Нормальное видовое число составляет 0,518, что подтверждают установленные ранее данные для отдельных древостоев (Кричун, Усольцев, 1978). Ветви отличаются от стволов большей сбежистостью. Различие в сбеге по рассматриваемым относительным высотам существенно ($t>3$), при этом видовое число ветвей на 11,8% ниже, чем стволов. Изменчи-

вость относительных диаметров ветвей и стволов аналогична до сечения 0,5, а далее у ветвей примерно в 1,5 раза выше.

Используя относительно стабильную форму ветвей, особенно до сечения 0,4—0,5, где сосредоточено от 75 до 85% общего объема ветви, установленную связь между диаметрами ветви у основания D_0 (в см) и на относительной длине 0,1 $D_{0,1}$ (в см), а также индивидуальную полнодревесность ветвей различной длины, мы составили таблицу объемов (прил. 1). Объем ветвей V рассчитан по известной формуле, включающей длину ветви l (в м), нормальное видовое число f_n и квадрат диаметра $D_{0,1}$: $V=0{,}7851\, f_n D_{0,1}^2$, с использованием следующих уравнений: $D_{0,1}=0{,}218+0{,}852D_0$; $f_n=0{,}505-0{,}048/l$, где коэффициенты детерминации $R^2=0{,}910-0{,}994$.

Согласно ТУ 56 РСФСР 39—76 диаметр ветвей-топорника в верхнем отрубе должен быть от 2 до 5 см. В целях соответствия объемов ветвей этим условиям, используя относительные диаметры на относительных длинах ветвей (см. табл. 3.3), мы составили номограмму (рис. 2), горизонтальная линия которой отсекает значения относительной длины ветви при верхнем диаметре 3 см в зависимости от диаметра у основания ветви. По выявленной зависимости относительного объема ветви от ее относительной длины (см. табл. 3.3) вычислены объемы ветвей при диаметре в верхнем сечении 3 см (см. прил. 1). Предлагаемая таблица может быть использована при составлении сортиментных таблиц и в качестве норматива для определения объемов ветвей непосредственно на лесосеках. По данным проверки, на 149 экземплярах ветвей отклонения при пользовании ею составили: среднеквадратическое $\pm 17{,}3\%$, систематическое $+0{,}66\%$ и для всех случаев 1,4%. Следовательно, таблица может быть применена для оценки объемов ветвей в массовых совокупностях.

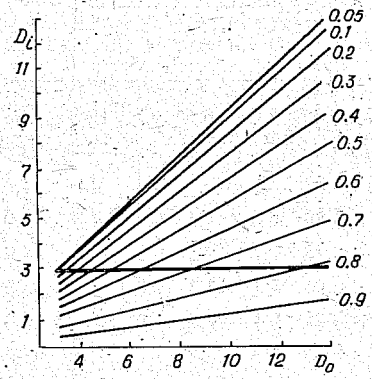


Рис. 2. Сбег по относительным длинам ветвей; 0,05; 0,1; 0,2; ...; 0,9 — относительные длины ветвей (D_1 и D_0—в см)

Электронный архив УГЛТУ

3.2.2. Метод определения содержания коры при весовом способе учета кроны. В таблицах биопродуктивности фитомасса кроны учитывается весовым способом с пересчетом на сухое вещество. Необходимо лишь выявить долю коры в массе ветвей дерева, определенной непосредственным взвешиванием. Задача упрощается тем, что если объем ветви — функция диаметра и длины

$$V_{вк} = (\pi l/4) \sum_{i=1}^{n} D_i^2,$$

где $V_{вк}$ — объем ветви в коре; n — число секций, на которые делится ветвь; l — длина секции, равная l/n длины ветвей; D_i — диаметр по середине i-й секции в коре, то процент объема коры — функция лишь диаметров ветви в коре и без нее:

$$П_{св}{}^{0} = (V_к/V_{вк}) \cdot 100\% = \left[\sum_{i=1}^{n} (D_i^2 - d_i^2) / \sum_{i=1}^{n} D_i^2 \right] \cdot 100\% . \quad (3.2)$$

Здесь $П_{св}{}^{0}$ — объемный процент коры ветви в свежесрубленном состоянии; $V_к$ — объем коры ветви; d_i — диаметр по середине i-й секции без коры. Поэтому таблицы В. В. Голикова (1963) и М. А. Данилина (1965) не отражают связи процента объема коры с разрядом длин ветвей, о чем упоминает и В. М. Воробьева (1968).

Для расчета соотношения масс коры и древесины в ветвях проценты коры, рассчитанные по совокупности имеющихся дисков, скоррелированы с диаметром диска в коре. Получены уравнения для березы

$$П_{св}{}^{в} = 20{,}8 + 136{,}7/D_i; \; R^2 = 0{,}812; \quad (3.3)$$

осины

$$\lg П_{св}{}^{в} = 2{,}0716 - 0{,}385 \lg D_i; \; R^2 = 0{,}974; \quad (3.4)$$

сосны

$$\lg П_{св}{}^{в} = 1{,}5393 - 0{,}691 \lg D_i; \; R^2 = 0{,}994, \quad (3.5)$$

где $П_{св}{}^{в}$ — содержание коры в процентах от массы диска ветви в свежесрубленном состоянии; D_i — диаметр диска ветви, мм. Однако уравнения (3.3)—(3.5) не дают представления о содержании коры как функции диаметра у основания ветви. Для получения такой зависимости предлагается расчетный метод с использованием уравнений (3.3)—(3.5). Вычисление проводится по трансформированной формуле (3.2), где n обозначает не число секций, на которые делится ветвь, а порядковый номер ступени толщины по длине ветви с гра-

Электронный архив УГЛТУ

дацией, в данном случае 5 мм; D_i — диаметр элементарного цилиндрического отрезка, кратный 5 мм. Если D — толщина побегов в текущем году в миллиметрах, то $D_1=D+5$, $D_2=D+10$, ..., $D_n=D+5n$. Для каждой ступени диаметра D_i по формулам (3.3)—(3.5) вычисляется процент коры, по которому для соответствующих элементарных отрезков находятся диаметры без коры:

$$d_i = D_i \sqrt{\frac{\rho_w^{к}(100 - П_{св}^{в})}{100\rho_w^{к} - (\rho_w^{к} - \rho_w^{д})П_{св}^{в}}},$$

где $П_{св}^{в}$ — весовой процент коры в элементарных отрезках; $\rho_w^{д}$ и $\rho_w^{к}$ — плотность древесины и коры в свежесрубленном состоянии, кг/м³.

Формула получена путем выражения величины $П_{св}^{в}$ через D_i и d_i, $\rho_w^{д}$ и $\rho_w^{к}$ с последующим решением полученного уравнения относительно d_i. Значения d_i могут быть получены по более простой формуле $d_i=D_i\sqrt{1-0{,}01П_{св}^{0}}$, где $П_{св}^{0}$ — объемный процент коры в элементарном отрезке. Однако применение весовых процентов дает более точные результаты, так как исключается влияние дефектов формы коры (трещин, наплывов и т. п.).

В результате расчетов по описанной процедуре с использованием трансформированной формулы (3.2) получены значения объемных процентов коры $П_{св}^{0}$ в зависимости от диаметра ветви у основания (табл. 3.4). Значения процентов коры по объему $П_{св}^{0}$ и весу $П_{св}^{в}$ в свежесрубленном состоянии могут совпадать только при условии одинаковой плотности коры и древесины ветвей. Точно так же значения процентов коры по весу в свежесрубленном $П_{св}^{в}$ и абсолютно сухом $П_{сух}^{в}$ состояниях равны лишь при одинаковом содержании абсолютно сухого вещества в коре и древесине. В табл. 3.5 приведены средние по региону показатели плотности и содержания абсолютно сухого вещества фракций фитомассы, полученные по совокупности имевшихся в нашем распоряжении модельных деревьев (см. табл. 3.1, 3.2). Достоверного различия физико-технических свойств древесины ветвей и ствола нет, например, у березы. Однако при сходных значениях толщины ветвей в спелых древостоях и толщины стволиков в молодняках названные показатели существенно различаются (Усольцев, 1973). Из данных табл. 3.5 следует, что физико-технические характеристики древесины и коры, как правило, достоверно различаются и, следовательно, назван-

Электронный архив УГЛТУ

Таблица 3.4

Содержание коры в ветвях березы, осины и сосны в зависимости от диаметра у основания

Диаметр у основания ветви, см	Объем коры, %			Масса коры, %, в состоянии					
				свежесрубленном			абсолютно сухом		
	березы	осины	сосны	березы	осины	сосны	березы	осины	сосны
0,5	56,4	62,2	83,3	63,6	69,9	84,2	63,0	66,9	83,5
1,0	38,2	50,7	45,2	45,5	59,3	46,8	44,9	55,9	45,6
1,5	31,1	42,0	32,7	37,9	50,6	34,2	37,3	47,1	33,1
2,0	27,2	36,6	26,7	33,5	44,9	28,0	33,0	41,4	27,0
2,5	25,3	33,1	23,1	31,4	41,2	24,3	30,9	37,8	23,4
3,0	24,1	30,5	21,5	30,0	38,3	22,6	29,5	35,0	21,7
4,0	23,0	27,0	19,4	28,7	34,3	20,4	28,2	31,2	19,6
5,0	22,0	24,6	17,4	27,6	31,6	18,4	27,1	28,6	17,7
6,0	21,4	23,4	16,3	26,9	30,2	17,2	26,4	27,3	16,5
7,0	20,8	22,2	15,3	26,2	28,8	16,2	25,7	26,0	15,5
8,0	20,4	21,0	14,5	25,7	27,3	15,3	25,2	24,6	14,7
9,0	20,1	20,0	14,0	25,4	26,1	14,8	24,9	23,5	14,2
10,0	19,8	19,0	13,5	25,0	24,9	14,3	24,5	22,4	13,7

Таблица 3.5

Физико-технические свойства фракций фитомассы

Фракция	Плотность в свежесрубленном состоянии, кг/м³			Содержание абсолютно сухого вещества, %		
	береза	осина	сосна	береза	осина	сосна
Древесина ветвей	863±7	784±5	929±5	56,6±0,46	59,4±0,26	49,1±0,27
Кора ветвей (с лубом)	1165±21	1109±10	992±8	55,2±0,50	51,6±0,33	46,7±0,30
Древесина ствола	863±7	762±8	809±6	56,2±0,66	55,3±0,65	52,1±0,45
Кора ствола (с лубом)	937±16	962±8	512±10	57,5±1,19	48,9±0,79	50,8±0,59
Хвоя (листва)	—	—	—	38,5±0,31	36,6±0,47	46,9±0,18
Отмершие ветви	—	—	—	89,0±1,5	77,2±1,7	86,7±1,4

Электронный архив УГЛТУ

ные выше значения процентов коры по массе и по объему не совпадают.

Для пересчета объемных процентов в весовые предлагается формула

$$П_{св}^{в} = \frac{П_{св}^{о}\rho_w^{к} \cdot 100\%}{100\% \cdot \rho_w^{д} + П_{св}^{о}(\rho_w^{к} - \rho_w^{д})}, \qquad (3.6)$$

для пересчета весового процентного содержания коры в свежесрубленном и абсолютно сухом состояниях — формула

$$П_{сух}^{в} = \frac{П_{св}^{в} \cdot 100\%}{П_{св}^{в} + (100\% - П_{св}^{в})S_д/S_к}, \qquad (3.7)$$

где $S_д$ и $S_к$ — содержание абсолютно сухого вещества в древесине и коре ветвей соответственно, %.

Данные о физико-технических характеристиках фракций фитомассы древостоев могут быть полезны при ориентировочных расчетах их ресурсов. В этом случае формулы (3.6) и (3.7) с использованием средних показателей плотности и содержания абсолютно сухого вещества древесины и коры ветвей (см. табл. 3.5) можно привести к частному виду:

для березы

$$П_{св}^{в} = \frac{116{,}5П_{св}^{о}}{86{,}3 + 0{,}302 \cdot П_{св}^{о}}; \qquad (3.8)$$

$$П_{сух}^{в} = \frac{100П_{св}^{в}}{102{,}5 - 0{,}025П_{св}^{в}}; \qquad (3.9)$$

для осины

$$П_{св}^{в} = \frac{110{,}9П_{св}^{о}}{78{,}4 + 0{,}325П_{св}^{о}}; \qquad (3.10)$$

$$П_{сух}^{в} = \frac{100П_{св}^{в}}{115{,}1 - 0{,}151П_{св}^{в}}; \qquad (3.11)$$

для сосны

$$П_{св}^{в} = \frac{99{,}2П_{св}^{о}}{92{,}9 + 0{,}063П_{св}^{о}}; \qquad (3.12)$$

$$П_{сух}^{в} = \frac{100П_{св}^{в}}{105{,}1 - 0{,}051П_{св}^{в}}. \qquad (3.13)$$

Электронный архив УГЛТУ

Подстановкой значений $П_{св}^{о}$ (см. табл. 3.4) в формулы (3.8), (3.10) и (3.12) получены для соответствующих диаметров ветвей значения $П_{св}^{в}$, а подстановкой последних в формулы (3.9), (3.11) и (3.13) найдены значения $П_{сух}^{в}$.

В процессе расчета значений $П_{св}^{о}$ по трансформированной формуле (3.2) для каждой ступени толщины ветви известны соотношения диаметров элементарных отрезков ветви в коре и без коры.

Их полуразность дает толщину коры. Последняя имеет прямую связь с диаметром диска ветви (рис. 3), в то время как связь доли коры с диаметром диска — обратная [(3.3), (3.4), (3.5)]. Сосна от березы и осины отличается значительно более низкими значениями толщины (см. рис. 3) и процента коры (см. табл. 3.4), за исключением самых тонких побегов.

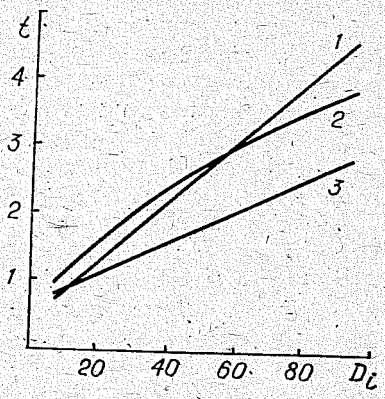


Рис. 3. Зависимость толщины коры от диаметра диска ветви: 1 — береза, 2 — осина, 3 — сосна (t—в мм, D_l—в см)

Для определения весовой доли коры в кроне дерева ветви всех порядков с отделенными боковыми побегами распределяют по толщине, взвешивают по каждой градации и перемножением весовой доли градации в общей массе на значения $П_{св}^{в}$ с последующим суммированием находят искомую долю коры в кроне. Метод позволяет получить достаточно надежные значения доли коры в кроне при ограниченном количестве экспериментального материала. Некоторая громоздкость вычислений устраняется разработкой соответствующих программ для ввода в ЭВМ. Метод проверен на 14 модельных деревьях, взятых на двух пробных площадях в березовых молодняках Кустанайской области. Относительная погрешность предлагаемого метода по сравнению с методом В. К. Захарова 3%, абсолютное отклонение +0,7%, что обеспечивает достаточную точность при сравнительно невысоких затратах на проведение замеров. Формулы (3.6) и (3.7) могут быть использованы также для пересчета доли коры в стволах деревьев.

Электронный архив УГЛТУ

3.3. Модели биопродуктивности древостоев в статике

3.3.1. Факторы, определяющие фитомассу древостоя. В разделе 3.1 обсуждались некоторые направления повышения точности учета фитомассы модельных деревьев. Исследовалось влияние метода отбора и числа отобранных деревьев на точность учета фитомасс отдельного дерева и древостоя. Существенное влияние на точность учета оказывает также набор факторов, объясняющих изменчивость фитомассы. Как отмечалось выше, этот набор может быть разным для различных фракций, он может изменяться также при смене фона неучтенных факторов. При объяснении изменчивости фитомассы древостоя в статике из всевозможных факторов воздействия наиболее информативны морфометрические признаки дерева и древостоя. Именно в них проявляется и из года в год в какой-то мере фиксируется реакция дерева и всего ценоза на факторы среды обитания. Тем самым морфометрия дерева и полога в целом отражает в значительной степени ретроспективную информацию. В статике древостоя важно выявить минимальное количество легко замеряемых и наиболее информативных морфометрических признаков и их сочетаний, объясняющих максимальную долю изменчивости той или иной фракции фитомассы. В этом направлении автором выполнена специальная работа на совокупности 104 деревьев, сплошь вырубленных на уже упоминавшейся пробной площади в 45-летнем березняке. Для каждой из шести фракций в абсолютно сухом состоянии исследованы уровни значимости четырех морфометрических признаков: диаметра ствола на высоте 1,3 м, высоты дерева, диаметра ствола у основания кроны $D_{ок}$, длины кроны $l_{кр}$, а также некоторых их сочетаний. Использована следующая модель, приведенная к линейному виду:

$$\lg P_i = a_0 + a_1 \lg D + a_2 H + a_3 \lg D_{ок} + a_4 \lg l_{кр} + a_5 H \lg D + a_6 \lg (D^2 H). \quad (3.14)$$

Графический анализ зависимостей P_i от D, $D_{ок}$, $l_{кр}$ и H показал, что первые три хорошо аппроксимируются аллометрической, а четвертая — экспоненциальной функцией. Поэтому H вводится в модель без логарифмирования. Наличие синергизма HlgD мотивировано тем, что иногда линия регрессии для массы стволов в зависимости от высоты при различных уровнях фиксированного диаметра имеет разный наклон вследствие изменения полнодревесности ствола при изменении размеров деревьев. Введен в модель (3.14) и фактор

D^2H, который, как уже отмечалось, некоторые исследователи считают наиболее информативным при объяснении изменчивости фитомассы. Параметры модели рассчитывали по программе шагового регрессионного анализа с последовательным исключением наименее значимых факторов. В табл. 3.6 для каждой фракции приведены факторы, значимые на уровне не ниже 0,05, а также стандартная ошибка σ и коэффициент детерминации R^2. Из таблицы видно, что наборы факторов почти для всех фракций фитомассы различные, из них наиболее информативными оказались четыре: D, $D_{ок}$, D^2H, H. Здесь даны результаты расчета модели (3.14) поочередно по каждому из наиболее информативных факторов.

Таблица 3.6

Характеристика модели (3.14) при различных сочетаниях факторов

Фракция фитомассы	Множественная связь по модели (3.14)			Парная связь фитомассы с факторами					
				D		D^2H		$D_{ок}$	
	константы значимых факторов	σ	R^2	σ	R^2	σ	R^2	σ	R^2
Листва	a_1, a_2, a_3	0,073	0,964	0,097	0,939	0,107	0,925	0,097	0,939
Древесина ветвей	a_1, a_2, a_3, a_5, a_6	0,110	0,955	0,141	0,924	0,162	0,899	0,134	0,931
Кора ветвей	a_2, a_3, a_4	0,084	0,964	0,123	0,920	0,142	0,893	0,101	0,945
Древесина ствола	a_1, a_2	0,038	0,990	0,065	0,968	0,044	0,986	0,141	0,857
Кора ствола	a_1, a_2	0,091	0,941	0,095	0,933	0,094	0,935	0,153	0,830
Отмершие ветви	a_1	0,286	0,734	0,284	0,726	0,285	0,724	0,338	0,613

Парная связь фитомассы с H дала худшие результаты и не приводится в таблице, хотя в многофакторной модели значимость фактора H существенно превышала критический уровень. Примечательно, что фактор D^2H, синтезирующий эффект двух основных объемообразующих признаков ствола, показал преимущество перед D и $D_{ок}$ только в отношении массы ствола. По-видимому, форму представления назван-

ных двух факторов в виде синергизма D^2H нельзя считать лучшей. Во всяком случае, совместный эффект H и D при включении их в модель порознь и данном способе линеаризации получается более результативным, если судить из сравнения коэффициентов детерминации: 0,990>0,986 и 0,941>>0,935. В отношении живых фракций кроны фактор D^2H менее информативен в сравнении с D и $D_{ок}$ порознь. В последнем случае лучшие результаты дал $D_{ок}$, который для других фракций, напротив, оказался наименее информативным. Таким образом, при подборе уравнений по принципу единственного фактора D^2H дает наилучшие результаты для массы ствола, но наихудшие для массы кроны. Фактор $D_{ок}$, напротив, наилучший для массы кроны, но наихудший для массы ствола. Фактор D является универсальным, он дает хорошие результаты для всех фракций. Высота H при включении ее наряду с D, как правило, статистически достоверна и существенно улучшает модель. Значимость остальных факторов, в частности $l_{кр}$, неустойчивая. Возможно, в некоторых случаях они опосредуют влияние неучтенного фона и являются значимыми, в других — это влияние сказывается на иных переменных модели. Независимо от набора включенных в модель факторов, наиболее точно оцениваются показатели массы ствола и наименее — массы отмерших ветвей, что вполне объяснимо и согласуется с литературными данными (Gholz, 1980; Биологическая продуктивность..., 1982).

3.3.2. Оценка фитомассы двухфакторной регрессией по высоте и диаметру ствола. Для практических целей, а именно при лесоинвентаризационных работах и расчетах размера лесопользования, в ориентации на комплексное освоение лесов необходимы упрощенные регрессионные уравнения и составленные на их основе таблицы фитомассы по образцу обычных объемных или сортиментных таблиц. Опыт составления подобных таблиц изложен в литературе (Токмурзин, Байзаков, 1970; Биологическая продуктивность..., 1982), однако подходы авторов не однотипны. Для хвойных пород Казахстана таблицы фитомассы совмещены с объемными либо с сортиментными (Токмурзин, Байзаков, 1970).

Наши исследования по оценке фитомассы березы и осины в статике выполнены на объектах, сводки которых даны в табл. 3.1. Однако при расчете двухфакторных моделей использован эмпирический материал, полученный только в спелых и частично приспевающих древостоях. При систематиза-

ции опытных данных, полученных на таких объектах, значение фитомассы дерева данной ступени толщины помещалось в зависимости от его высоты в ячейку матрицы, соответствующую определенному разряду высот согласно вспомогательной таблице (Кричун и др., 1978), общей для березовых и осиновых древостоев. Анализировались три укрупненные фракции фитомассы в свежесрубленном состоянии: древесная зелень (облиственные побеги), ветви и ствол — в связи с диаметром и высотой ствола по модели $\lg P_i = f(\lg D, H)$, где P_i — масса фракции, кг; D в см, H в м. По А. К. Митропольскому (1971) последовательно рассчитаны следующие уравнения (табл. 3.7):

$$\lg P_i = a_0 + a_1 \lg D + a_2 H, \qquad (3.15)$$

$$\lg P_i = a_0 + a_1 \lg D + a_2 H + a_3 H \lg D, \qquad (3.16)$$

$$\lg P_i = a_0 + a_1 \lg D + a_2 H + a_3 H \lg D + a_4 \lg^2 D. \qquad (3.17)$$

При постоянном значении фактора H уравнения (3.15) и (3.16) представляют функцию аллометрического роста, уравнение (3.17) — функцию Корсуня—Бакмана. Из табл. 3.7 следует, что по мере повышения порядка уравнения увеличивается коэффициент детерминации. При незначительной криволинейности поля распределения опытных данных она в полной мере учитывается коэффициентом a_3 (рис. 4, а, б). В случае, когда криволинейность четко выражена и приближается к параболическому типу (рис. 4, в), достаточное приближение к опытным данным обеспечивается вводом коэффициента a_4. Синергизм HlgD учитывает изменение угла наклона линии связи фитомассы с высотой дерева на фоне различной величины диаметра ствола. Например, у осины названный угол наклона для массы ветвей по мере увеличения диаметра снижается, а синергизм имеет положительный знак (сходящийся веер кривых на рис. 4, б).

Для массы ствола этот угол

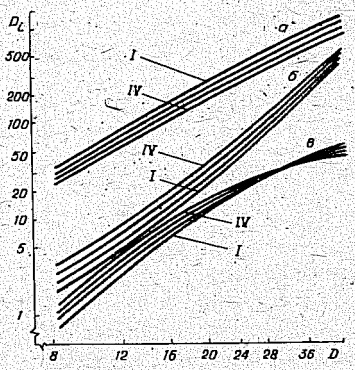


Рис. 4. Связь фитомассы осины с диаметром и высотой ствола: а — масса ствола по уравнению (3.16); б — масса ветвей по уравнению (3.16); в — масса древесной зелени по уравнению (3.17); I—IV— разряды высоты

Электронный архив УГЛТУ

Таблица 3.7

Характеристика уравнений множественной регрессии (3.15), (3.16), (3.17)

Фракция	Номер уравнения	Константы					Коэффициент детерминации R^2
		a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	
				Береза			
Древесная зелень	(3.15)	—1,5347	1,8160	0,0214	—	—	0,947
	(3.16)	—2,1968	2,3678	0,0594	—0,0306	—	0,964
	(3.17)	—2,0266	1,8693	0,0768	—0,0436	0,2748	0,966
Ветви	(3.15)	—2,3361	2,6327	0,0255	—	—	0,933
	(3.16)	—2,8029	3,0001	0,0541	—0,0219	—	0,939
Ствол	(3.15)	—0,4730	1,6932	0,0345	—	—	0,984
	(3.16)	—0,7292	1,9066	0,0492	—0,0119	—	0,988
				Осина			
Древесная зелень	(3.15)	—1,9338	2,5066	—0,0145	—	—	0,716
	(3.16)	—1,7984	2,3970	—0,0227	0,0065	—	0,707
	(3.17)	—4,5141	8,2909	—0,1357	0,0879	—2,8023	0,925
Ветви	(3.15)	—2,4210	3,4820	—0,0341	—	—	0,958
	(3.16)	—1,0093	2,3684	—0,1231	0,0688	—	0,970
Ствол	(3.15)	—0,4914	1,7774	0,0289	—	—	0,984
	(3.16)	—0,5675	1,8391	0,0335	—0,00366	—	0,986

увеличивается, а синергизм отрицателен (расходящийся веер кривых на рис. 4, а). Представляет интерес различный характер связи фитомассы кроны с высотой дерева при элиминировании влияния его диаметра: у березы эта связь положительная (коэффициенты a_2), у осины—отрицательная. Коэффициенты a_3, характеризующие степень совместного влияния факторов lgD и H, также имеют противоположные знаки. Соотношения различных фракций фитомассы (см. рис. 4) не остаются постоянными при увеличении размеров дерева: доля листвы в общей фитомассе уменьшается с возрастом, тогда как доля ветвей возрастает, а доля ствола относительно постоянна. Аналогичная

закономерность отмечена у клена американского (Schlaegel, 1982).

Электронный архив УГЛТУ

При анализе связи процента коры с диаметром ствола наилучшее приближение к опытным данным дало уравнение кубической параболы (табл. 3.8)

$$П_{св} = b_0 + b_1 D + b_2 D^2 + b_3 D^3, \quad (3.18)$$

где $П_{св}$ — процент коры в свежесрубленном состоянии, объемный для ствола и весовой для кроны. Ранее было показано, что процент коры является функцией только диаметров в коре и без нее и не зависит от высоты, поэтому масса коры (прил. 2) определена по уравнению (3.18) для всех разрядов высот. Таблица может быть использована для расчетов фитомассы древостоев в статике.

Таблица 3.8

Характеристика уравнений (3.18)

Фракция	Коэффициенты				Корреляционное отношение	Показатель точности выравнивания
	b_0	b_1	b_2	b_3		
			Береза			
Крона	64,64	—2,713	0,0805	—0,00093	0,920	0,998
Ствол	32,96	—1,947	0,0708	—0,00072	0,615	0,990
			Осина			
Крона	51,98	0,338	—0,051	0,00075	0,925	0,987
Ствол	29,04	—1,615	0,0489	—0,00043	0,590	0,988

Нами выполнен вариант совмещения таблицы для фитомассы кроны осины с сортиментной, составленной по тем же объектам Северо-Казахстанской, Кокчетавской и Кустанайской областей по методике, изложенной ранее (Кричун и др., 1978). Полученная таблица характеризует сортиментную структуру не только ствола, но и кроны. Даются запасы древесной зелени, которая согласно ГОСТ 21769—76 «Зелень древесная. Технические условия» используется для выработки витаминной муки и других биологически активных кормовых добавок. Товарная масса кроны $Р_{тов}$ (в кг), представляющая ветви толщиной в верхнем отрубе 3 см и выше, определялась взвешиванием с последующим ее переводом из

Электронный архив МГТУ

единиц массы в объемные (дрова из кроны) через плотность ветвей в коре, равную 834 кг/м³. Выведено уравнение

$$\lg P_{тов} = 3{,}452 \lg D - 0{,}118 \cdot H + 0{,}0638 \cdot H \cdot \lg D - 2{,}920,$$
$$R^2 = 0{,}976.$$

Проверка таблиц на объектах, не входящих в пробные площади, по которым составлены таблицы, показала, что они дают погрешности в пределах допустимых отклонений (±5%) и могут быть применены в производстве.

3.3.3. Оценка фитомассы трехфакторной регрессией по высоте, диаметру ствола и диаметру кроны. Современные дистанционные методы многозональных аэро- и космических съемок позволяют определять такие параметры деревьев, как высота, диаметр и площадь проекции крон, с большей точностью, чем при наземных работах (Синицын, Сухих, 1979). Поэтому разработка нормативов учета фитомассы древостоев с использованием морфометрических параметров крон является весьма актуальной. Для саксауловых насаждений имеются таблица массы деревьев, составленная по высоте и диаметру стволов (Кричун, 1965), и номограмма — по высоте и диаметру крон (Вейисов, Каплин, 1976). Однако при инвентаризации саксаульников казахстанскими лесоустроителями применяется метод «укосных» площадок, согласно которому на отведенном участке производится ломка всех деревьев и их взвешивание. Естественно, этот метод крайне неоперативен, неэкономичен и очень трудоемок. Указанные таблицы не удовлетворяют запросам производства, так как погрешность в определении запасов составляет в среднем ±17%, а для отдельных насаждений ±35%; номограмма для практического использования неудобна и, кроме того, требует проверки в других регионах. Следовательно, необходимость более полного учета факторов, определяющих массу саксаула, совершенствования уже имеющихся и составления новых таблиц очевидна.

Выше уже отмечалась специфичность саксауловых лесов. В отличие от большинства древесных пород лесной зоны, морфоструктура полога саксаульников ближе к кустарниковому типу. Крона опущена низко, поэтому перечет деревьев проводится по диаметру у шейки корня. Этот диаметр, как и форма ствола в целом, очень изменчив. Высока также изменчивость диаметра кроны деревьев одной ступени толщины. Сказанное обусловило введение в модель надземной фи-

Электронный архив УГЛТУ

томассы белого саксаула трех факторов: высоты, диаметра ствола у корневой шейки и диаметра кроны. Опытные значения всей надземной массы деревьев в свежесрубленном состоянии и товарной ее части систематизированы и проанализированы по названным трем факторам согласно модели

$$P = 10^{a_0} D_0^{a_1} H^{a_2} D_{кр}^{a_3}, \qquad (3.19)$$

где P — фитомасса дерева, кг; D_0 — диаметр ствола у шейки корня, см; H — высота дерева, м; $D_{кр}$ — диаметр кроны, м.

Для расчета констант модель (3.19) приведена к линейному виду:

$$\lg P = a_0 + a_1 \lg D_0 + a_2 \lg H + a_3 \lg D_{кр}.$$

В результате обработки исходных данных на ЭВМ получены следующие уравнения:

— для общей надземной массы древесины

$$\lg P_{общ} = -0{,}1551 + 0{,}6207 \cdot \lg D_0 + 0{,}7119 \cdot \lg H + 1{,}1994 \cdot \lg D_{кр}; \qquad (3.20)$$

$$R^2 = 0{,}901;$$

— для товарной древесины

$$\lg P_{тов} = -1{,}2274 + 0.6443 \cdot \lg D_0 + 2{,}314 \cdot \lg H + 0{,}9555 \cdot \lg D_{кр}; \qquad (3.21)$$

$$R^2 = 0{,}930.$$

Анализ уравнений (3.20) и (3.21) показал, что влияние каждого фактора на результативный признак существенно, поскольку для коэффициентов регрессии выполнено условие $t \geqslant t_{0,05} = 2{,}0$. Значения коэффициентов детерминации выбранных факторов объясняют 90% изменчивости общей массы древесины и 93% изменчивости товарной ее части, т. е. полученные модели фитомассы можно считать адекватными реальным процессам ее формирования по названным трем факторам.

Модель (3.20) может быть представлена серией поверхностей (рис. 5), каждая из которых при заданном значении диаметра кроны описывается двухфакторной функцией $P = f(D_0, H)$. В целях практического пользования при определении запаса саксаула в полевых условиях математическую модель необходимо представить в виде достаточно простой таблицы, отражающей связь массы стволов с морфометрическими признаками. Принята схема обычных объем-

Электронный архив УГЛТУ

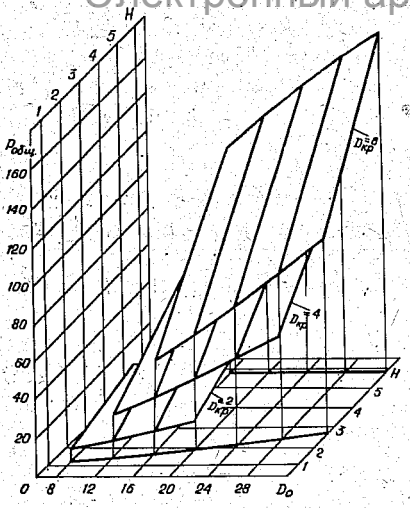


Рис. 5. Зависимость общей надземной фитомассы саксаула белого от диаметра ствола у шейки корня, высоты дерева и диаметра кроны

ных таблиц по разрядам высот, применяющихся для определения запасов хвойных и лиственных древостоев. Составление шкалы разрядов высот проводилось с учетом предельной дисперсии высот в ступенях толщины на всей совокупности пробных площадей. В основу положено 15 пробных площадей Казахского лесоустроительного предприятия. Числовые показатели графиков высот переведены в индексы по базовой высоте 12-сантиметровой ступени толщины, являющейся одной из наиболее характерных по представленности запаса в приспевающих и спелых насаждениях. Затем вычислены средние для ступени индексы высот. Данные статистической обработки показали, что индексы высот найдены с высокой точностью (0,4—1,6%), отличаются слабой изменчивостью (1,4—5,2%) и, следовательно, соответствуют высотам отдельных насаждений. Кроме того, полученные средние индексы соответствуют данным, установленным М. В. Гудочкиным (1961) по 14 пробным площадям. При построении шкалы интервал между разрядами принят 20% (как для низкорослой древесной породы). Разряды по ступеням толщины устанавливались путем умножения базовых высот в 12-сантиметровой ступени толщины на полученные индексы.

В результате табулирования моделей (3.20) и (3.21) по разрядной шкале и градациям диаметров кроны составлена таблица (прил. 3). Она проверена по материалам четырех пробных площадей, из которых две заложены в насаждениях Кзыл-Ординской и две — в Чимкентской областях. Размер их составлял 0,25—0,50 га, запас определялся способом ломки и взвешиванием всех деревьев. При сопоставлении запасов, установленных по таблице, с данными непосредственно-

Электронный архив УГЛТУ
го взвешивания систематическая ошибка составила — 0,6%, случайная ±11,2%, для товарного запаса ошибки соответственно равны — 2,6% и ±13,4%, что свидетельствует о повышенной точности таблицы в сравнении с ранее опубликованной (Кричун, 1965).

В саксаульниках, возобновившихся порослевым путем, прикомлевая часть ствола сохраняется от материнского древостоя и вследствие специфичной заготовки древесины (методом ломки) обладает высокой изменчивостью высоты — от нуля до 0,5—0,7 м. Это обстоятельство, а также наличие нескольких порослевин в гнезде затрудняют использование диаметра ствола у шейки корня в качестве одного из входов таблицы. Названный диаметр можно не учитывать, поскольку его влияние отражено в таблице косвенным образом через разряд высоты. При диаметре кроны 3 м и высоте 2,4 м фитомасса в III разряде высоты в 2,4 раза выше, чем в I разряде (прил. 3), что обусловлено различием толщины ствола и его долевого участия в общей массе. В этом состоит принципиальное отличие нашей таблицы от предложенной ранее номограммы (Вейисов, Каплин, 1976).

3.4. Модели биопродуктивности древостоев в онтогенетической и эколого-ценотической динамике

3.4.1. Оценка фитомассы четырехфакторной регрессией по возрасту и эколого-ценотическим факторам. Составной частью прогнозирования лесного продукционного процесса является моделирование динамики фитомассы древостоев. Насущная необходимость постепенного сближения уровней эффективно используемой и биологической продукции леса придает прогнозированию структуры и динамики фитомассы лесного фитоценоза, помимо теоретического, и чисто утилитарное значение. Определяющая роль отводится выявлению эдафических, ценотических, климатических, генетических, антропогенных и других факторов воздействия, находящихся в непрерывной пространственно-временной динамике. Наличие комплекса постоянно варьирующих и в той или иной степени взаимосвязанных факторов определяет необходимость многомерного подхода к исследованию структуры и динамики фитомассы древостоя в ходе онтоценогенеза.

При отборе факторов воздействия наряду с их информативностью большую роль играет целевое назначение прогностических моделей. Существующие многочисленные таблицы

Электронный архив УГЛТУ

хода роста древостоев показывают возрастную динамику запасов стволовой древесины по классам бонитета, характеризующим эдафические условия, и по степени полноты (нормальные, модальные, с разной начальной густотой). Существенная трудоемкость работ по учету биопродуктивности определяет правомерность составления таблиц динамики фитомассы в увязке с нормативными таксационными материалами, характеризующими продуктивность древостоев по запасу стволовой древесины (Науменко, 1978; Усольцев, Кричун, 1982).

Разработка и усовершенствование методов учета всей фитомассы древостоев представляет одну из насущных задач лесоводственной науки. Однако простое перенесение методов и закономерностей лесной таксации в решение проблем биопродуктивности в общебиологическом аспекте не может быть оправдано, поскольку, как отмечает А. И. Уткин (Биологическая продуктивность.., 1982), учет объема ствола связан с характеристиками формы, тогда как учет массы фракций дерева — с характеристиками состояния, в частности с плотностью и влажностью фракций. Не нужно доказывать неправомерность такого подхода, если принять во внимание, что колебания влажности древесины ствола лишь в пределах суток составляют 132—160% (Технеряднов, Шоманов, 1976). Простой пересчет объемных показателей продуктивности, заимствованных из таблиц хода роста, в единицы массы на основании единых для всех возрастов регрессионных уравнений и соотношений фракций нельзя считать приемлемым в методическом отношении (Биологическая продуктивность..., 1982), поскольку и соотношения фракций, и углы наклона линий регрессии, описывающих связь фитомассы с морфометрическими признаками дерева, существенно изменяются с возрастом (Усольцев, 1972, 1976б).

Динамика роста любого организма, в том числе дерева и древостоя, определяется кривой Сакса: до некоторого возраста происходит увеличение темпов роста, затем — кульминация и последующее постепенное замедление. Поэтому возраст можно считать основополагающим фактором воздействия на процесс накопления фитомассы, на который в онтоценогенезе накладывается влияние эдафических, ценотических, климатических, антропогенных и других факторов. Учет фитомассы кроны только по морфологическим признакам дерева неточен, поскольку весовые показатели листвы деревьев одного и того же диаметра ствола в древостоях одного уровня

продуктивности II, III и IV классов возраста относятся у березы как 2 : 1,5 : 1, а у осины как 6 : 3 : 1 (Усольцев, 1972). Подобную закономерность отмечали в сосняках Д. А. Рыбинцева (1973), А. П. Тябера (1981) и в осинниках — В. Н. Габеев (1976). Б. Шлегель (Schlaegel, 1982), анализируя в статике уравнения связи различных фракций фитомассы клена американского с высотой и диаметром ствола, также приходит к выводу о недостаточности названных двух факторов для объяснения изменчивости фитомассы кроны. Поэтому математические модели и таблицы, составленные для учета фракций фитомассы только по высоте и диаметру ствола, не отражая возрастных и других не учитываемых причин изменений в структуре фитомассы кроны, могут быть применены только для локальных расчетов фитомассы в статике. В силу необходимости выявления механизма действия случайных процессов в онтоценогенезе в моделях динамики фитомассы в любом случае должен участвовать онтогенетический фактор — возраст древостоя.

Непосредственное определение биопродуктивности на единице площади древостоев в онтогенетической и эколого-ценотической динамике с достаточной точностью не представляется возможным, поскольку, во-первых, в реальных условиях практически нельзя получить полный набор пробных площадей с заданными таксационными и биофизическими характеристиками древостоев, во-вторых, фитомасса древесного полога, особенно его фотосинтезирующих органов, определяется не столько упомянутыми усредненными характеристиками древостоя, сколько закономерностями распределения фитомассы по деревьям разного ранга в их дифференцированных совокупностях. Если изменчивость массы стволов древостоев в абсолютно сухом состоянии в сухом каменисто-лишайниковом сосняке объясняется возрастом и густотой на 96%, то изменчивость массы ветвей — на 77%, причем в обоих случаях влияние густоты достоверно лишь на уровне $t_{0,1}$. Фактор густоты незначим и в отношении массы хвои, а фактор возраста объясняет 32% изменчивости последней на уровне значимости $t_{0,1}$ (Усольцев и др., 1979).

Вследствие этого, а также ввиду существенной трудоемкости работ по определению биопродуктивности древостоев исследование закономерностей изменения их фитомассы, очевидно, необходимо проводить в два этапа. На первом этапе анализируется структура фитомассы на уровне отдельного дерева в связи с возрастом и эколого-ценотическими факто-

Электронный архив УГЛТУ

рами, опосредованными морфометрическими параметрами дерева и древостоя, с использованием методов биопродуктивности и нормативных таксационных материалов. На втором этапе на основе полученных таблиц фитомассы и моделей строения древостоев по морфометрическим параметрам, ранее выведенных при составлении таблиц хода роста для древостоев данного региона, рассчитывается фитомасса на уровне древостоя в возрастной и эколого-ценотической динамике. Подобный подход использован нами при исследовании возрастной динамики и структуры фитомассы березы и осины в сомкнутых (нормальных) древостоях различной продуктивности (Усольцев, 1980; Усольцев, Кричун, 1982) по трехфакторной регрессионной модели, включающей в качестве факторов возраст, диаметр ствола и класс бонитета, без учета густоты древостоя.

В данном разделе развивается подход к изучению структуры и динамики фитомассы древостоев. Результаты исследований представлены таблицами биопродуктивности древостоев березы и осины различного возраста, густоты и класса бонитета. При построении моделей реализован принцип параметрического прогнозирования (Лиепа, 1980). Предварительно устанавливаются возрастные закономерности в соотношении высоты и диаметра ствола как основных морфометрических параметров дерева, опосредующих влияние эколого-ценотических факторов. Для этого помимо наших (см. табл. 3.1) использованы модельные деревья лесоустроительных пробных площадей, всего — 1960 деревьев березы и 1420 осины. Значения высот деревьев каждой ступени толщины систематизированы по двум факторам (возрасту и условиям местообитания). В итоге для аппроксимации значений высот принята регрессионная модель общего вида

$$H = f(A, D, H_{50}), \qquad (3.22)$$

где H — высота дерева, м; A — возраст древостоя, лет; D — диаметр ствола на высоте груди, см; H_{50} — средняя высота древостоя, м, в возрасте 50 лет. По бонитетной шкале М. М. Орлова для порослевых древостоев в классах бонитета Iа, I, II, III, IV, V ее значения соответственно равны 25, 22, 19, 16, 13, 10 м. Г. Венк (Wenk, 1966; цит. по: Gerold, 1979) предложил для выравнивания значений высоты деревьев функцию

$$H = a_0 + a_1A + a_2A^2 + (b_0 + b_1A + b_2A^2)D + (c_0 + c_1A + c_2A^2)D^2,$$

однако она требует расчета большого числа констант, которое в нашем примере возросло бы еще в связи с включением

Электронный архив УГЛТУ

фактора местообитания H_{50}. Мы применили логарифмическую трансформацию опытных данных. В результате их систематизации и графического анализа установлено, что при фиксированном классе бонитета высота дерева связана с возрастом функцией Корсуня—Бакмана, а с диаметром ствола — аллометрической, или степенной функцией. В соответствии с этим выражение (3.22) приведено к линейному виду и на ЭВМ рассчитаны его константы (критерии значимости констант предлагаемых далее уравнений превышают стандартные значения на уровне значимости 0,05). В результате получены модели: для березы

$$\lg H = -0{,}5809 + 0{,}3727\lg A + 0{,}5643\lg D - 0{,}0433\lg^2 A \lg D + \\ + 0{,}5003\lg H_{50}; \qquad (3.23)$$
$$R^2 = 0{,}982;$$

для осины

$$\lg H = -1{,}3586 + 1{,}4759\lg A - 0{,}431\lg^2 A + 0{,}3874\lg D + \\ + 0{,}6434\lg H_{50}; \qquad (3.24)$$
$$R^2 = 0{,}970.$$

Подстановкой значений H_{50} по шкале М. М. Орлова получены модификации (3.23) и (3.24) по классам бонитета: для березы

$$\lg H = a_0 + 0{,}3727\lg A + 0{,}5643\lg D - 0{,}0433\lg^2 A \lg D; \qquad (3.25)$$

для осины

$$\lg H = a_0 + 1{,}4759\lg A - 0{,}4310\lg^2 A + 0{,}3874\lg D. \qquad (3.26)$$

Константы a_0 имеют значения для березы 0,0907; 0,0589; 0,0215; —0,0236; —0,0806 для классов бонитета с I по V соответственно и для осины —0,4592; —0,4949; —0,5358; —0,5839; —0,6419 для классов бонитета с Ia по IV. Путем табулирования уравнений (3.25) и (3.26) получены наборы кривых высот деревьев, дифференцированных по классам возраста, а в пределах последних — по классам бонитета, представляющие своеобразные развернутые по ступеням толщины деревьев бонитетные шкалы (рис. 6). У березы охвачен интервал с I по VIII классы возраста, а у осины — с I по V классы. В силу бо́льшего возрастного интервала у березы вступает в силу совместное действие факторов A и D, о чем свидетельствует наличие в (3.25) статистически достоверного синергизма $\lg^2 A \lg D$ с обратным знаком. Решая (3.25) при A=10 лет и A=60 лет, получаем значения константы при lgD, равные 0,5210 и 0,4274. Таким образом, с возрастом значение коэффициента регрессии (аллометрической констан-

Электронный архив УГЛТУ

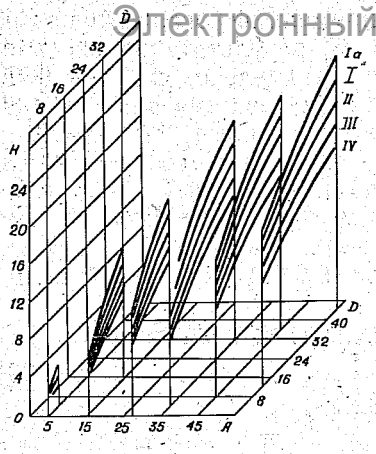


Рис. 6. Возрастная динамика соотношения высот и диаметров в сомкнутых осиновых древостоях; Ia, I, II, III, IV— классы бонитета

ты) при lgD снижается, т. е. уменьшается угол наклона кривых высот. У осины совместное действие названных факторов на фоне общего варьирования результативного признака H оказывается несущественным, так как синергизм lgA lgD в (3.24) статистически не достоверен.

При систематизации опытных данных, полученных в широком диапазоне возрастов и условий местообитания (см. табл. 3.1), значение фитомассы дерева данного возраста и диаметра помещалось в зависимости от высоты этого дерева в ячейку матрицы, соответствующую согласно набору кривых высот (см. рис. 6) какому-то классу бонитета, а в пределах этой ячейки—в подъячейку, соответствующую тому или иному уровню относительной густоты Z. Таким образом, в принятой схеме регрессионной модели высота как морфометрический параметр при постоянных значениях возраста и диаметра характеризует принадлежность дерева к древостою определенного класса бонитета, т. е. является вычлененным опосредованным эдафическим фактором. Диаметр при заданном возрасте древостоя известного класса бонитета определяет ценотическое положение дерева в пологе древостоя, а относительная густота представляет среднюю плотность древостоя, или его ценотическую характеристику. Эта средняя плотность дифференцирована в зависимости от ценотического положения дерева. В целом фитомасса согласно принятой структуре модели определяется онтогенетической A, условной экологической H и двумя ценотическими D и Z характеристиками. Последовательный графический анализ связи показателей фитомассы с названными факторами показал, что с A, D, Z она может быть выражена аллометрической, а с H — экспоненциальной функциями. На основании графического анализа при расчете модели по программе множественного

Электронный архив УГЛТУ
регрессионного анализа дополнительно включены синергизмы:

$$\lg P_{дер} = a_0 + a_1 \lg A + a_2 \lg D + a_3 H + a_4 \lg Z + a_5 (\lg A)/H + a_6 (\lg A \lg D) + a_7 (H \lg D) + a_8 (H \lg A) + a_9 (\lg Z \lg A), \quad (3.27)$$

где $P_{дер}$ — масса фракции дерева в абсолютно сухом состоянии, кг. Характеристика полученных регрессий дана в табл. 3.9.

Область применения регрессий (3.27) определяется полями распределения пробных площадей по таксационным показателям (табл. 3.10), включенным в модели в качестве определяющих факторов. Отсутствие данных для березы с густотой $Z>1$ в возрасте 61—90 лет отражает реальные условия: если в возрасте до 40 лет древостои с густотой, превышающей нормативную по таблицам хода роста (Усольцев, Кричун, 1982), представлены достаточно хорошо, то в возрасте 61—90 лет такие загущенные древостои отсутствуют, поскольку при составлении таблиц хода роста рассматривались как нормальные, соответствующие густоте $Z=1$. Таким образом, область применения регрессий (3.27) определяется указанными в табл. 3.10 значениями густот и классов бонитета с ограничением по возрасту для березняков нормальных и редкостойных 90, березняков перегущенных 60 и осинников 50 годами. Наличие некоторых пробелов в пределах полей распределения пробных площадей при многомерном регрессионном анализе не накладывает дополнительных ограничений, поскольку многомерные модели предполагают, во-первых, интерполяцию в пределах фактического материала и, во-вторых, наличие согласованности кривых по тому или иному фактору при вычлененном воздействии прочих факторов.

Регрессионные модели (3.27) верифицированы по фактическим данным фитомассы 104 деревьев, сплошь вырубленных на пробной площади, заложенной в березняке III класса бонитета. Возраст деревьев — 40—50 лет, густота $Z=1{,}0$. Экспериментальный материал названной пробной площади не вошел в массив данных, по которому построены модели (3.27), и по своим таксационным показателям эта площадь соответствует пустующей ячейке в табл. 3.10. По совокупности 104 деревьев выведены регрессионные модели (3.14), перечень значимых констант которых и соответствующая характеристика приведены выше в табл. 3.6 (первые три колонки). Ошибки моделей (3.14), рассчитанные по формуле

$$\Delta = \pm \sqrt{\Sigma [(y_i - \bar{y}_i)/\bar{y}_i]^2 / n},$$

Электронный архив УГЛТУ

Фракции	Константы при факторах воздействия (числитель)			
	a_0	a_1	a_2	a_3
1	2	3	4	5
Береза				
Листья	**—0,9547**	—0,6239 / 8,9	1,6039 / 16,7	0,03133 / 4,5
Кора ветвей	—0,6432	—0,5459 / 6,2	2,0421 / 12,1	0,04035 / 4,9
Древесина ветвей	—1,9664	—0,5658 / 6,5	2,3921 / 14,2	0,04827 / 5,9
Кора ствола	—1,7669	0,2261 / 4,9	1,8069 / 28,3	0,0232 / 5,0
Древесина ствола	—1,3029	0,3954 / 5,2	2,0696 / 12,5	0,0513 / 8,8
Отмершие ветви	—0,1380	—1,5182 / 2,6	2,5010 / 6,9	—0,2133 / 2,2
Осина				
Листья	—1,6473	—1,1114 / 8,1	2,4793 / 14,5	0,0230 / 2,5
Кора ветвей	—1,8826	—0,8539 / 7,6	3,0155 / 24,5	—
Древесина ветвей	—2,8400	—0,5285 / 3,9	3,4288 / 23,0	—
Кора ствола	—1,9540	1,5076 / 4,5	0,5854 / 2,1	0,0735 / 2,2
Древесина ствола	—1,5174	0,9383 / 3,0	1,1712 / 5,4	0,1042 / 3,7
Отмершие ветви	—1,4393	—0,4312 / 1,9	2,1534 / 15,9	—

Электронный архив УГЛТУ

Таблица 3.9

нений (3.27)

и значимость констант по Стьюденту (знаменатель)						Стандартная ошибка уравнения σ	Коэффициент детерминации R^2
a_4	a_5	a_6	a_7	a_8	a_9		
6	7	8	9	10	11	12	13
$\frac{-0,1635}{4,0}$	—	—	—	—	—	0,114	0,970
$\frac{-0,1467}{2,9}$	$\frac{1,0339}{2,1}$	—	—	—	—	0,133	0,974
$\frac{-0,1993}{4,0}$	$\frac{1,3617}{2,8}$	—	—	—	—	0,134	0,980
—	—	—	—	—	—	0,076	0,992
—	$\frac{-0,6417}{2,0}$	$\frac{-0,405}{4,3}$	—	—	—	0,079	0,992
$\frac{1,8534}{2,6}$	—	—	—	$\frac{0,1171}{2,1}$	$\frac{-1,2046}{2,4}$	0,231	0,850
$\frac{-0,3797}{3,4}$	$\frac{3,0968}{4,6}$	—	—	—	—	0,147	0,953
$\frac{-0,3594}{4,0}$	$\frac{2,3470}{3,9}$	—	—	—	—	0,132	0,974
$\frac{-0,2604}{2,4}$	$\frac{3,3336}{4,6}$	—	—	—	—	0,160	0,972
—	$\frac{-2,7166}{2,6}$	—	$\frac{0,0731}{3,6}$	$\frac{-0,0976}{4,0}$	—	0,096	0,986
—	$\frac{-1,8192}{2,7}$	—	$\frac{0,0301}{2,0}$	$\frac{-0,0679}{2,8}$	—	0,093	0,990
$\frac{2,5698}{2,1}$	—	—	—	—	$\frac{-2,1020}{2,3}$	0,199	0,939

Электронный архив УГЛТУ

Таблица 3.10

Распределение пробных площадей по таксационным показателям

Относительная густота	Класс бонитета	Возраст, лет						
		до 20	21—30	31—40	41—50	51—60	61—70	71—90
		Береза						
	I—II	1	—	—	—	—	1	—
0,5	III	—	1	—	2	2	2	3
	IV	—	—	—	1	1	1	—
	I—II	1	1	1	—	—	—	2
1,0	III—IV	1	1	1	—	3	1	2
	I	2	2	2	—	—	—	—
1,5	II	2	2	3	1	—	—	—
	III—IV	—	—	1	—	1	—	—
		Осина						
	Ia—I	—	—	1	1	—	—	—
0,5	II	1	1	1	1	—	—	—
	II—IV	1	—	1	1	—	—	—
1,0	Ia—I	2	1	2	2	—	—	—
	II	—	1	—	1	—	—	—
	III—IV	1	2	1	1	—	—	—
	Ia—I	1	1	2	2	—	—	—
1,5	II	—	—	—	1	—	—	—
	III—IV	1	1	—	—	—	—	—

составили по фракциям соответственно: 0,18; 0,26; 0,21; 0,09; 0,20 и 1,0. Подстановкой в (3.27) значений возраста ($A=45$ лет) и густоты ($Z=1$) эти уравнения приведены к виду $\lg P = f(\lg D, H)$, и по ним с использованием двух морфометрических показателей 104 деревьев — диаметра и высоты — рассчитаны аналогичные ошибки, составившие соответственно: 0,27; 0,39; 0,35; 0,11; 0,27 и 1,0. Если учесть, что первый ряд ошибок выведен по локальным моделям для статической совокупности 104 деревьев с привлечением их основных морфометрических показателей, а второй ряд — по обобщающим моделям, описывающим возрастную и эколого-ценотическую изменчивость фитомассы в пределах исследуемого региона,

Электронный архив УГЛТУ

то результаты верификации моделей (3.27) для березы можно считать удовлетворительными.

Предварительное представление о влиянии каждого из четырех факторов на динамику соотношений фракций фитомассы можно получить из характеристики уравнений (см. табл. 3.9). Величины и знаки констант показывают, что связь фитомассы фракций с диаметром ствола и высотой дерева положительная, а с густотой — отрицательная для кроны и отсутствует для ствола. При фиксированных значениях диаметра ствола, густоты и класса бонитета связь с возрастом для массы кроны дерева отрицательная, для массы ствола — положительная, что обусловлено снижением плотности кроны и увеличением полнодревесности ствола по мере перехода дерева от высших рангов в пологе к низшим. Для некоторых фракций эти общие закономерности корректируются синергизмами, учитывающими одновременное действие двух факторов.

Более детальное представление в количественном выражении о динамике фракций фитомассы дают опубликованные (Усольцев, 1983б) результаты табулирования моделей (3.27) при $Z=1$, т. е. при густоте древостоев, соответствующей при заданном возрасте табличному значению густоты (Усольцев, Кричун, 1982). Полученные закономерности для ветвей осины $P_в$ (в кг) изображены на рис. 7. У деревьев одного и того же диаметра и класса бонитета с возрастом увеличивается высота, хотя дерево переходит при этом из высших групп рангов в низшие. Увеличение высоты при фиксированном диаметре обуславливает рост массы ствола, а масса кроны снижается. Так, в березняках I класса бонитета во II классе возраста дерево с диаметром 8 см при высоте 9,6 м имеет массу древесины ствола 10,4 кг, а в VI классе возраста — высоту 13,5 м и массу древесины

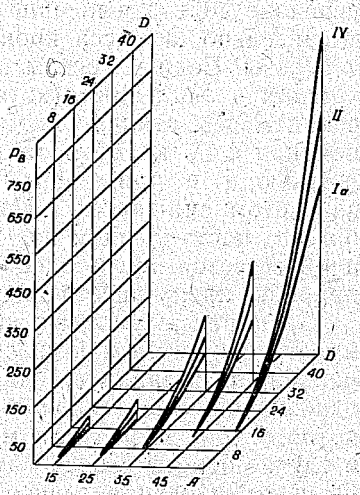


Рис. 7. Зависимость массы ветвей осины от диаметра ствола, возраста и класса бонитета (Iа—IV)

Электронный архив УГЛТУ

ствола 16,9 кг, т. е. масса ствола увеличивается на 63%. Масса листвы того же дерева снижается с 1,15 кг до 0,68 кг, или на 41%, а масса древесины ветвей — с 1,45 до 1,09 кг, или на 25%. При большем диаметре ствола названная закономерность становится менее выраженной: в IV классе возраста дерево диаметром 36 см при высоте 24,2 м имеет массу древесины ствола 570 кг, а в VIII классе возраста при высоте 27,0 м — 658 кг, т. е. масса увеличивается лишь на 15%; массы листьев и древесины ветвей снижаются, соответственно, на 24 и 10%. В этих закономерностях проявляются возрастные изменения в напряженности конкурентных отношений деревьев и различные темпы накопления фитомассы разных фракций вследствие неодинаковой роли в продукционном процессе лесного фитоценоза.

Описанные закономерности присущи и осиновым древостоям, только они менее выражены в отношении массы ствола и более резко — в отношении кроны: в осиннике I класса бонитета дерево одного и того же диаметра в VI классе возраста по сравнению со II имеет массу древесины ствола на 39% (у березы — на 63%) больше, а массу листвы на 70% (у березы — на 41%) и массу древесины ветвей — на 45% (у березы — на 25%) меньше. Таким образом, у осины при переходе дерева в низшие ранги масса ствола возрастает незначительно, а масса кроны снижается в большей мере, чем у березы. Если у березы вплоть до VIII класса возраста сохраняется тенденция (хотя и с замедлением темпов) увеличения массы ствола одного и того же диаметра, то у осины, начиная с IV класса, эта тенденция сменяется на противоположную, т. е. при одном и том же диаметре масса ствола с возрастом снижается. По-видимому, это обусловлено более ранним наступлением возраста спелости у осинников, что сопровождается прекращением роста в высоту и отложением прироста преимущественно в нижней части ствола.

Если масса листвы с диаметром ствола у березы и осины имеет положительную связь, то с высотой дерева при элиминировании влияния его диаметра и возраста эта связь менее однозначна. Здесь проявляется влияние синергизма (lgA)/H, который достоверен для массы листвы осины и недостоверен в случае березы. Связь массы листвы с высотой дерева у осины положительная только в старших классах возраста, а в молодняке имеет противоположный знак. Это еще раз подтверждает различие березы и осины в конкурентных взаимоотношениях деревьев и в закономерностях распределения ас-

Электронный архив УГЛТУ

симилятов по фракциям, что, возможно, связано с биологическими особенностями двух древесных пород. Во всяком случае, противоположные характеры связи массы кроны сосны и ели с высотой дерева при фиксированном диаметре ствола установлены Т. Х. Токмурзиным и С. Б. Байзаковым (1970): положительная связь у сосны и отрицательная — у ели тянь-шаньской.

Данные таблиц (Усольцев, 1983б) позволяют выявить закономерности изменения соотношения различных фракций по каждому из действующих факторов при элиминировании остальных: масс ассимилирующих и структурных частей кроны и надземной части дерева, коры и древесины кроны и ствола и т. д. Доля коры в массе ветвей дерева одного и того же диаметра не зависит от условий местообитания и с возрастом закономерно снижается (рис. 8), поскольку у деревьев стар-

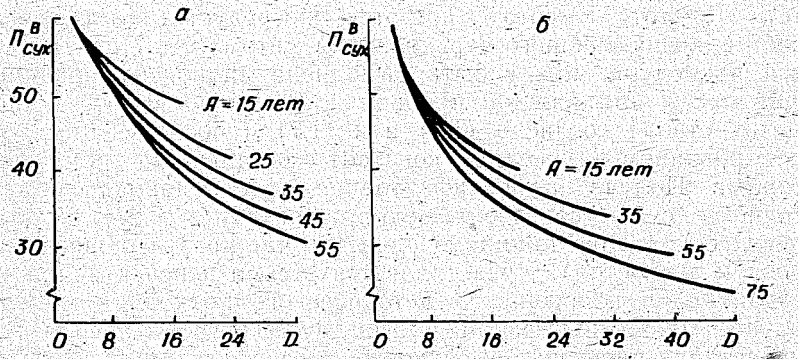


Рис. 8. Изменение процента коры в массе ветвей в зависимости от диаметра дерева и возраста: а — осины, б — березы

шего возраста при более выраженной ажурности кроны преобладают толстые ветви, содержащие меньший процент коры. При фиксированном возрасте доля коры с увеличением диаметра дерева снижается также вследствие большего участия толстых ветвей в общей их массе. Доля коры в массе ствола несколько увеличивается с ухудшением условий местообитания и практически не зависит от возраста.

Представленные модели в их табличной интерпретации могут быть использованы при подеревном учете и прогнозе динамики фитомассы древостоев березы и осины по шести

Электронный архив УГЛТУ

фракциям для различных возрастов, густот и классов бонитета. Они включают основные четыре фактора, по которым составляют обычные таблицы хода роста древостоев, их детализация в практических целях могла бы быть на этом закончена. Нужно иметь в виду, что процедура систематизации исходных данных фитомассы с использованием матрицы соотношений высоты, диаметра дерева и густоты древостоя позволяет вычленить высоту дерева как опосредованный эдафический фактор, учитывающий общую и локальную доброт-ности местообитания. Введение такого интегрального фактора упрощает структуру моделей, но при этом в одной ячейке матрицы могут оказаться значения фитомассы деревьев из древостоев различных классов бонитета и густот. Этого можно избежать, если эдафический (экологический) фактор расчленить на составляющие: общую, выражаемую, например, через H_{50}, и локальную, представленную высотой дерева H при фиксированных ступени толщины, возрасте, классе бонитета и густоте. Высота H при этом опосредует и генетическую составляющую общего варьирования фитомассы. Практически вся процедура может быть выполнена аппроксимированием фитомассы для каждой пробной площади по высоте и диаметру ствола согласно (1.6) или (1.7) и последующим коррелированием полученных констант с остальными тремя факторами. Полученная пятифакторная модель навряд ли даст точность, существенно большую в сравнении с (3.27), но обеспечит сохранение принципа единства частного и общего (дерева и древостоя). Представляется весьма перспективной экстраполяция изложенного методического подхода к моделированию динамики фитомассы на другие регионы ареала произрастания березовых и осиновых древостоев. Анализ результатов такого моделирования по различным географическим зонам позволит выявить количественные различия в уровнях биопродуктивности деревьев и древостоев, в соотношениях масс ствола и кроны, ассимилирующих и неассимилирующих органов и т. д. Эти различия обуславливаются факторами (например, климатическими), не учтенными в моделях (3.27), но играющими немаловажную роль в формировании продукционного процесса лесного фитоценоза.

Опубликованные таблицы (Усольцев, 1983б) полезны при оценке потенциальной сырьевой базы колочных лесов Северного Казахстана и Западной Сибири в ориентации на комплексное использование лесных ресурсов этих регионов. Таблицы могут применяться в исследованиях биопродуктивности

колочных лесов, а также при проектировании мероприятий по защите лесов от энтомовредителей, поскольку дают возможность количественной оценки кормовой базы листогрызущих и прогноза их численности. Однако таблицы пригодны только для древостоев с густотой, соответствующей таблицам хода роста нормальных древостоев (Усольцев, Кричун, 1982). При густоте, отличающейся от табличной, фитомассу деревьев можно рассчитать по уравнениям (3.27).

3.4.2. Эскизы таблиц биопродуктивности для березовых и осиновых древостоев. Результаты табулирования моделей (3.27) использованы далее для расчета запасов фитомассы на 1 га, т. е. для составления таблиц биопродуктивности древостоев. Основой для таких расчетов послужили ряды распределения деревьев по диаметру, использованные при составлении таблиц хода роста сомкнутых древостоев (Усольцев, Кричун, 1982), относительная густота которых принята за 1,0, и данные перечета деревьев на пробных площадях с относительной густотой от 0,2 до 6,3 (см. табл. 3.1). Полученные значения фитометрических (таксационных и продуктивностных) показателей в расчете на 1 га систематизированы по трем факторам: возрасту древостоя A, классу бонитета H_{50}, выраженному высотой древостоя в возрасте 50 лет по бонитетной шкале М. М. Орлова, и относительной густоте Z. Анализ экспериментальных данных позволил ввести в модели биологической продуктивности связи фитометрических показателей с возрастом в виде логарифмических полиномов 1—3 порядков и с классом бонитета, выраженные аллометрической функцией. Известно, что в растительных ценозах, в том числе и древостоях, существует оптимум густоты, обеспечивающий наибольшую продуктивность фитомассы (Рубцов и др., 1976). Наличие этого оптимума определило введение в модель биологической продуктивности зависимости продуктивностных показателей от относительной густоты в виде логарифмического полинома 2-го порядка

$$\lg y = f(\lg Z, \lg^2 Z), \qquad (3.28)$$

где y — сумма площадей сечения древостоя, м²/га, или фитомасса в абсолютно сухом состоянии, т/га. Закономерность, аппроксимируемая этой функцией, предполагает наращивание суммы площадей сечения и запасов фитомассы на 1 га до линии оптимума с последующим постепенным снижением, что определяется отрицательным знаком при $\lg^2 Z$. Если фак-

тор lgZ недостоверен, зависимость (3.28) упрощается: $lgy = f(lg^2Z)$. В этом случае оптимум соответствует густоте нормального древостоя при $Z=1$. Таким образом, множественные регрессионные модели биопродуктивности в аддитивной форме имеют общий вид

$$lgy = a_0 + a_1 lgA + a_2 lg^2A + a_3 lg^3A + a_4 lgH_{50} + a_5 lgZ + a_6 lg^2Z + a_7 lgZ\, lgH_{50} + a_8 lgZ\, lgA + a_9 lgA\, lgH_{50} + a_{10} lg^2A\, lgH_{50} + a_{11} lg^3A\, lgH_{50}. \quad (3.29)$$

Результаты машинной обработки экспериментального материала по модели (3.29) представлены в табл. 3.11.

Таблица 3.11

Характеристика уравнений (3.29); в числителе — константы, в знаменателе — их значимость по Стьюденту

Константы	Показатели					
	сумма площадей сечения, м²/га	масса листвы, т/га	масса древесины ветвей, т/га	масса коры ветвей, т/га	масса древесины ствола, т/га	масса коры ствола, т/га
1	2	3	4	5	6	7
			Береза			
a_0	—0,525	—2,025	—0,132	—0,316	—2,938	—2,371
a_1	—	0,351 / 5,9	—6,216 / 2,9	—4,446 / 2,5	—	—
a_2	0,961 / 6,3	—	5,006 / 3,0	3,613 / 2,6	1,810 / 10,4	1,193 / 6,3
a_3	—0,336 / 4,9	—	—1,104 / 2,6	—0,824 / 2,3	—0,625 / 8,2	—0,387 / 4,6
a_4	0,640 / 4,1	1,631 / 7,8	2,211 / 8,8	1,866 / 8,8	2,162 / 11,6	1,690 / 8,9
a_5	0,250 / 4,4	—	—	—	—	0,246 / 3,5
a_6	—0,236 / 2,4	—0,552 / 4,1	—0,558 / 3,2	—0,378 / 2,6	—0,261 / 2,1	—0,199 / 1,6
Стандартная ошибка уравнения	0,076	0,113	0,135	0,113	0,100	0,093

Электронный архив УГЛТУ

Продолжение табл. 3.11

1	2	3	4	5	6	7
Коэффициент точности аппроксимации	0,921	0,790	0,918	0,869	0,957	0,943
			Осина			
a_0	—0,967	—2,105	—0,960	—0,700	—0,956	—0,570
a_1	1,343 / 25,6	2,190 / 28,6	1,552 / 2,9	1,903 / 3,6	—	—1,135 / 3,3
a_2	—	—0,733 / 17,5	—3,434 / 2,8	—4,337 / 3,6	1,422 / 7,9	1,840 / 3,9
a_3	—0,129 / 8,3	—	1,877 / 2,7	2,249 / 3,3	—0,694 / 10,0	—0,728 / 4,5
a_4	0,630 / 4,9	0,733 / 6,0	—	—	—	—
a_5	—	—1,753 / 2,9	—	—	—	—
a_6	—1,276 / 3,1	—1,367 / 3,4	—1,602 / 2,9	—2,126 / 4,0	—2,409 / 5,7	—2,127 / 6,3
a_7	—	—0,280 / 2,3	—0,318 / 3,6	—0,285 / 3,3	—	0,118 / 2,2
a_8	—	1,354 / 3,4	—	—	—	—
a_9	—	—	—	—	1,016 / 11,0	0,883 / 11,8
a_{10}	—	—	2,294 / 3,0	2,548 / 3,4	—	—
a_{11}	—	—	—1,304 / 2,6	—1,507 / 3,1	—	—
Стандартная ошибка уравнения	0,074	0,068	0,093	0,091	0,075	0,058
Коэффициент точности аппроксимации	0,984	0,987	0,987	0,978	0,995	0,992

Примечание. Константа a_6 для березы достоверна на уровне 0,10.

Электронный архив УГЛТУ

Т. Х. Токмурзин и К. Н. Нурпеисов (1976) при построении модели хода роста фитомассы сосновых древостоев Прииртышья использовали три фактора: возраст, класс бонитета и полноту. К сожалению, они не излагают метода построения моделей, и трудно сказать, чем обусловлены столь низкие коэффициенты детерминации (например, для массы ствола $R^2=0{,}014$). Возможно, что одной из причин является неудачный выбор структуры модели — уравнения статической аллометрии, представляющего в сравнении с моделями табл. 3.11 довольно жесткую схему. Вторая из возможных причин выше уже упоминалась: игнорирование закономерностей строения древостоев по диаметру, высоте, массе фракций дерева и т. д. Высокая адекватность моделей (3.29) объясняется, помимо удачного выбора структуры, также использованием моделей динамики рядов распределения деревьев по толщине в зависимости от возраста и класса бонитета. Они выведены на массовом экспериментальном материале по 194 пробным площадям березы и 50 — осины (Усольцев, Кричун, 1982) и соответствуют нормальным древостоям. Полученные по этим моделям и по данным подеревной фитомассы (Усольцев, 1983б) значения массы фракций на 1 га представляют плавные кривые возрастной динамики биопродуктивности для каждого класса бонитета отдельно. Они сыграли роль «руководящих» и обеспечили высокую адекватность моделей. Показатель адекватности, рассчитанный по соотношению общей и остаточной дисперсии, для подобного экспериментального материала, по-видимому, более правильно рассматривать как показатель точности аппроксимации, завышенный для корреляционного анализа вследствие занижения фактического уровня варьирования, но достаточно адекватный для регрессионного анализа.

Как уже упоминалось, модели биопродуктивности в нашей предыдущей работе (Усольцев, Кричун, 1982) построены без учета густоты для совокупности сомкнутых древостоев (см. табл. 3.1). Хотя таблицы хода роста построены по пробным площадям, заложенным в основном в тех же лесхозах, представлены они более обширным опытным материалом, чем таблицы биопродуктивности, особенно по березе. Поэтому данные таблиц биопродуктивности, составленных без учета варьирующего фона густоты, могли оказаться смещенными относительно показателей таблиц хода роста вследствие недостаточной репрезентативности. В предлагаемом варианте (прил. 4) показатели фитомассы, рассчитанные для полноты

Электронный архив УГЛТУ

1,0 и Z=1,0, ориентированы относительно хода роста нормальных древостоев более определенно. Взаимная увязка таблиц биопродуктивности и хода роста позволяет сочетать чисто теоретическую сторону — закономерности формирования биологической продукции древостоев — с практическим применением результатов исследований в расчетах размера лесопользования и т. п. При густоте, отличной от густоты нормальных древостоев по таблицам хода роста и составляющей 0,5 и 1,5 от табличной, рассчитаны ресурсы надземной фитомассы березовых и осиновых древостоев, опубликованные ранее (Усольцев, 1983а). Графическая интерпретация зависимости массы листвы $P_л$ (в т/га) от густоты N (в тыс. экз./га) древостоя III класса бонитета в статике (рис. 9, а) позволила установить линию предельной густоты, огибающую возрастной набор колоколообразных кривых (на рис. 9, а не показана). Наличие такой линии (более точно — полосы) означает, что фотосинтетический аппарат может функционировать лишь до определенной густоты, за пределами которой древостой не может существовать. Изменение с возрастом остальных фракций представляет кумулятивный процесс продуцирования фитомассы с частичным отпадом. Перенесение линии предельной густоты на график для массы древесины

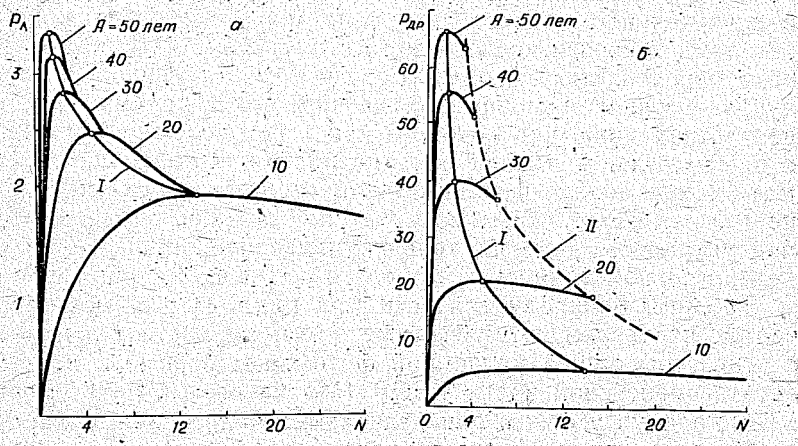


Рис. 9. Изменение массы листвы (а) и древесины ствола (б) в связи с возрастом и густотой березового древостоя; I, II — линии оптимальной и предельной густот

Электронный архив УГЛТУ

стволов $P_{др}$ (в т/га) (рис. 9, б) позволяет установить предельные значения продуктивности и по этой фракции.

На практике в качестве одного из входов таких таблиц вместо густоты требуется полнота древостоя. Поскольку последняя при учете фитомассы дает худшие результаты в сравнении с густотой (Токмурзин, Байзаков, 1970) вследствие неучтенного влияния среднего диаметра древостоя, подобные таблицы (см. прил. 4) составлены на основе моделей (3.29) с использованием связи суммы площадей сечения (и относительной полноты) с относительной густотой (рис. 10).

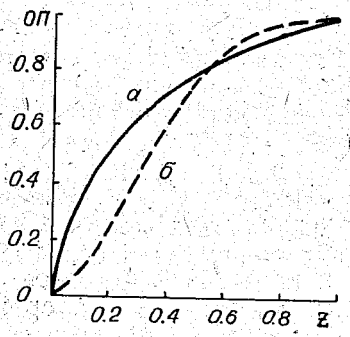


Рис. 10. Связь относительной полноты с относительной густотой в древостоях: а — березовых, б — осиновых

Модели динамики фитомассы на уровне дерева (3.27) дают более надежные результаты в сравнении с выполненными на уровне древостоя (3.29). Если структура фитомассы отдельного дерева, аккумулирующая его реакцию на эколого-ценотические воздействия за всю историю роста, в значительной мере опосредована морфологическими показателями дерева и древостоя, то структура фитомассы древостоя определяется главным образом его строением по продуктивностным и морфометрическим показателям деревьев, возрастная динамика которого как в ретроспективном, так и в перспективном планах пока не подлежит контролю. Математические модели и таблицы динамики фитомассы на уровне древостоя могут быть полезны при оценках биологической продуктивности лесов по территориальным единицам — от отдельного лесного массива до целого региона.

Таблицы биопродуктивности (см. прил. 4) в самых общих чертах подтверждают известные закономерности накопления с возрастом общей надземной фитомассы березы и осины в лесах европейской части СССР (Молчанов, 1974; Науменко, 1978), однако у осины они отличаются более ранним наступлением кульминационного периода.

3.4.3. Оценка фитомассы трехфакторной регрессией по возрасту и ценотическим факторам. В разделе анализиру-

Электронный архив УГЛТУ
ются возрастные и ценотические закономерности формирования надземной фитомассы сосняков в двух физико-географических областях: в Тургайском прогибе (Кустанайская обл.) и Казахском мелкосопочнике (Кокчетавская обл.). В каждой представлен один тип лесорастительных условий. В силу последнего обстоятельства отпадает надобность в специальной матрице, вычленяющей влияние высоты дерева в качестве индикатора добротности местообитания. Регрессионные модели подобраны методом последовательного сокращения размерности массива данных для трех фракций в абсолютно сухом состоянии: ствола в коре, ветвей в коре и хвои. Для каждой пробной площади по данным 8—13 модельных деревьев первоначально рассчитаны взаимосвязи массы фракции с диаметром ствола по уравнению статической аллометрии (1.3). Далее в пределах возрастной группы (см. табл. 3.2) рассчитаны линейные связи lgb с аллометрической константой и связи последней с относительной густотой Z. Затем свободные члены полученных уравнений скоррелированы с возрастом A или его логарифмом, а коэффициенты регрессии (угловые), в свою очередь, — с названными свободными членами. В итоге получены две разновидности регрессионных моделей:

$$\lg y = a_0 + a_1 \lg A + a_2 \lg^2 A + a_3 Z + a_4 \lg D + a_5 \lg^2 A \lg D + a_6 Z \lg A + a_7 \lg A \lg D + a_8 Z \lg D; \quad (3.30)$$

$$\lg y = a_0 + a_1 A + a_2 A^2 + a_3 Z + a_4 \lg D + a_5 AZ + a_6 A^2 Z + a_7 A \lg D + a_8 Z \lg D + a_9 AZ \lg D, \quad (3.31)$$

где y — фитомасса фракции дерева в абсолютно сухом состоянии, кг. Характеристика уравнений (3.30) и (3.31) приведена в табл. 3.12. Они действительны для данных в табл. 3.2 интервалов возраста и относительной густоты в пределах размаха варьирования деревьев по ступеням толщины, специфичного для каждого класса возраста и градации густоты. Особенность моделей состоит в том, что их статистически значимые синергизмы получены в результате последовательного разложения многомерного массива данных на составляющие парные связи.

Модели (3.30)—(3.31) табулированы (прил. 5) по классам возраста и ступеням толщины деревьев при относительной густоте Z=1, соответствующей числу стволов заданного класса возраста по таблицам хода роста (Макаренко, 1980) для сосняков сухих загущенных V класса бонитета (Казахский мелкосопочник) и свежих сомкнутых III класса (ост-

Электронный архив УГЛТУ

Таблица 3.12

Характеристика уравнений (3.30) и (3.31)

Константы	Сухие сосняки			Свежие сосняки		
	ствол (3.30)	ветви (3.31)	хвоя (3.31)	ствол (3.30)	ветви (3.30)	хвоя (3.30)
a_0	—0,791	—1,3674	—1,3414	—1,458	0,485	8,486
a_1	0,0312	—0,00318	0,00546	0,756	—3,962	—14,113
a_2	—0,269	—0,000338	—0,000384	—0,340	1,266	3,313
a_3	0,0659	—0,9592	—0,2222	0,0527	0,191	0,416
a_4	0,342	0,6965	1,0733	—	—2,200	—7,497
a_5	—	0,01163	—0,01162	—0,438	—1,722	—3,867
a_6	0,0241	0,000555	0,00055	—	—	—
a_7	1,0055	0,04115	0,0247	2,151	5,902	12,694
a_8	—0,090	2,1859	1,1776	—0,0396	—0,245	—0,347
a_9	—	—0,06753	—0,0354	—	—	—
Коэффициент детерминации R^2	0,953	0,922	0,901	0,992	0,966	0,943

ровные боры Кустанайской обл.). Данные табулирования свидетельствуют о существенных различиях абсолютных показателей фитомассы у деревьев двух регионов. Доля ветвей в надземной фитомассе практически одинаковая, несмотря на различие древостоев по производительности на два класса бонитета.

В свежих сосняках доля хвои существенно ниже, а доля стволовой древесины — выше, что объясняется различием условий произрастания, отраженным в показателях класса бонитета, и свидетельствует о более эффективной работе ассимиляционного аппарата сосны в этих условиях.

3.4.4. Эскизы таблиц биопродуктивности для сосновых древостоев. Модели, описывающие закономерности формирования фитомассы деревьев сосны (табл. 3.12), создают предпосылки для выявления закономерностей накопления фитомассы древостоев на основе моделей возрастной дина-

Электронный архив УГПТУ

мики их строения. На базе таблиц хода роста для сухих загущенных сосняков Казахского мелкосопочника и свежих сомкнутых сосняков Кустанайской области (Макаренко, 1980) с использованием рядов распределения деревьев по ступеням толщины в возрастной динамике, предоставленных нам А. А. Макаренко, составлены эскизы таблиц биологической продуктивности для сосняков Казахского мелкосопочника и Тургайского прогиба (прил. 6). Таблицы свидетельствуют о бо́льших запасах стволовой древесины и меньших запасах хвои на единице площади в свежих сосняках в сравнении с сухими с примерно равными значениями массы ветвей.

Нужно отметить, однако, что подобное совмещение таблиц хода роста и биопродуктивности может дать некоторые отклонения нормативных значений от фактической фитомассы, поскольку ряды распределения в таблицах хода роста строятся при известных значениях не только густоты, но и среднего диаметра, а в моделях формирования фитомассы деревьев учитываются густота и возраст, но не средний диаметр.

3.4.5. Оценка фитомассы кроны деревьев, получаемой при рубках ухода. Модели динамики фитомассы различных фракций дерева (3.27), (3.30) и (3.31) и эскизы таблиц биопродуктивности дают возможность рассчитать в абсолютно сухом состоянии либо фитомассу всех надземных фракций, либо только фитомассу кроны по известным запасам вырубаемой древесины при главном пользовании. Масса древесной зелени (ДЗ) и ветвей в свежесрубленном состоянии может быть определена для березы и осины по моделям раздела 3.3.2 и для сосны — по моделям и эскизу таблиц биопродуктивности, опубликованным ранее (Усольцев, Макаренко, 1978). Для этого выводятся отношения массы кроны к объему ствола или запасу древостоя. Доля листвы (хвои) в массе ДЗ в свежесрубленном состоянии составляет: у березы $(64{,}3 \pm 0{,}3)$ %, у осины $(68{,}8 \pm 0{,}5)$ % и у сосны $(67{,}0 \pm 0{,}8)$ %.

При учете фитомассы крон деревьев, полученных при рубках ухода, подобную процедуру нельзя считать достаточно совершенной, поскольку эта фитомасса в значительной степени определяется толщиной ствола, а средний диаметр вырубаемых стволов зависит от метода и интенсивности рубок ухода.

По результатам перечета деревьев на 24 пробных площадях II—IV классов возраста проведены условно рубки ухо-

Электронный архив УГЛТУ

да по низовому методу в 6—8 последовательных приемов с наращиванием степени изреживания по сумме площадей сечений. Последовательно убирали деревья низших ступеней толщины и для каждого приема вычисляли средние диаметры вырубленных стволов $d_{ср}$ (в см). Зависимость $d_{ср}$ от степени изреживания по сумме площадей сечений $П_g$ (в %) оказалась близкой к функциональной ($R=0{,}999—0{,}966$) и выразилась уравнениями вида

$$\lg d_{ср} = \pm a_0 + a_1 \lg П_g. \qquad (3.32)$$

При увеличении среднего диаметра древостоя $D_{ср}$ регрессионный коэффициент a_1 в (3.32) уменьшается согласно уравнению $a_1 = -0{,}20 \lg D_{ср} + 0{,}42$; $R = -0{,}892$. Уравнение (3.32) действительно в пределах $0 < П_g < 100$. При $П_g = 0$

$$\lg d_{ср} = \pm a_0. \qquad (3.33)$$

При $П_g = 100$ $\lg d_{ср} = 2a_1 \pm a_0 = \lg D_{ср}$, откуда

$$a_0 = \pm (\lg D_{ср} - 2a_1). \qquad (3.34)$$

Отложив по правой логарифмической шкале ординат (рис. 11) значения среднего диаметра насаждения, найден-

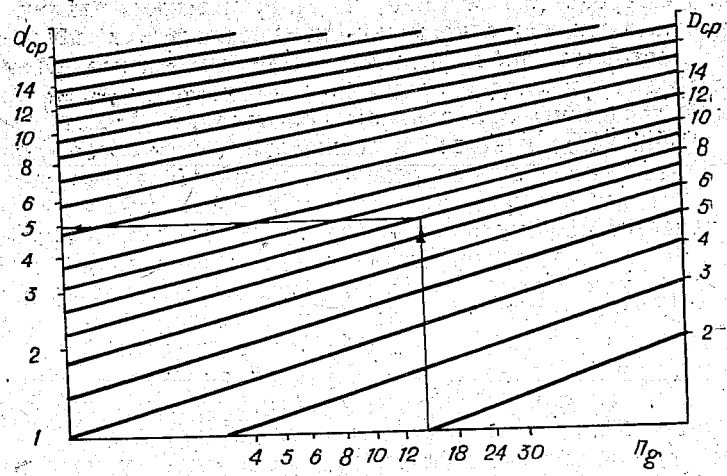


Рис. 11. Номограмма для определения среднего диаметра вырубаемых стволов по среднему диаметру древостоя и степени изреживания по запасу

Электронный архив УГЛТУ

ные по (3.32) при $П_g=100$, а по левой — значения, определенные по (3.33) и (3.34) при $П_g=0$, и соединив полученные точки прямыми, построили номограмму, по которой для любых средних диаметров древостоя и степеней изреживания по низовому методу отыскивается средний диаметр вырубаемых стволов. В итоге с привлечением данных по соотношению массы фракций кроны и объема ствола по ранее выведенным моделям (Усольцев, Макаренко, 1978; Усольцев, 1980) составлены таблицы выхода фитомассы крон по отношению к вырубаемому запасу в зависимости от степени изреживания (табл. 3.13) и при средней степени изреживания в расчете на 1 га (табл. 3.14). Таблицы предназначены для ориентировочной оценки фитомассы крон, получаемой при различных рубках. В процессе расчета выхода ДЗ в выбираемый древесный запас не следует включать отмирающие деревья и сухостой.

Таблица 3.13

Выход фитомассы крон при рубках ухода в свежесрубленном состоянии по отношению к вырубаемому запасу

Вид рубки ухода	Класс возраста	Степень изреживания по площади сечения, %	Фитомасса					
			ДЗ, кг/м³			ветви, %		
			береза	осина	сосна	береза	осина	сосна
Прочистка	II	10	226	222	267	5,2	10	1,6
		20	225	216	259	6,2	11	1,7
		30	224	212	255	6,8	12	1,9
Прореживание	III	10	141	67	235	10,2	8	2,5
		20	134	69	230	10,4	9	2,8
		30	130	70	227	10,5	10	2,9
Проходная рубка	IV	10	80	28	220	9,1	4	3,3
		20	81	31	215	9,5	5	3,5
		30	81	33	213	9,7	6	3,7

Электронный архив УГЛТУ

Выход фитомассы крон при рубках

Вид рубок	Класс возраста	Запас стволовой древесины, м³/га	Выбираемый запас, м³/га, при интенсивности выборки по запасу, %				Выход ДЗ, кг/м³, выбираемого запаса
			10	20	50	100	
						Береза	II—III
Прочистки	II	62	6	12	—	—	225
Прореживания	III	105	10	21	—	—	134
Проходные	IV	142	14	28	—	—	80
Лесовосстановительные	VI	195	—	39	97	195	50
						Осина	I—II
Прочистки	II	107	11	21	—	—	216
Прореживания	III	171	17	34	—	—	70
Проходные	IV	228	23	46	—	—	30
Лесовосстановительные	V	278	—	56	139	278	37
						Сосна	III
Прочистки	II	130	13	27	—	—	260
Прореживания	III	230	23	46	—	—	230
Проходные	IV	310	31	62	—	—	215
Лесовосстановительные	V—VI	370	—	74	185	370	62

3.5. Моделирование динамики плотности и содержания абсолютно сухого вещества древесины

3.5.1. Методические вопросы моделирования физико-технических характеристик фитомассы. В экологическом древесиноведении можно условно выделить два направления: техническое, включающее исследования анатомических и физико-механических свойств древесины как технологического сырья в увязке с экологическими факторами (Перелыгин, Уголев, 1971; Полубояринов, 1974), и более узкое — ресурсоведческое, располагающее сведениями в основном о плотности и влажности фракций фитомассы, необходимыми в расчетах биологической продуктивности лесных фитоценозов (Поздняков и др., 1969; Уткин, 1970; Поздняков, 1973; Полубояринов, 1973, 1976; Технерядов, Шоманов, 1976; Семечкина, 1978). Некоторые исследователи (Полубояринов, Да-

Электронный архив УГЛТУ

Таблица 3.14

в расчете на 1 га древостоя

Выход ветвей, % к выбираемому запасу	Выход ДЗ на 1 га лесосеки, т, при интенсивности выборки, %				Выход ветвей на 1 га лесосеки, м³, при интенсивности выборки, %			
	10	20	50	100	10	20	50	100
классов бонитета								
6,2	1,3	2,7	—	—	0,4	0,7	—	—
10,4	1,3	2,7	—	—	1,0	2,1	—	—
9,5	1,1	2,2	—	—	1,3	2,6	—	—
15		2,0	4,8	9,7	—	5,8	14,5	29,0
классов бонитета								
11	2,4	4,5	—	—	1,2	2,4	—	—
9	1,2	2,4	—	—	1,5	3,0	—	—
5	0,7	1,4	—	—	1,1	2,2	—	—
13	—	2,1	5,1	10,3	—	7,3	18,1	36,1
класса бонитета								
1,7	3,4	7,0	—	—	0,2	0,5	—	—
2,8	5,3	10,6	—	—	0,6	1,3	—	—
3,5	6,7	13,3	—	—	1,1	2,2	—	—
7,3	—	4,6	11	23	—	5,4	13,5	27,0

видов, 1975; Исаева, 1978; Klem, 1965; Hakkila, 1966), изучая изменчивость свойств древесины на уровнях дерева и древостоя, применяют многофакторный подход, доводя при этом число учтенных факторов воздействия до 12 (Klem, 1965), из которых статистически достоверными оказываются обычно не более двух (Полубояринов, 1973; Исаева, 1978) при высокой остаточной дисперсии исследуемого показателя (до 57—84%). Это объясняется, по-видимому, не только известной трудностью учета некоторых существенных факторов (индивидуальной наследуемости признака, микроусловий эколого-ценотической среды отдельного дерева в их ретроспективной временной динамике и др.), но и недооценкой качественного анализа как исходного этапа математического моделирования, включающего, в частности, логическую интерпретацию и отбор наиболее информативных факторов и введение их в форме, снижающей уровень варьирования. Существенно повысить точность опосредованного, или косвенного,

Электронный архив УГЛТУ

определения плотности и влажности фракций растущих деревьев при столь значительной доле остаточного варьирования на начальном этапе исследования весьма трудно даже с использованием логически обоснованных и, как следствие, сравнительно немногочисленных факторов воздействия; еще труднее оправдать такую постановку вопроса — «уточнение ради уточнения». Есть основание полагать, что на первом этапе моделирования важно выявить по возможности большее число статистически значимых факторов и объяснить характер их воздействия на динамику искомого показателя, т. е. дать определенные предпосылки для системного подхода к решению проблемы, следствием реализации которого станет не только повышение точности учета признака, но и возможность прогнозирования его динамики под воздействием экзо- и эндогенных факторов.

Мы не исследуем в качестве исходного признака условную плотность фракций $\rho_{усл}$, показатель довольно стабильный, но теряющий информативность при весовом методе учета фитомассы. Это показатель интегральный, его можно представить как произведение плотности в свежесрубленном состоянии ρ_w и содержания абсолютно сухого вещества S, предполагая, что объемы образцов в свежесрубленном и влагонасыщенном состояниях практически одинаковы (Семечкина, 1978). Первый показатель используется для пересчета объема фракции на ее массу, второй — для пересчета последней со свежесрубленного состояния на абсолютно сухое. С учетом различной реакции исходных показателей на факторы воздействия и различного практического назначения анализ их выполнен порознь. Нашей задачей было сформулировать принципы многофакторного подхода к объяснению возрастной и ценотической изменчивости ρ_w и S фракций фитомассы в ресурсоведческом аспекте и реализовать этот подход на конкретных примерах.

По О. И. Полубояринову (1973), наиболее информативные факторы, определяющие плотность древесины,— возраст и скорость роста дерева. У некоторых древесных пород их влияние оказывается противоположным, а поскольку оба фактора проявляются в размерах ствола, в частности в его диаметре, то последний, как правило, не оказывает на плотность статистически достоверного воздействия (Полубояринов, 1973; Исаева, 1978). Закономерности текущего прироста фитомассы (опосредованного шириной годичного кольца) и накопления фитомассы (выражаемого интегралом функции

ее прироста) — процессы взаимосвязанные. Это дает основание предположить, что в исследованиях биологической продуктивности древостоев они определяются одним общим набором факторов. Можно считать также, что влияние индивидуальной наследуемости, флуктуаций локальных эдафических условий и климата, сезонной и суточной динамики запаса влаги в стволе, обусловленной изменением физиологической активности дерева, и других факторов играет второстепенную роль. Поэтому их воздействием в локальных условиях местообитания на начальном этапе исследований можно в какой-то мере пренебречь. Тогда возрастная динамика ширины годичного кольца определяется функцией прироста, на которую накладывается влияние ценотических условий, в частности пространства роста. Учитывая известную обусловленность физико-технических показателей древесины средней шириной годичных колец, можно, таким образом, предположить, что общая тенденция динамики ρ_w и S в чистом одновозрастном древостое в данных эдафических условиях при отсутствии хозяйственного вмешательства определяется возрастом, относительной густотой древостоя Z, представляющей вычлененную безразмерную характеристику его плотности (полноты), свободную от влияния изменения числа стволов в процессе естественного изреживания, и рангом дерева по толщине R_d, свободным, в отличие от диаметра ствола, от влияния возраста и густоты и характеризующим только ценотическое положение дерева в древостое (по аналогии с классом роста). Вследствие возрастной динамики конуса нарастания ствола, определяющей изменение соотношений древесины с различной физиологически обусловленной влажностью и плотностью в направлении от вершины к основанию ствола, ρ_w и S изменяются вдоль по стволу (Полубояринов, 1976; Исаева, 1978). С целью вычленения этой закономерности, т. е. элиминирования изменчивости высоты дерева как комплексного фактора, отражающего влияние возраста, ценотического положения дерева, эдафических условий и т. д., в расчет моделей динамики локальных ρ_w и S древесины, наряду с названными тремя факторами, включено положение диска по высоте ствола h в долях от общей высоты дерева. Модели в целом могут быть представлены общим видом

$$\rho_w = f(A, Z, R_d, h); \quad S = \varphi(A, Z, R_d, h). \qquad (3.35)$$

В исследовании биологической продуктивности древостоев важно выявить соотношения между локальными ρ_w и

S и средними $\rho_{ср}$ и $S_{ср}$ значениями. Л. Н. Исаевой (1978) $\rho_{ср}$ найдена как среднеарифметическое значение локальных плотностей. Однако с учетом изменения площади сечения по высоте ствола более корректным следует считать отыскание $\rho_{ср}$ как величины, средневзвешенной по площади сечения ствола, по формуле

$$\rho_{ср} = \sum_{h=0}^{1} \rho_{wi} d_i^2 / \sum_{h=0}^{1} d_i^2, \qquad (3.36)$$

где ρ_{wi} и d_i — плотность древесины в свежесрубленном состоянии и диаметр ствола без коры в i-м сечении.

Переходя от дискретной формы записи (3.36) к интегральной, необходимо принять во внимание, что при выявлении взаимосвязи ρ_w с $\rho_{ср}$ и S с $S_{ср}$ из четырех факторов моделей (3.35) определяющая роль принадлежит лишь относительной высоте h. Поэтому можно записать:

$$\rho_{ср} = \frac{\int_0^1 \rho_w d^2 dh}{\int_0^1 d^2 dh}; \qquad (3.37)$$

$$S_{ср} = \frac{\int_0^1 S d^2 dh}{\int_0^1 d^2 dh}, \qquad (3.38)$$

где $\rho_w d^2 = f(h)$; $Sd^2 = \varphi(h)$; $d^2 = \psi(h)$,

т. е. подынтегральные выражения являются функциями только относительного местоположения по высоте ствола, а d характеризует в данном случае лишь форму образующей ствола, но не линейный размер его как морфологический параметр. Поэтому при нахождении подынтегральных функций в (3.37) и (3.38) появляется необходимость исследования формы ствола, динамика которой определяется теми же названными факторами, т. е.

$$\eta = \psi(A, Z, R_d, h), \qquad (3.39)$$

где $\eta = d/d_{0,1}$ — число сбега, или локальный показатель формы ствола без коры; $d_{0,1}$ — диаметр ствола без коры на высоте, равной 1/10 от общей высоты дерева.

Электронный архив УГЛТУ

3.5.2. Модели и таблицы динамики плотности и содержания абсолютно сухого вещества древесины осины. Обработка материала выполнена на основе предварительного графического анализа парных связей и последующей линеаризации выражений (3.35) и (3.39) путем трансформирования факторов, т. е. введения различных дробных и целочисленных степеней и произведений факторов, учитывающих их совместный эффект. При этом исключались факторы, значимые на уровне ниже 0,05. В результате получены уравнения:

$$\rho_w = 825{,}19 - 2{,}1525A + 49{,}1549Z - 841{,}97h + \\ + 907{,}9h^2 + 1{,}621hR_d; \qquad (3.40)$$

$$\sigma = \pm 68{,}1; \qquad R^2 = 0{,}558;$$

$$S = 85{,}931 - 1{,}155A + 1{,}1268AZ - 25{,}327Z - 0{,}1249hR_d; \qquad (3.41)$$

$$\sigma = \pm 3{,}32; \qquad R^2 = 0{,}527;$$

$$\eta = d/d_{0,1} = 1{,}1807 + 0{,}0009942hR_d - 0{,}6123h - 0{,}001805h^2A - \\ - 0{,}5613h^3 - 0{,}00227h^2R_d + 0{,}06514h^2Z; \qquad (3.42)$$

$$\sigma = \pm 0{,}025; \qquad R^2 = 0{,}994.$$

Анализ (3.40)—(3.42) подтверждает, что локальные показатели ρ_w, S и η на статистически достоверном уровне определяются одним и тем же набором факторов (A, Z, R_d, h), однако уравнения различаются характером связи и различной остаточной дисперсией: в (3.42) она значительно ниже, чем в (3.40) и (3.41), главным образом по причине использования в первом случае индексного и в силу этого менее варьирующего показателя η и большей точности получения экспериментальных данных d_i по сравнению с ρ_{wi} и S_i.

Последующий пример расчета $\rho_{ср}$ и $S_{ср}$ выполнен на основе (3.40)—(3.42) и (3.37)—(3.38). Чтобы получить при заданных значениях возраста, густоты и ранга дерева, подставляемых в (3.40)—(3.42), соответствующие подынтегральные выражения в (3.37)—(3.38), необходимо предварительно рассчитать значения d как характеристики формы образующей ствола для деревьев различных линейных размеров в пределах древостоя и по классам возраста. Для этого нужно перейти от безразмерного фактора R_d к размерному — диаметру в коре D и от него — к диаметру без коры $d_{0,1}$, чтобы из соотношения $\eta = d/d_{0,1}$ при известных значениях η и $d_{0,1}$ получить искомую величину d. Использована трехэтапная вспомогательная процедура, фрагментарные результаты

Электронный архив УГЛТУ

которой для отдельных возрастов и ступеней толщины последовательно записаны в табл. 3.15.

Таблица 3.15

Соотношение таксационных признаков деревьев в сомкнутых осиновых древостоях III класса бонитета при Z=1

Показатели	Возраст A, лет								
	10			30			50		
Диаметр в коре D на высоте груди, см	1	2	4	6	10	16	16	22	30
Ранг дерева по диаметру R_d	10	50	96	7	50	97	14	50	97
Высота дерева H, м	2,89	3,78	4,94	9,06	11,0	12,4	14,0	15,8	17,9
Диаметр ствола $d_{0,1}$ без коры на высоте 0,1 H, см	1,15	2,09	3,97	5,7	9,45	15,1	15,1	20,7	28,2
Относительная высота $h_{1,3}$ точки замера диаметра D	0,45	0,34	0,26	0,14	0,12	0,105	0,093	0,082	0,073

1. По рядам распределения деревьев по диаметру, полученным при составлении таблиц хода роста, для древостоев III класса бонитета в возрасте 10, 20, 30, 40 и 50 лет при Z=1 и по данным перечета на пробных площадях при Z, отличных от 1,0, построены огивы, по которым для 5—7 ступеней толщины, взятых в пределах размаха их варьирования с постоянной градацией, сняты значения рангов R_d.

2. Подстановкой известных значений возраста и диаметра в уравнение возрастной динамики соотношения высот и диаметров в осиновых древостоях III класса бонитета

$$\lg H = 1{,}4759 \lg A - 0{,}4311 \lg^2 A + 0{,}3874 \lg D - 0{,}5839$$

рассчитаны соответствующие значения высот деревьев. Величина H без существенного снижения точности расчета $\rho_{ср}$ и $S_{ср}$ может быть взята из таблиц хода роста древостоя как среднее значение для данного возраста.

3. С использованием экспериментального материала, по которому получено уравнение (3.42), выведена зависимость

$$\eta_{1,3} = \frac{D}{d_{0,1}} = f(H) = \frac{0{,}1216}{H} - \frac{1{,}9575}{H^2} + 1{,}0636,$$

Электронный архив УГЛТУ

подстановкой в нее известных значений D и H найдены соответствующие значения $d_{0,1}$.

Табулированием (3.40)—(3.42) с вводом значений A, R_d, $d_{0,1}$ и Z получены вероятностные расчетные значения ρ_w, S и d для соответствующих h в интервале от 0 до 0,9, а также d^2, $\rho_w d^2$, Sd^2. Зависимости $d^2=\psi(h)$, $\rho_w d^2=f(h)$, $Sd^2=\varphi(h)$ аппроксимированы полиномом 6-го порядка при $R^2=0{,}9999$ и использованы в качестве подынтегральных функций в (3.37) и (3.38).

П. Хаккила (Hakkila, 1966), О. И. Полубояринов (1976) и Л. Н. Исаева (1978) рассчитывают среднюю для ствола плотность древесины посредством коррелирования ее с плотностью образца на высоте 1,3 м. Однако нужно учитывать, что относительная высота точки замера диаметра D в силу стереометрически неравнозначного ее положения на образующей ствола в значительной мере зависит от возраста и в пределах последнего — от ценотического положения дерева. Поэтому при одной общей тенденции изменения величины ρ_w в зависимости от h динамика ρ_w (рис. 12) на высоте 1,3 м (обозначаемого далее $\rho_{1,3}$) имеет различный характер, специфичный для каждого из факторов A, R_d и Z в отдельности.

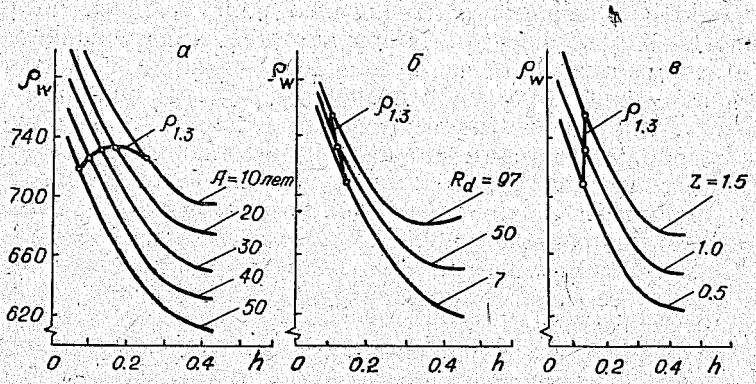


Рис. 12. Изменение локальной плотности древесины осины по относительной высоте дерева в связи: а — с возрастом при Z=1, R_d=50; б — с рангом дерева при Z=1, A=30 лет; в — с густотой древостоя при R_d=50, A=30 лет

Рассчитав по заданным значениям A, R_d, H соответствующие величины $h_{1,3}$ и подставив их в (3.40) и (3.41), мы на-

Электронный архив УГЛТУ

шли значения плотности и содержания абсолютно сухого вещества древесины на высоте груди ($\rho_{1,3}$ и $S_{1,3}$). Полученный расчетом набор локальных и средних значений ρ_w и S аппроксимирован по A, R_d и Z регрессионными уравнениями:

$$\rho_{1,3}=517,2+10,703A-0,2697A^2+0,002076A^3+67,96Z-$$
$$-11,607Z^2+1,0852\cdot R_d-0,02676AR_d+0,0002203A^2R_d; \quad (3.43)$$
$$\sigma=\pm 2,95; \quad R^2=0,990;$$

$$S_{1,3}=83,93-1,025A-0,001565A^2-24,898Z+1,1004AZ-$$
$$-0,0261R_d+0,0004049AR_d; \quad (3.44)$$
$$\sigma=\pm 0,215; \quad R^2=0,990;$$

$$\rho_{ср}=697,31-2,1597A+51,387Z+0,4551R_d; \quad (3.45)$$
$$\sigma=\pm 2,53; \quad R^2=0,996;$$

$$S_{ср}=85,90-1,1465A-25,333Z-0,03725R_d+1,123AZ; \quad (3.46)$$
$$\sigma=\pm 0,146; \quad R^2=0,996.$$

Множественная связь признаков близка к функциональной, все константы значимы на уровне 0,05 и выше. Результаты табулирования (3.43)—(3.46) для сомкнутых древостоев при Z=1 (табл. 3.16) показывают, что $\rho_{1,3}$ и $\rho_{ср}$ имеют одинаковые тенденции изменения по рангу дерева, но различные — по возрасту; $\rho_{1,3}$ с возрастом вначале увеличивается, а затем снижается, а $\rho_{ср}$ снижается линейно. Закономерности изменения локальной и средней $\rho_{усл}$ различаются как по рангу, так и по возрасту: тенденции динамики локальной $\rho_{усл}$ по обоим факторам аналогичны изменению $\rho_{1,3}$, а средняя $\rho_{усл}$ снижается с возрастом и не зависит от ранга дерева по толщине. Величины S и $S_{ср}$ с возрастом остаются практически стабильными, но снижаются с увеличением толщины дерева. Таким образом, если находить $\rho_{ср}$ по парной связи с $\rho_{1,3}$, то неоднозначная структура связи $\rho_{ср}$ и $\rho_{1,3}$ с факторами воздействия A, R_d и Z остается скрытой, и в силу этого парная связь $\rho_{ср}$ с $\rho_{1,3}$, по-видимому, будет неустойчивой.

Поскольку выявление связи средних величин $\rho_{ср}$ и $S_{ср}$ с локальными $\rho_{1,3}$ и $S_{1,3}$ усложняется вследствие стереометрически неравнозначного положения высоты точки замера последних на образующей ствола, представляет интерес поиск такой точки замера локального признака, в которой его значение совпадало бы со средним для ствола. Приравняв (3.40) и (3.45), получили для заданных значений A, Z и R_d по две точки h_1 и h_2 пересечения кривой локальных ρ_w с прямой,

Электронный архив УГЛТУ

Таблица 3.16

Физико-технические показатели древесины осины в зависимости от толщины дерева и возраста в сомкнутых древостоях III класса бонитета при Z=1

Ступень толщины, см	Ранг дерева по диаметру	Плотность в свежесрубленном состоянии, кг/м³		Содержание абсолютно сухого вещества, %		Условная плотность, кг/м³	
		локальная на высоте груди	средняя	локальное на высоте груди	среднее	локальная на высоте груди	средняя
		А=10 лет					
1	10	664	732	59,4	60,0	395	439
2	50	698	750	58,5	58,5	408	439
3	80	723	764	57,9	57,4	418	439
4	96	736	771	57,5	56,8	423	438
		А=20 лет					
4	16	707	713	59,6	59,5	421	424
6	50	728	728	59,0	58,2	430	424
8	85	750	744	58,4	56,9	438	423
10	98	759	750	58,2	56,4	441	423
		А=30 лет					
8	25	720	695	59,5	58,9	429	409
10	50	732	706	59,2	58,0	433	409
12	73	743	717	58,9	57,1	437	409
14	89	750	724	58,6	56,5	440	409
		А=40 лет					
10	9	706	666	59,5	59,3	420	395
16	50	721	685	59,1	57,8	426	396
22	90	736	703	58,7	56,3	432	396
		А=50 лет					
18	24	701	652	58,8	58,5	412	381
22	50	709	663	58,6	57,5	415	381
26	82	718	678	58,4	56,3	420	381

Электронный архив УГПТУ
параллельной оси абсцисс и соответствующей значению $\rho_{ср}$, из которых практический интерес представляет точка, приходящаяся на нижнюю часть ствола h_1, доступную для взятия образца с растущего дерева.

При расчете $\rho_{ср}$ по известным $\rho_w = f(A, Z, R_d, h)$ факторы A, Z и, главным образом, R_d обуславливают смещения точки h_1 по стволу в интервале от 0,14 до 0,18. Однако на фоне детерминации (3.40), пока довольно низкой, этим смещением можно пренебречь и установить в качестве практической придержки $\rho_{ср} = \rho_{0,167}$, где $\rho_{0,167}$—локальная плотность на высоте $h_1 = 0,167$. При высоте дерева более 10 м h_1 становится труднодоступной для взятия образца. Связь $\rho_{ср}$ с локальным показателем, измеренным на доступной высоте, например $h_1 = 0,05$, дается совместным решением (3.40) и (3.45) при $h = 0,05$: $\rho_{ср} = 0,913\rho_{0,05}$. Влияние h на величину S в (3.41) незначительно, хотя и статистически достоверно. Поэтому $S_{ср}$ можно найти по локальному S, найденному на любой h, например, $h = 0,05$ или $h = 0,167$. По мере развития многофакторного подхода к определению ρ_w и S и соответствующего повышения детерминации (3.40) и (3.41) будет возрастать и роль формы ствола, рассчитываемой по (3.42), в повышении точности расчета средних показателей по известным локальным.

Проверка на экспериментальных данных подтвердила адекватность моделей динамики ρ_w и S древесины. Доля остаточного варьирования (44—47%) будет снижаться по мере развития изложенного подхода: закладкой серии аналогичных опытов в сезонной динамике в увязке с климатодиаграммами; введением ранжированных индексов, объясняющих варьирование признака формовым разнообразием вида; включением значения биопотенциала дерева как характеристики его физиологического состояния и т. д. Необходимо также повысить точность экспериментального определения величин ρ_w и S.

Изложенный подход к регрессионному моделированию, ориентированный на выявление структуры воздействия факторов на результирующий признак, является предпосылкой для адекватного прогнозирования качественных характеристик фитомассы древостоев.

Электронный архив УГЛТУ

3.6. Высота замера диаметра ствола как дополнительный фактор при оценке фитомассы дерева

Результативность моделирования биологических объектов зависит от уровня выполнения качественного анализа, т. е. от изученности меняющейся во времени и пространстве структуры воздействия факторов на объект. По отношению к отдельному фактору этот принцип означает выявление наиболее информативного, или активного, диапазона его воздействия (Лиепа, 1980), с целью «рафинирования» воздействия, избавления от излишней несущественной информации. В исследовании продукционного процесса лесного фитоценоза, в частности структуры его фитомассы, аналогичной цели служит выявление такого оптимального диапазона, в пределах которого выбранный фактор, неоднозначный по своей информативности, объяснял бы наибольшую долю изменчивости результирующего признака. При оценке фитомассы используется метод регрессионных моделей, выражающих обусловленность фитомассы морфометрическими параметрами дерева, из которых наиболее информативным признан диаметр ствола. Однако этот параметр неоднозначен по своей информативности в отношении абсолютной величины, изменяющейся вдоль по стволу в соответствии с формой его образующей, и различной изменчивости этой величины по высоте ствола (Чуенков, 1960; Усольцев, 1976а). Обычно используют значение диаметра ствола на высоте груди D; с уменьшением высоты (второго по значимости морфометрического параметра дерева) точка замера D сдвигается по образующей ствола вверх. При высоте дерева менее 1,3 м параметр D полностью теряет информативность. Предложение А. С. Тихонова (1971) использовать в таком случае отрицательные ступени толщины не учитывает варьирование и закономерности изменения сбега по высоте ствола, что вносит существенные искажения в величину параметра.

В этой связи представляется перспективным выявление диапазона высоты замера диаметра ствола, оптимального для оценки фитомассы различных фракций дерева, на основе метода М. Коватса (Kovats, 1977), который включает в регрессионную модель характеристику диапазона (т. е. высоту) замера диаметра в качестве дополнительного корректировочного фактора. В этом разделе дано развитие метода Коватса на примере оценки объемов стволов березы, осины и сосны в начальный период роста. Исходные данные для

Электронный архив УГЛТУ

расчета объемов стволов получены по 100 модельным деревьям каждой породы, срубленным на 32 пробных площадях, заложенных в Кустанайской и Кокчетавской областях. Происхождение березы — порослевое (III), осины — корнеотпрысковое (III), сосны — естественное и искусственное (IV). Высота деревьев от 0,5 до 13 м, возраст — от 2 до 35 лет. Для всей их совокупности по каждой породе рассчитаны уравнения

$$\lg V = a_0 + a_1 \lg D_h + a_2 \lg H, \qquad (3.47)$$

где V — объем ствола, дм³; H — высота дерева, м; D_h — диаметр в коре, см, на относительной высоте h.

Для объема ствола в коре $V_{вк}$ и без коры $V_{бк}$ при $h = 0; 0{,}05; 0{,}1; 0{,}2; \ldots 0{,}6; 0{,}7$ рассчитаны уравнения (3.47) и их стандартные ошибки. В интервале h от 0,1 до 0,3 у березы и от 0,2 до 0,4 у осины и сосны ошибки оказались наименьшими (рис. 13), что свидетельствует о наиболее стабильной и информативной форме ствола на этом участке. Последующий графический анализ зависимости констант a_0, a_1 и a_2 от h показал, что в интервале h, обеспечивающем наименьшую

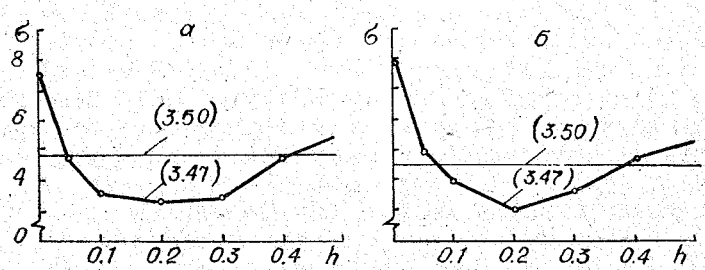


Рис. 13. Ошибка уравнений (3.47) при различных значениях относительной высоты и уравнений (3.50) при определении объема ствола березы: а — в коре, б — без коры. Цифрами на рис. 13—15 обозначены номера уравнений

ошибку, связь названных констант с h для березы и осины криволинейная, для сосны линейная и может быть выражена полиномом

$$a_i = b_0 + b_1 h + b_2 h^2. \qquad (3.48)$$

Константы уравнений (3.48) сведены в табл. 3.17.

Электронный архив УГЛТУ

расчета объемов стволов получены по 100 модельным деревьям каждой породы, срубленным на 32 пробных площадях, заложенных в Кустанайской и Кокчетавской областях. Происхождение березы — порослевое (III), осины — корнеотпрысковое (III), сосны — естественное и искусственное (IV). Высота деревьев от 0,5 до 13 м, возраст — от 2 до 35 лет. Для всей их совокупности по каждой породе рассчитаны уравнения

$$\lg V = a_0 + a_1 \lg D_h + a_2 \lg H, \qquad (3.47)$$

где V — объем ствола, дм³; H — высота дерева, м; D_h — диаметр в коре, см, на относительной высоте h.

Для объема ствола в коре $V_{вк}$ и без коры $V_{бк}$ при $h = 0; 0{,}05; 0{,}1; 0{,}2; \ldots 0{,}6; 0{,}7$ рассчитаны уравнения (3.47) и их стандартные ошибки. В интервале h от 0,1 до 0,3 у березы и от 0,2 до 0,4 у осины и сосны ошибки оказались наименьшими (рис. 13), что свидетельствует о наиболее стабильной и информативной форме ствола на этом участке. Последующий графический анализ зависимости констант a_0, a_1 и a_2 от h показал, что в интервале h, обеспечивающем наименьшую

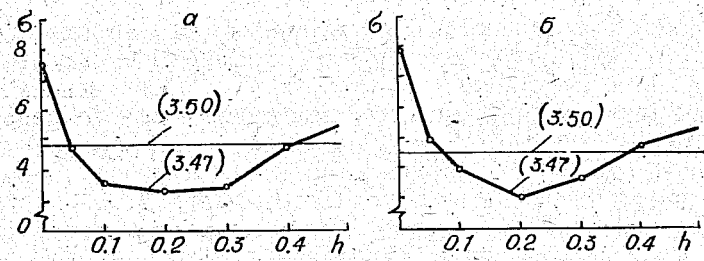


Рис. 13. Ошибка уравнений (3.47) при различных значениях относительной высоты и уравнений (3.50) при определении объема ствола березы: а — в коре, б — без коры. Цифрами на рис. 13—15 обозначены номера уравнений

ошибку, связь названных констант с h для березы и осины криволинейная, для сосны линейная и может быть выражена полиномом

$$a_i = b_0 + b_1 h + b_2 h^2. \qquad (3.48)$$

Константы уравнений (3.48) сведены в табл. 3.17.

Электронный архив УГЛТУ

Таблица 3.17

Константы уравнений (3.48)

Константы уравнений (3.47)	Ствол в коре			Ствол без коры		
	b_0	b_1	b_2	b_0	b_1	b_2
			Береза			
a_0	—1,76	2,38	—2,58	—1,92	2,39	—2,69
a_1	1,64	1,92	—4,33	1,54	2,51	—5,73
a_2	1,55	—3,14	6,34	1,71	—3,69	7,67
			Осина			
a_0	—1,28	—0,61	2,00	—1,53	—0,57	1,99
a_1	0,90	0,82	—0,60	1,13	0,63	—0,51
a_2	1,86	0,59	—1,50	1,80	0,72	—1,53
			Сосна			
a_0	—1,48	0,82	—	—1,71	0,71	—
a_1	1,27	—0,94	—	1,37	—0,48	—
a_2	1,69	0,82	—	1,75	0,46	—

Подстановкой констант уравнений (3.48) в уравнение (3.47) получены математические модели для расчета объема стволов в коре и без нее:

$$\lg V = c_0 + c_1 \lg D_h + c_2 \lg H + c_3 h + c_4 h \lg D_h + c_5 h \lg H + c_6 h^2 + c_7 h^2 \lg D_h + c_8 h^2 \lg H. \quad (3.49)$$

Константы моделей (3.49) даны в табл. 3.18.

Представляет интерес проверка метода не только при определении объема ствола, но и при весовом учете фракций надземной фитомассы — хвои, ветвей и всей надземной массы дерева. Это выполнено на примере сосны путем последовательного расчета моделей (3.47) и (3.49), аппроксимирующих вместо объема ствола фитомассу фракций в абсолютно сухом состоянии. Результаты сведены в табл. 3.18.

Особенность моделей (3.49) состоит в том, что они включают значение диаметра, замеренного в «плавающей» точке на относительных высотах, соответствующих участку ствола, где сосредоточено до 60—70% его объема, и этот участок характеризуется наиболее стабильной формой. Замер диаметра

Электронный архив УГЛТУ

Таблица 3.18

Константы уравнений (3.49)

Константы	Береза		Осина		Сосна					
	объем, дм³		объем, дм³		объем, дм³		фитомасса в абсолютно сухом состоянии, г			
	$V_{вк}$	$V_{бк}$	$V_{вк}$	$V_{бк}$	$V_{вк}$	$V_{бк}$	хвоя	ветви	ствол	вся надземная фитомасса
c_0	—1,76	—1,92	—1,28	—1,53	—1,48	—1,71	0,97	0,50	1,27	1,52
c_1	1,64	1,54	1,86	1,80	1,69	1,75	2,79	2,80	1,42	1,87
c_2	1,55	1,71	0,90	1,13	1,27	1,37	—0,60	—0,11	1,26	0,69
c_3	2,38	2,39	—0,61	—0,57	0,82	0,71	1,16	1,32	0,66	0,90
c_4	1,92	2,50	0,59	0,72	0,82	0,46	0,86	1,17	0,50	0,85
c_5	—3,14	—3,69	0,82	0,63	—0,94	—0,48	—0,90	—1,36	—0,60	—0,98
c_6	—2,58	—2,69	2,00	1,99	—	—	—	—	—	—
c_7	—4,33	—5,73	—1,50	—1,53	—	—	—	—	—	—
c_8	6,34	7,67	—0,60	—0,51	—	—	—	—	—	—

на высоте груди у деревьев на начальном этапе роста либо невозможен, либо приходится на вершинную часть, где сосредоточено лишь 2—3% объема ствола и диаметр сильно варьирует. Преимущество описанного способа в сравнении с обычным замером диаметра D иллюстрируется расчетом ошибок определения объема ствола и фитомассы фракций по уравнениям, полученным по тем же 100 модельным деревьям обычным методом:

$$\lg V = a_0 + a_1 \lg D + a_2 \lg H + a_3 \lg D \lg H. \qquad (3.50)$$

Характеристика уравнений (3.50) в табл. 3.19 свидетельствует об их высокой адекватности. Все приведенные константы достоверны на уровне значимости 0,001. Сравнение ошибок уравнений видов (3.47) и (3.50) показывает (см. рис. 13), что метод Коватса дает потенциальное преимущество в точности в интервале относительных высот у березы от 0,05 до 0,4. Степень реализации этой потенции моделями (3.49) показана на рис. 14. Относительная погрешность уравнений (3.49) и (3.50) рассчитана по формуле

$$\Delta = \pm\sqrt{\Sigma[(y_i - \bar{y}_i)/\bar{y}_i]^2/n} \cdot 100\%.$$

М. Коватс (1977) использовал для расчета объема ство-

Электронный архив УГЛТУ

Таблица 3.19

Характеристика уравнений (3.50)

Показатели	Константы				Коэффициент детерминации R^2
	a_0	a_1	a_2	a_3	
Береза					
$V_{вк}$	—0,497	1,105	—	1,024	0,992
$V_{бк}$	—0,712	1,058	0,224	0,967	0,994
Осина					
$V_{вк}$	—0,870	1,153	0,660	0,633	0,996
$V_{бк}$	—1,114	1,191	0,849	0,569	0,996
Сосна					
$V_{вк}$	—0,350	1,300	—0,440	1,050	0,984
$V_{бк}$	—0,650	1,270	—0,150	1,020	0,988
Хвоя	2,710	1,970	—3,210	1,860	0,941
Ветви	2,490	2,150	—3,530	2,200	0,955
Ствол	2,130	0,960	—	1,010	0,986
Вся надземная фитомасса	2,750	1,370	—1,290	1,410	0,980

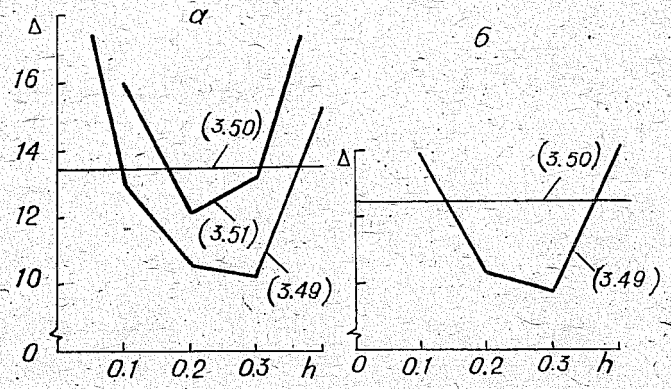


Рис. 14. Относительная погрешность уравнений (3.49), (3.50) и (3.51) для березы: а — ствол в коре, б — без коры

Электронный архив УГЛТУ

ла несколько упрощенную модель в сравнении с (3.49). У исследуемых им трех древесных пород уравнения зависимости констант a_0, a_1 и a_2 от h в (3.47) линейны, причем закономерности $a_1=f(h)$ и $a_2=\varphi(h)$ имеют взаимно погашающий эффект. В результате модель объема ствола приведена к виду

$$\lg V=c_0+c_1\lg D_h+c_2\lg H+c_3 h. \qquad (3.51)$$

Однако обработка по модели (3.51) опытных данных для березы дала худшие результаты в сравнении с (3.49) (см. рис. 14, а). При оптимальном значении $h=0{,}3$ погрешность единичного определения объема ствола составляет по модели (3.49) для березы 8%, осины 6%, сосны 9—10%, а по модели (3.50) соответственно — 11, 10 и 25%. Для масс хвои, ветвей, ствола и всей надземной погрешность по модели (3.49) равна соответственно 34, 43, 14 и 15%, а по модели (3.50) — 49, 50, 23 и 28%.

На рис. 15 показано изменение погрешности определения объема ствола по моделям (3.49) и (3.50) в зависимости от высоты дерева. Уравнения (3.50), выведенные с использованием традиционного замера диаметра ствола, обнаруживают,

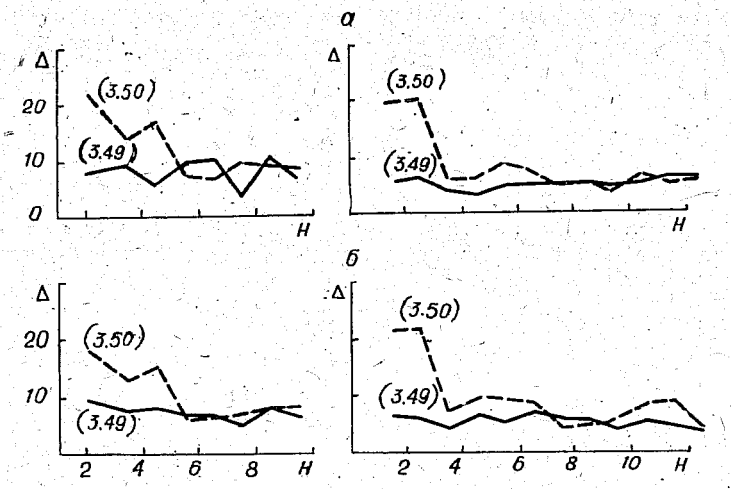


Рис. 15. Зависимость относительной погрешности определения объема ствола березы (слева) и осины (справа) по моделям (3.49) и (3.50) при $h=0{,}3$ от высоты дерева: а — ствол в коре, б — без коры

Электронный архив УГЛТУ

в отличие от уравнений (3.49), явную тенденцию увеличения погрешности по мере снижения высоты Н. У сосны при учете массы кроны модель (3.49) имеет преимущество в точности перед моделью (3.50) при высоте деревьев 5 м и ниже, а при учете объема и массы ствола — практически на всем интервале высот. У березы и осины модели (3.49) обеспечивают повышенную точность определения объема ствола при $H<6$—7 м, а при большей высоте, когда точка замера диаметра входит в рабочую зону моделей (3.49), традиционный метод определения объема ствола равноценен описанному по точности получаемых результатов.

Мы показали возможности повышения точности учета фитомассы дерева с использованием основных его морфометрических характеристик. Модели, учитывающие высоту замера диаметра ствола в качестве дополнительного фактора, дают выражение, оптимальное в отношении точности единичного определения объема ствола, при этом высота замера диаметра, обеспечивающая минимальную ошибку регрессии, совпадает с положением центра тяжести ствола (Forslund, 1982). Расчет объема ствола через величину диаметра равновеликого цилиндра, высота замера которого в зависимости от породы колеблется в интервале относительных высот (0,43—0,55)Н (Успенский, Попов, 1974), потенциально дает худшие результаты (см. рис. 14), поскольку названный интервал несколько сдвинут по отношению к оптимальному.

3.7. Эколого-ценотические закономерности в соотношениях надземной и подземной фитомассы

В предыдущих разделах главы 3 изложены основные принципы оценки надземной фитомассы деревьев и древостоев и составлены таблицы, характеризующие закономерности изменения соотношений различных фракций надземной фитомассы в связи с возрастом и эколого-ценотическими факторами. Не менее важно в исследованиях биопродуктивности древостоев выявить основные эколого-ценотические закономерности в соотношениях надземной и подземной фитомассы, в основе которых лежат так называемые корнелистовые функциональные связи, характеризующие рост и жизнедеятельность растений (Казарян, 1969). Подобные соотношения представляют существенное дополнение к моделям динамики фитомассы по основным факторам воздействия, значительно увеличивая ценность таких моделей и таблиц, и яв-

ляются важными характеристиками продуктивности местообитания и устойчивости лесных фитоценозов.

По Р. Риклефсу (1979), мерой внутренней устойчивости биологической системы служит ее способность противостоять факторам воздействия, а саму устойчивость названный автор определяет как отношение между изменчивостью в среде и изменчивостью в самой системе. Снижение некоторых характерных соотношений биомассы (прироста к общей биомассе, площади поверхности к объему и др.) Р. Риклефс рассматривает скорее как фактор повышения устойчивости ценоза, нежели эволюционной приспособленности отдельного организма. В условиях оптимума среды обитания древесные породы обладают генетически закрепленной тенденцией к определенным характерным соотношениям фитомассы, например, надземной и подземной фракций (Лир и др., 1974).

Согласно принципу лимитирующих факторов Либиха (Liebig, 1847, цит. по: П. Рачко, 1979) рост растений ограничивается фактором среды, находящимся в минимуме относительно некоторой «нормы». Известно, что изменчивость ширины годичного кольца, фиксирующей реакцию дерева на среду обитания, в значительной мере определяется циклами солнечной активности. Однако в условиях избыточного увлажнения, там, где лимитирующим фактором является недостаток кислорода в почве, цикличность прироста в большей мере объясняется гидрологическим режимом почв (Оленин, 1982). В условиях другой крайности — недостатка влаги в зоне степей — возрастает чувствительность дерева к климатическим факторам, в том числе к осадкам, выраженная в повышенной изменчивости ширины годичных колец (Риклефс, 1979).

В засушливых условиях степной зоны отмечается ранний распад сосновых культур (Миронов, 1977), одной из причин которого называют углеводное голодание как результат несоответствия между синтезом органического вещества и его расходом на усиленное дыхание. Наряду с этим в экстремальных условиях роста популяции деревьев большую роль в повышении ее устойчивости играют ценотические факторы, например густота. Накопленный к настоящему времени богатый опыт степного лесоразведения свидетельствует о повышенной устойчивости густых лесопосадок, сопровождающейся некоторым снижением их продуктивности в сравнении с редкими (Рубцов и др., 1976). К аналогичному выводу пришли в Северном Казахстане И. Е. Березюк (1959), Л. Н.

Электронный архив УГЛТУ

Грибанов (1974), З. П. Бирюкова (1974). По-видимому, следует согласиться с мнением В. В. Плотникова (1979, с. 160), что «...высокая биологическая продуктивность никогда не была основополагающей функцией растительного покрова, она всегда оставалась подчиненной и второстепенной по отношению к функции непрерывного самовоспроизводства видового состава и плотности популяций растений». Редкая посадка в степной зоне провоцирует интенсивный рост кроны, в частности, ассимиляционного аппарата. Периодические засухи вызывают отмирание до 99% тонких корней в верхнем метровом слое почвы (Воронков, Невзоров, 1981). Образовавшаяся диспропорция между надземной и подземной фитомассами восстанавливается путем отмирания верхней части кроны, куда в первую очередь прекращается приток влаги, с последующей деградацией древостоя (Березюк, 1959). В 20-летних естественных сосняках на дерново-боровых почвах Кустанайской области встречается густота до 300 тыс. экз./га ($Z=10$). В таких биогруппах, формирующихся в условиях интенсивного естественного отбора, деревья сильно дифференцированы по росту и выработали «иммунитет» против отрицательного воздействия фактора повышенной густоты (Плотников, 1979) и неблагоприятных погодных условий. Вследствие этого в этих условиях отсутствуют энтомовредители, в частности подкорный клоп, в то время как в прилегающих редких биогруппах естественных сосновых молодняков и в культурах сосны численность подкорного клопа достигает 100—340 шт. на круговую 10-сантиметровую палетку в зоне, оптимальной для заселения.

Задача создания устойчивых лесных фитоценозов в лесостепной и степной зонах требует выявления условий формирования различных фракций дерева и древостоя в наиболее благоприятных соотношениях. Цель такой работы состоит в оптимизации структуры ценоза, в первую очередь, в аспекте его устойчивости, поскольку в экстремальных условиях среды, как уже говорилось, критерии устойчивости и продуктивности далеко не идентичны, возможно, даже находятся в некотором противоречии.

Наши исследования соотношений надземной и подземной, ассимилирующей и структурной фракций деревьев проведены в нетронутых рубками сосняках Семиозерного и Басаманского лесхозов (Аман-Карагайский бор) Кустанайской области. На темно-каштановых супесчаных почвах, подстилаемых суглинками и глинами, в культурах сосны 10—30-лет-

Электронный архив УГЛТУ

него возраста Ia—III классов бонитета с относительной густотой 0,1—0,8 (N=2,5—10 тыс. экз./га) заложено 12 пробных площадей со 110 модельными деревьями. На дерново-боровых песчаных почвах, подстилаемых суглинками, в сосняках естественного и искусственного происхождения 20—40-летнего возраста III—Va классов бонитета с относительной густотой 0,2—6,0 (N=5—56 тыс. экз./га) подобрано 6 пробных площадей с 60 модельными деревьями. Относительная густота древостоев Z определена как отношение фактического числа стволов на 1 га при известных возрасте и классе бонитета к табличному. Табличная густота N (в экз./га) рассчитана по уравнению

$$\lg N = 10{,}7802 - 4{,}4820 \lg A + 0{,}7460 \lg^2 A - 1{,}1382 \lg H_{100} - 0{,}2191 \lg^2 H_{100}; \quad (3.52)$$

$$R^2 = 0{,}999,$$

представляющему аппроксимацию данных хода роста сомкнутых сосновых древостоев Кустанайской области (Макаренко, 1980). В уравнении (3.52) H_{100} — средняя высота древостоя в 100-летнем возрасте по бонитетной шкале М. М. Орлова, для классов бонитета Ia, I, II, III, IV, V и Va равная, соответственно, 33; 28,5; 25; 21,5; 17,5; 14 и 10,5 м.

Проанализированы следующие отношения фракций фитомассы в абсолютно сухом состоянии:

$ОФ_1 = P_{хв}/P_{корн}$ — массы хвои к массе корней;

$ОФ_2 = (P_{хв} + P_{вет} + P_{ств})/P_{корн}$ — надземной фитомассы к массе корней;

$ОФ_3 = P_{хв}/(P_{вет} + P_{ств} + P_{корн})$ — массы хвои ко всей неассимилирующей массе;

$ОФ_4 = P_{хв}/(P_{вет} + P_{ств})$ — массы хвои к надземной неассимилирующей массе;

$ОФ_5 = P_{хв}100\%/(P_{хв} + P_{вет} + P_{ств} + P_{корн})$ — доля хвои в общей фитомассе дерева, %.

Методом множественного регрессионного анализа опытные значения ОФ аппроксимированы по возрасту, ценотическим факторам R_d и Z и классу бонитета H_{100} моделью аддитивного вида в двух вариантах: с предварительным логарифмированием зависимых и независимых переменных

$$\lg(ОФ_i) = a_0 + a_1 \lg R_d + a_2 \lg^2 R_d + a_3 \lg Z + a_4 \lg H_{100} + a_5 \lg A + a_6 \lg Z \lg H_{100} + a_7 \lg^2 R_d \lg A + a_8 \lg R_d \lg A \quad (3.53)$$

и без логарифмирования

$$ОФ_i = a_0 + a_1 R_d + a_2 R_d^2 + a_3 Z + a_4 H_{100} + a_5 A +$$

Электронный архив УГЛТУ

$$+a_6ZH_{100}+a_7R_dA, \quad (3.54)$$

где R_d — ранг толщины дерева в древостое. Величина Z характеризует среднее пространство роста дерева, выраженное относительным показателем. В пределах древостоя оно дифференцировано подеревно в зависимости от ценотического положения дерева, определяемого его рангом R_d. При просчете по всей совокупности факторов модель (3.53) дала коэффициенты детерминации 0,854; 0,897; 0,824; 0,748; 0,824, а модель (3.54) — 0,828; 0,764; 0,608; 0,612; 0,850 соответственно, т. е. по всем отношениям фитомассы, за исключением $ОФ_5$, модель (3.53) оказалась предпочтительнее.

В табл. 3.20 приведены константы моделей (3.53), значимые на уровне 0,05. Факторы, включенные в модель, объясняют от 81 до 90% изменчивости соотношений фитомассы сосны на дерново-боровых песчаных почвах и от 71 до 77% — на темно-каштановых почвах на суглинках. Степень адекватности моделей (3.53) экспериментальным данным различается не только по эдафическим условиям, но и по виду соотношения фракций ОФ. Прослеживается определенная связь степени адекватности моделей (3.53) со степенью взаимной корреляции делимого и делителя в соотношениях ОФ. Парный корреляционный анализ показателей фитомассы, входящих в состав делимого и делителя, показал наличие коэффициентов корреляции: между массой хвои и корней деревьев $R=0{,}666$; всей надземной фитомассой и массой корней $R=0{,}756$; массой хвои и всей структурной массой $R=0{,}907$; массой хвои и структурной надземной фитомассой $R=0{,}951$. Найденные взаимосвязи согласуются с выводами Е. Мельцера (Melzer, 1962), установившего, что корреляция масс хвои и корней ели одинакова с корреляцией масс ветвей и корней ($R=0{,}89$), но ниже корреляции масс хвои и ветвей ($R=0{,}95$). Таким образом, наименее выражена взаимная обусловленность масс хвои и корней и наиболее — масс хвои и надземной структурной части. Коэффициенты множественной корреляции моделей (3.53) и парной корреляции между показателями фитомассы, входящими в состав делимого и делителя в отношениях ОФ, находятся в обратно пропорциональной связи, которая характеризуется коэффициентами корреляции от —0,5 до —0,8. Видимо, чем ниже парная связь между показателями массы фракций, тем в большей мере отношения этих показателей определяются эколого-ценотическими, онтогенетическими и другими характеристиками деревьев.

Таблица 3.20

Характеристика уравнений (3.53)

Отношения фракций	Константы уравнений при факторах воздействия (числитель) и значимость их по Стьюденту (знаменатель)									Ошибка уравнения σ	Коэффициенты множественной корреляции R (числитель) и детерминации R^2 (знаменатель)
	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	a_8		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Дерново-боровые песчаные почвы, подстилаемые суглинками											
$ОФ_1$	0,5318	$\frac{-1,4500}{2,6}$	$\frac{0,8345}{4,1}$	$\frac{-0,5747}{4,5}$	—	$\frac{-1,1473}{2,9}$	—	—	—	0,260	$\frac{0,917}{0,841}$
$ОФ_2$	—2,8650	$\frac{-0,6362}{1,92}$	$\frac{0,5945}{4,9}$	$\frac{-4,8372}{6,7}$	—	$\frac{1,5161}{5,8}$	$\frac{3,3801}{5,9}$	—	—	0,154	$\frac{0,947}{0,897}$
$ОФ_3$	—1,2503	$\frac{4,2400}{2,5}$	$\frac{-1,7202}{1,96}$	$\frac{-0,3865}{3,2}$	—	—	—	$\frac{1,6096}{2,8}$	$\frac{-3,7185}{3,5}$	0,252	$\frac{0,899}{0,808}$
$ОФ_4$	8,3323	$\frac{-1,0699}{2,8}$	—	—	$\frac{-2,5757}{3,9}$	$\frac{-3,6497}{9,8}$	—	$\frac{0,2251}{2,3}$	—	0,237	$\frac{0,864}{0,746}$
$ОФ_5$	4,1477	$\frac{-0,8365}{2,2}$	—	$\frac{-0,3515}{3,1}$	—	$\frac{-2,5176}{5,6}$	—	$\frac{0,3481}{3,7}$	—	0,231	$\frac{0,903}{0,815}$

Электронный архив УГЛТУ

Продолжение табл. 3.20

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Темно-каштановые (зональные) супесчаные почвы, подстилаемые суглинками											
$ОФ_1$	—1,9028	—	—1,2585 / 6,3	—10,4446 / 7,1	—	—	6,4009 / 6,0	1,1396 / 7,6	—	0,245	0,875 / 0,766
$ОФ_2$	—6,9790	—	0,2166 / 11,4	—9,3624 / 7,7	—	4,6898 / 10,1	5,8509 / 6,6	—	—	0,202	0,845 / 0,714
$ОФ_3$	3,8645	—3,7907 / 2,6	0,2984 / 3,4	—3,6711 / 3,7	—	—4,0031 / 1,95	2,1114 / 2,9	—	2,5091 / 2,4	0,163	0,863 / 0,745
$ОФ_4$	—2,2532	—	—	—4,7603 / 2,6	1,2707 / 1,98	—0,6822 / 1,98	2,9712 / 2,3	0,0642 / 6,2	—	0,146	0,848 / 0,719
$ОФ_5$	0,1501	—	—	—3,3303 / 3,7	—	—	1,8933 / 2,8	0,1182 / 10,7	—	0,160	0,856 / 0,733

Электронный архив УГЛТУ

Исследованиями Н. В. Оськиной (1982) в сосняках IV класса возраста Московской области установлено увеличение отношения надземной фитомассы к подземной по мере улучшения лесорастительных условий. Анализ констант моделей (3.53) в табл. 3.20 это подтверждает: константы a_6 для $ОФ_2$ имеют положительный знак. На темно-каштановых супесчаных почвах, подстилаемых суглинками, названная закономерность имеет место для всех соотношений ОФ, а на дерново-боровых песчаных единой закономерности не прослеживается.

Поскольку сосняки на дерново-боровых песчаных почвах представлены III—Va, а на темно-каштановых супесчаных на суглинках — Ia—III классами бонитета, интересен анализ соотношений ОФ (рис. 16, 17, 18) в зависимости от

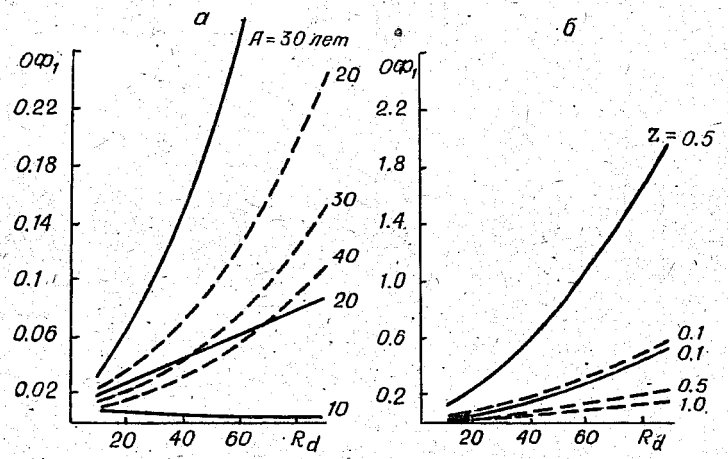


Рис. 16. Зависимость $ОФ_1$ от ранга дерева, а также: а — от возраста при Z=1, б — от относительной густоты при A=30 лет; сплошные линии — темно-каштановые почвы на суглинках; пунктирные — дерново-боровые (то же на рис. 17)

ранга дерева, густоты и возраста древостоев в равноценных по лесорастительному эффекту эдафических условиях, характеризуемых для обеих групп сосняков одним классом бонитета. С этой целью модели (3.53) приведены к частному случаю при $H_{100}=21{,}5$ м, что соответствует III классу бонитета. Графическая интерпретация полученных частных моделей

Электронный архив УГЛТУ

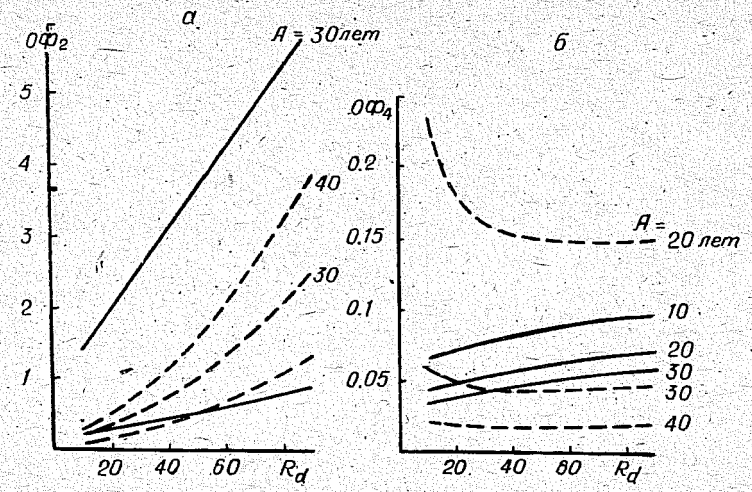


Рис. 17. Зависимость $ОФ_2$ (а) и $ОФ_4$ (б) от ранга дерева и возраста

для $ОФ_1$ и $ОФ_2$ свидетельствует об увеличении названных соотношений с возрастанием толщины дерева в пределах древостоя, т. е. доля корней по отношению к массе хвои и ко всей надземной фитомассе наибольшая у угнетенных деревьев и наименьшая — у доминирующих.

П. Крамер и Т. Козловский (1963) показали, что отношение надземной фитомассы к подземной с возрастом увеличивается. Регрессионные модели (3.53) для $ОФ_2$ подтверждают их вывод: при фиксированных ранге дерева, классе бонитета и густоте $Z=1$ (см. рис. 17, а) $ОФ_2$ с возрастом повышается как на дерново-боровых песчаных, так и на темно-каштановых почвах, подстилаемых суглинками. При тех же условиях отношение масс хвои и корней изменяется неоднозначно: на дерново-боровых почвах $ОФ_1$ снижается, а на темно-каштановых возрастает (см. рис. 16, а). Это объясняется тем, что в массе корневой системы с возрастом увеличивается доля скелетных корней, и при отнесении массы хвои к массе только тонких (всасывающих) корней динамика этого показателя, возможно, была бы нарастающей, как и для $ОФ_2$. Наряду с этим диспропорция между надземной и подземной фитомассами на темно-каштановых почвах в сравнении с

Электронный архив УГЛТУ

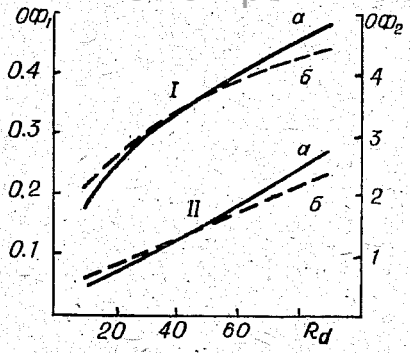


Рис. 18. Зависимость $ОФ_1$ (а) и $ОФ_2$ (б) от ранга дерева на темно-каштановых почвах, подстилаемых: I — глинами, II — суглинками

дерново-боровыми увеличивается с возрастом до такой степени, что нарастание массы корневой системы опережается увеличением не только всей надземной фитомассы, как это наблюдается на дерново-боровых почвах, но даже одной хвои (см. рис. 16, а). С возрастом у сосняков на темно-каштановых почвах на суглинках повышается отношение надземной фитомассы к подземной. Если в 20-летнем возрасте это отношение у дерева ранга 50 на тех и других почвах одинаково и равно 0,55 (см. рис. 17, а), то в 30-летнем возрасте у дерева того же ранга на темно-каштановых почвах оно почти в четыре раза выше, чем на дерново-боровых (3,8 против 1,0). Отношение массы хвои к массе корней в 20-летнем возрасте на темно-каштановых почвах и на дерново-боровых песчаных (см. рис. 16, а) при тех же прочих условиях равны, соответственно, 0,055 и 0,096 (меньше почти вдвое), а в 30-летнем — 0,21 и 0,06 (больше в 3,5 раза).

Большинство соотношений $ОФ_i$ в моделях (3.53) имеет отрицательную связь с густотой древостоя (константы a_3 в табл. 3.20 — со знаком минус). Графическая интерпретация названной закономерности (см. рис. 16, б) для 30-летней сосны III класса бонитета показывает, что на дерново-боровых песчаных почвах при прочих равных условиях изменение относительной густоты с 0,1 (N=0,76 тыс. экз./га) до 1,0 (N=7,6 тыс. экз./га) сказывается на соотношении $ОФ_1$ в меньшей мере, чем на темно-каштановых почвах на суглинках в более узком интервале густот — с 0,5 (N=3,8 тыс. экз./га) до 1,0 (N=7,6 тыс. экз./га). Аналогичные закономер-

Электронный архив УГЛТУ
ности свойственны соотношению $ОФ_2$. Таким образом, отношение надземной фитомассы сосны к подземной на темно-каштановых супесчаных подстилаемых суглинками почвах имеет более выраженную тенденцию увеличения с возрастом, нежели на дерново-боровых песчаных почвах, и эта тенденция усугубляется при снижении густоты древостоя на фоне фиксированного возраста и класса бонитета.

По-видимому, с целью обеспечения благоприятных соотношений надземной и подземной фитомасс культуры на темно-каштановых почвах необходимо создавать более густые, чем на дерново-боровых. Однако в естественных древостоях наблюдается обратное. Как показало рекогносцировочное сравнительное обследование, выполненное нами в Аман-Карагайском бору Кустанайской области, естественные сосняки на темно-каштановых почвах формируются при значительно меньшей густоте, чем на дерново-боровых. Первые обладают сильно развитым напочвенным покровом с мозаичным характером задернения, что обеспечивает в благоприятные по увлажнению и плодоношению годы появление самосева, но не сплошь, как это обычно бывает на дерново-боровых песчаных почвах, а локально, в просветах дернины. В процессе формирования молодняка наличие развитого гумусового горизонта темно-каштановых почв при одинаковых условиях увлажнения (уровне грунтовых вод) провоцирует формирование более выраженной поверхностной корневой системы в сравнении с сосной на дерново-боровых почвах. При этом площадь роста дерева, определенная по границе распространения корневой системы, значительно выходит за пределы проекции кроны. В процессе формирования такого древостоя конкурентные отношения (и обусловленная ими дифференциация деревьев) развиваются в ризосфере еще до смыкания крон. Вследствие этого естественное изреживание на темно-каштановых почвах происходит более интенсивно, чем на дерново-боровых, где сосна формирует обычно стержневой корень и обходится меньшей площадью роста. В свою очередь, более низкая густота обусловливает развитие под пологом насаждения мощного травяного покрова из злаков — характерных представителей степной флоры, более, чем сосна, приспособленных к жесткому и неустойчивому режиму влагообеспечения. К тому же злаки являются серьезным конкурентом древесных пород в борьбе за питание и влагу. По-видимому, на темно-каштановых почвах в степи сосновые древостои при прочих равных условиях потенциально обла-

Электронный архив УГПТУ
дают меньшей устойчивостью к неблагоприятным факторам среды, чем на дерново-боровых песчаных.

В нашем примере насаждения на темно-каштановых почвах представлены исключительно культурами, а на дерново-боровых песчаных — как культурами, так и естественными сосняками. Поэтому выводы, касающиеся сравнительного анализа сосняков на тех и других почвах, нельзя в полной мере перенести на сравнение естественных сосняков и культур, поскольку последние создаются при значительно меньшей густоте и на различных почвах. Сравнение соотношений фитомассы как критериев устойчивости культур и естественных сосняков без учета эколого-ценотических факторов нельзя считать правомерным. Такое сравнение возможно лишь на однородных фонах эколого-ценотических условий.

На рис. 18 дано сравнение соотношений надземной и подземной фитомассы сосны в 22-летних сосняках I класса бонитета с густотой $Z=0,5$ ($N=5,2$ тыс. экз./га) на темно-каштановых почвах, но подстилаемых в первом случае терскескими глинами без признаков засоления, а во втором — суглинками. Первый вариант представлен одной пробной площадью с 10 модельными деревьями, не включенной в расчет моделей (3.53), на которой зависимости ОФ от ранга дерева выражены уравнениями: $\lg(ОФ_1)=-1,1818+0,4442\lg R_d$; $\lg(ОФ_2)=-0,0111+0,3376\lg R_d$ при $R^2=0,912-0,939$. Числовые данные по второму варианту получены табулированием соответствующих моделей (3.53) по вышеназванным значениям трех факторов. Сравнение показывает, что при абсолютно идентичных возрасте, густоте, продуктивности по надземной массе и типе почв соотношения надземной и подземной фитомасс сосны значительно различаются в зависимости от литологии грунта. При подстилании почвы глинами, обладающими высокой водоудерживающей способностью, корневые системы вследствие капиллярного подъема влаги и повышенной плотности грунта развиваются слабее, нежели при подстилании суглинками. В последнем случае достижение уровня капиллярной каймы возможно лишь при наличии развитой корневой системы. По-видимому, темно-каштановые почвы, подстилаемые глинами, при резком ухудшении общего влагообеспечения в периоды засух таят бо́льшую опасность для культур, нежели те же почвы, подстилаемые суглинками.

Модели (3.53) позволяют сделать вывод о существенном различии соотношений надземных фракций фитомассы, в ча-

Электронный архив УГЛТУ

стности, отношения массы хвои к массе ветвей и ствола (см. рис. 17, б). При фиксированных эколого-ценотических условиях (класс бонитета III, густота $Z=1$) с возрастом названные соотношения снижаются — в меньшей мере на темно-каштановых почвах и гораздо интенсивнее — на дерново-боровых вследствие низких абсолютных запасов хвои в последнем случае. Различается характер изменения названного соотношения и по рангам деревьев: на дерново-боровых песчаных почвах наибольшие соотношения характерны для угнетенных деревьев, на темно-каштановых — для доминирующих.

Увеличение доли хвои в общей и надземной фитомассах дерева ($ОФ_3$, $ОФ_4$, $ОФ_5$) с уменьшением густоты древостоя согласуется с выводами В. И. Рубцова с соавт. (1976) и свидетельствует о более благоприятном соотношении ассимилирующих и неассимилирующих, надземных и подземных органов в густых древостоях.

Таким образом, сосна обладает наиболее благоприятными соотношениями надземной и подземной фитомасс при прочих равных условиях (густоте, классе бонитета, возрасте) на дерново-боровых песчаных почвах и наихудшими — на темно-каштановых, подстилаемых глинами, а при одинаковых почвенно-грунтовых условиях, возрасте и классе бонитета эти соотношения благоприятнее в древостоях большей густоты. На темно-каштановых супесчаных почвах, подстилаемых суглинками, соотношение надземной и подземной фитомасс у сосны одного возраста, класса бонитета и густоты более благоприятное, нежели при подстилании этих почв глинами. Специфика темно-каштановых почв при прочих равных условиях потенциально обуславливает более низкую устойчивость насаждений к неблагоприятным факторам среды в сравнении с дерново-боровыми песчаными почвами.

Полученные выводы имеют предварительный характер, поскольку не анализируется влияние уровня грунтовых вод, архитектоника корней, не учитывается перераспределение последних по горизонтам и по степени ориентации (горизонтальная, вертикальная) в связи с густотой древостоя, показанное для сосны и дуба М. И. Калининым (1981), не учтена также доля тонких корней, в значительной мере характеризующая устойчивость дерева и ценоза (Воронков, Невзоров, 1981).

Итак, в главе 3 изложены принципы оценки фитомассы древостоев на основе многомерного подхода, составлены ре-

Электронный архив УГЛТУ

грессионные модели и предложены таблицы для учета фракций надземной фитомассы. Даны основы моделирования качественных показателей фитомассы, составляющего неотъемлемую часть исследования и прогнозирования биопродуктивности древостоев. Изложен принцип выявления наиболее информативного диапазона воздействия того или иного фактора на динамику и структуру фитомассы дерева и, наконец, показаны возможности многомерного подхода к исследованию соотношений надземной и подземной фитомасс, ассимилирующих и структурных органов. Эти соотношения представляют существенное дополнение к моделям динамики и структуры надземной фитомассы и являются морфометрическими признаками для диагностики устойчивости лесного фитоценоза.

Дальнейшее совершенствование моделей биопродуктивности древостоев возможно в направлении исследования ее в увязке с пространственной структурой последних, о чем пойдет речь в следующей главе.

Глава 4. БИОПРОДУКТИВНОСТЬ И ПРОСТРАНСТВЕННАЯ СТРУКТУРА ДРЕВОСТОЕВ

4.1. Элементы динамики горизонтальной структуры древостоев

Мозаичность пространственной структуры свойственна всем лесным фитоценозам, включая искусственные (Дылис и др., 1964; Смирнов, 1969; Макаренко, 1974; Внучков, 1976; Плотников, 1979; Проскуряков, 1983). Древостой состоит из биогрупп (сравнительно однородных совокупностей территориально сближенных деревьев), представляющих элементарные структурные единицы древостоя (Макаренко, 1974; Кузьмичев и др., 1979; Проскуряков, 1983). Исследования морфологии леса, имеющие обычно прикладной лесотаксационный характер, осуществляются главным образом на уровне древостоя элемента леса (Дыренков, 1977) с получением усредненных характеристик распределения деревьев по морфологическим признакам. При разработке методов регулирования продуктивности и устойчивости лесных фитоценозов к действию лимитирующих факторов среды повышается роль анализа структуры и динамики древостоя на уровне биогруппы как элементарной структурной единицы. Особенно ощущается потребность такого анализа в двух перспектив-

Электронный архив УГЛТУ

ных и интенсивно развиваемых ныне направлениях, означающих качественно новый этап лесоводственных исследований, — в динамическом имитационном моделировании продуктивности древостоя на уровне дерева (Schneider, Kreysa, 1981) и дешифровке данных аэрокосмического зондирования морфоструктуры лесов (Кузьмичев и др., 1979). При этом необходима детализированная базовая информация о строении и динамике фитоценозов по биогруппам, предоставляющая возможность, во-первых, математической автоматизированной обработки и интерпретации данных дистанционного зондирования лесов и, во-вторых, адекватного отражения условий роста и конкурентных отношений деревьев, чего не дают усредненные данные по древостою в целом (Макаренко, 1974). В разделе дается сравнительный анализ динамики морфоструктуры березняков порослевого и семенного происхождения на уровне биогрупп с привлечением многомерного подхода.

4.1.1. Методические вопросы исследования. В колочных лесах береза — основная лесообразующая порода, ее доля в лесопокрытой площади превышает 50%. В свежих березняках на черноземных почвах подобраны сравнительно однородные непрореженные древостои естественного происхождения в Боровском и Аракарагайском лесхозах Кустанайской области и заложены 21 пробная площадь в порослевых и 13 — в семенных березняках в возрасте от 5 до 50 лет. Их принадлежность к естественным рядам развития установлена сравнением объемного прироста деревьев высших рангов (Усольцев, 1978, 1979). Порослевые березняки характеризуются средним числом порослевых гнезд на 1 га 1670 ± 173, классом бонитета II—III. По мере смыкания порослевых гнезд полнота возрастает от 0,2 в 5-летнем возрасте до 1,0 в 50-летнем. Полнота семенных — близкая к 1,0, класс бонитета I—II. Размер пробных площадей — от 0,01 до 0,2 га с числом деревьев от 130 до 460. Пробные площади разбиты на квадраты размером $1{,}5 \times 1{,}5$ м в возрасте насаждения 5—10 лет и 3×3 м в старших возрастах. Занумерованы и нанесены на план все деревья, у каждого измерены высота, диаметр на высоте груди в двух направлениях, радиус кроны в четырех направлениях. Всего таким образом учтено 5300 деревьев в порослевых и 3050 — в семенных березняках и выделено, соответственно, 360 и 280 биогрупп.

Расчленение древостоев на биогруппы выполнено визу-

ально по принципу обособления участков со сплошной горизонтальной проекцией полога. В этом аспекте порослевые древостои специфичны, так как их структура в значительной мере определяется структурой материнского древостоя, возобновительной способностью пней, зависящей от сезона и возраста рубки (Шандер, 1970), и числом порослевых генераций (Кузьмичев, 1963). Последний фактор учесть в полной мере в настоящей работе не представляется возможным, и предполагается, что число порослевых генераций исследуемых березняков не превышает двух. С увеличением возраста рубки число пней, дающих поросль, снижается до 56—75% (Шандер, 1970), однако на наших объектах выпад невозобновившихся пней незначительный — 1—2%.

При гнездовом расположении поросли, казалось бы, можно применить простой принцип выделения биогрупп по числу пней, давших поросль, и анализ морфоструктуры проводить на уровне порослевых гнезд. Пример такого анализа, характеризующий распределение числа порослевых гнезд березы по числу стволов в них в возрастной динамике, дан в табл. 4.1. Данные картирования показали, однако, что та-

Таблица 4.1

Возрастная динамика распределения числа порослевых гнезд на 1 га по числу стволов в них

Возраст, лет	Число порослевых гнезд, %, при числе стволов в гнезде														Средневзвешенное число стволов в гнезде, экз.
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
5	19	16	14	11	9	7	6	4	3	3	2	2	2	2	4,55
10	20	18	15	12	10	8	6	4	3	2	1	1	—	—	3,91
15	24	20	16	12	10	7	5	3	2	1	—	—	—	—	3,39
20	29	22	17	13	9	5	3	2	—	—	—	—	—	—	2,88
25	38	24	16	11	7	3	1	—	—	—	—	—	—	—	2,38
30	47	26	15	8	4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1,96
35	54	28	14	3	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1,63
40	58	29	11	2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1,57
50	60	30	9	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1,51

кой подход не совсем правомерен, поскольку материнский древостой обычно также представлен совокупностью биогрупп различной величины и плотности, и это с первых лет

определяет различие в условиях формирования территориально сближенных и разобщенных порослевых гнезд. Фактическое число биогрупп, выделяемых в натуре по вышеупомянутому принципу, в молодняках существенно ниже, чем число порослевых гнезд в том же возрасте (см. табл. 4.1), вследствие того, что деревья материнского древостоя и, следовательно, порослевые гнезда последующей генерации объединены в биогруппы.

4.1.2. Распределение числа биогрупп по различным морфометрическим признакам. Данные о характере распределения числа биогрупп по различным признакам в литературе очень редки (Макаренко, 1974; Внучков, 1976) и имеют предварительный характер. В нашей работе биогруппы систематизированы в семенных березняках по шести и в порослевых по восьми возрастным ступеням, в пределах которых выделены ступени густоты материнского древостоя $N_м$ (в тыс. экз.). По каждой ступени составлены ряды распределения числа биогрупп по 10 классам в пределах размаха варьирования признака, обработанные затем на ЭВМ. В колонках 3—6 (табл. 4.2) даны характеристики для среднеарифметических значений признаков. Полученные статистики распределений аппроксимированы по возрасту A (фактор $N_м$ оказался недостоверным на уровне 0,05) логарифмическим полиномом, возможности которого при описании некоторых динамических процессов были показаны в разделе 1.2:

$$\lg y = a_0 + a_1 \lg A + a_2 \lg^2 A. \qquad (4.1)$$

Для признаков, имеющих монотонный характер увеличения или снижения статистик распределения с возрастом, рассчитаны только константы a_0 и a_1, а для имеющих в возрастной динамике точку перегиба — все три константы. Наиболее тесно связаны с возрастом первые моменты распределения $\bar{X}$, несколько слабее — вторые σ, а для третьего r_3 и четвертого r_4 моментов и для ранга среднего $R_{\bar{x}}$ константы, как правило, недостоверны на уровне 0,05. Тем самым подтверждается известная закономерность снижения детерминации уравнений, аппроксимирующих динамику моментов распределения числа деревьев в древостоях, по мере увеличения порядкового номера момента (Кузьмичев, 1977). Имея в виду получить предварительную и, по существу, первую характеристику распределения числа биогрупп по различным признакам, в табл. 4.2 приводим средние по всем возрастам значения

Электронный архив УГЛТУ

Характеристика распределений числа биогрупп по различным

Статистики распределений	Характеристики уравнений (4.1)	Морфометрические: высота $H_{бг}$, м	диаметр ствола $D_{бг}$, см	площадь сечения ствола g, $см^2$	диаметр кроны $D_{бг}^{кр}$, м
1	2	3	4	5	6
					Порослевые
	a_0	—0,160	—0,536	—1,001	—0,345
$\overline{X}$	a_1	0,772	0,989	1,929	0,476
	a_2	—	—	—	—
	R^2	0,945	0,955	0,958	0,767
	a_0	—0,872	—0,900	—1,084	—1,229
$\overline{\sigma}$	a_1	0,664	0,739	1,654	0,486
	a_2	—	—	—	—
	R^2	0,774	0,632	0,821	0,386
r_3	—	—0,12±0,5	0,11±0,7	0,48±0,9	0,46±0,5
r_4	—	2,99±1,2	3,20±1,2	3,61±1,8	2,93±0,7
C_v	—	14,7±2,9	22,6±7,2	41,2±16,4	14,0±4,4
$\overline{R_x}$	—	49,2±3,4	50,8±5,0	53,2±6,2	53,0±3,3
					Семенные
	a_0	—0,138	—0,813	—1,440	—0,577
$\overline{X}$	a_1	0,802	1,167	2,195	0,587
	a_2	—	—	—	—
	R^2	0,908	0,962	0,937	0,951
	a_0	—0,838	—1,257	—1,703	—1,345
$\overline{\sigma}$	a_1	0,587	0,895	1,968	0,498
	a_2	—	—	—	—
	R^2	0,771	0,974	0,986	0,466
r_3	—	—0,33±0,3	0,32±0,3	0,49±0,2	0,09±0,4
r_4	—	2,69±0,8	2,49±0,6	2,55±0,7	2,35±0,3
C_v	—	10,4±2,6	15,5±3,6	27,3±7,2	13,3±3,7
$\overline{R_x}$	—	47,8±2,4	52,1±2,2	53,3±1,7	50,6±3,0

Электронный архив УГЛТУ

Таблица 4.2

морфометрическим признакам (без одиночных деревьев)

признаки					
площадь проекции кроны $g_{кр}$, м²	густота биогруппы N, тыс. экз./га	сумма площадей сечения G, м²/га	площадь биогруппы, F, м²	сомкнутость крон в биогруппе $C_{кб}$	число деревьев в биогруппе $n_д$
7	8	9	10	11	12
древостои					
—0,748	1,106	0,145	—0,590	—0,948	0,667
0,955	0,682	0,801	1,924	2,066	0,875
—	—0,733	—	—0,316	—0,896	—0,412
0,792	0,941	0,857	0,691	0,933	0,517
—1,287	0,902	—0,088	—0,506	—1,258	0,579
0,937	0,197	0,548	1,466	1,761	0,901
—	—0,546	—	—0,122	—0,937	—0,460
0,572	0,861	0,716	0,638	0,738	0,442
0,75±0,5	0,76±0,8	0,20±0,5	1,05±0,6	0,37±0,3	1,17±0,7
3,29±0,9	3,86±2,4	2,78±0,8	3,69±1,6	2,47±0,6	3,98±2,3
28,8±9,2	32,4±9,4	29,4±5,7	67,4±12,1	18,8±5,3	72,5±13,8
55,0±3,2	55,0±5,3	51,3±3,4	57,0±3,8	52,5±2,3	57,8±4,5
древостои					
—1,167	1,974	0,486	0,319	—0,507	1,072
1,139	—1,138	0,609	0,704	1,415	0,960
—	—0,508	—	—	—0,648	—0,703
0,951	0,956	0,867	0,646	0,970	0,588
—1,679	1,372	0,332	0,557	—0,912	1,016
1,085	—0,244	0,238	0,358	1,060	1,044
—	—0,433	—	—	—0,603	—0,831
0,845	0,812	0,360	0,364	0,706	0,610
0,30±0,4	0,32±0,3	—0,11±0,3	0,78±0,4	0,49±0,2	0,94±0,5
2,58±0,3	2,55±0,6	2,34±0,2	2,75±0,9	2,63±0,3	2,96±1,3
26,6±6,3	26,9±10,2	22,5±7,6	62,9±16,6	16,5±6,6	66,1±15,6
52,0±2,8	52,1±1,8	49,2±2,3	55,2±2,8	53,2±1,5	56,2±3,5

r_3, r_4, R_x и их стандартные отклонения. Коэффициент вариации C_v признаков биогрупп с возрастом снижается, что согласуется с данными, полученными ранее для сосняков (Внучков, 1976). Коэффициент корреляции величины C_v с возрастом по большинству признаков в порослевых березняках (от —0,6 до —0,8) выше, чем в семенных (от —0,1 до —0,7). Варьирование всех признаков в порослевых березняках также выше.

Проверка нормальности распределений признаков по соответствующим критериям показала, что нулевая гипотеза во всех возрастных ступенях принимается для распределений по высоте и сумме площадей сечения и отвергается для таковых по числу стволов и площади биогруппы. По остальным признакам в семенных березняках подтверждается нулевая гипотеза с единичными отклонениями в сторону левой асимметрии, а для порослевых характерна левая асимметрия с единичными случаями нормального распределения. Определенного возрастного тренда не обнаружено. Проверка по критерию $\varkappa$ показала, что распределения признаков в табл. 4.2 могут быть описаны кривой типа I Пирсона.

4.1.3. Динамика морфометрических признаков биогрупп. В процессе формирования древостоя происходит пространственно-временно́е перераспределение биогрупп. Их динамика определяется двумя процессами: естественным изреживанием и распадом; слиянием вследствие ограниченного пространства роста. В сосняках до определенного возраста [по Н. Т. Смирнову (1969) — это жердняк, по В. Т. Внучкову (1976) — средневозрастный сосняк] процесс естественного отпада стволов перекрывается более интенсивным слиянием биогрупп, в результате чего нарастает их площадь, в дальнейшем преобладает процесс естественного изреживания, который сопровождается снижением средней площади биогруппы. В исследуемых березняках площадь биогруппы на протяжении первых пяти классов возраста увеличивается.

Несмотря на использование визуального принципа выделения биогрупп, попытка объяснить изменчивость их площади посредством основных определяющих факторов: числа деревьев в биогруппе, возраста, средних диаметра и высоты деревьев — оказалась успешной. Использованы две аппроксимирующие функции: линейная аддитивного вида и степенная мультипликативного вида, приведенная путем логарифмирования к линейной. Ни та, ни другая не обнаружили явного

Электронный архив УГЛТУ

преимущества по показателю детерминации (R^2=0,925—0,974), однако вторая отличается большей компактностью, обусловленной меньшим числом синергизмов вследствие линеаризации связей, и ей оказано предпочтение. Получены закономерности, выражаемые уравнениями: для порослевых березняков

$$\lg F = 0{,}2243 - 0{,}4083 \lg A - 1{,}3569 \lg D_{бг} + 1{,}3581 \lg n_д + 1{,}0759 \lg A \lg D_{бг} + 1{,}0914 \lg D_{бг}/\lg A - 0{,}5574 \lg n_д/\lg A, \quad (4.2)$$

$$\sigma = \pm 0{,}106; \quad R^2 = 0{,}966;$$

$$\lg F = -0{,}5787 + 1{,}2962 \lg A \lg H_{бг} + 2{,}3324 \lg H_{бг}/\lg A - 2{,}3591 \lg H_{бг} + 1{,}3721 \lg n_д - 0{,}5978 \lg n_д/\lg A; \quad (4.3)$$

$$\sigma = \pm 0{,}124; \quad R^2 = 0{,}953$$

и для семенных

$$\lg F = 0{,}2069 - 0{,}6024 \lg A + 0{,}8594 \lg n_д + 0{,}8666 \lg A \lg D_{бг}; \quad (4.4)$$

$$\sigma = \pm 0{,}129; \quad R^2 = 0{,}937;$$

$$\lg F = -1{,}1984 + 0{,}8414 \lg n_д + 0{,}6491 \lg H_{бг} \lg A + 1{,}0056 \lg H_{бг}/\lg A; \quad (4.5)$$

$$\sigma = \pm 0{,}139; \quad R^2 = 0{,}927.$$

Обозначения см. в табл. 4.2. В уравнениях (4.2)—(4.5) наибольшая доля изменчивости площади биогруппы объясняется числом деревьев в биогруппе, а возраст и средние размеры деревьев и их сочетания играют меньшую роль. Н. Т. Смирнов (1969) и В. Т. Внучков (1976) в качестве размерной характеристики среднего дерева используют высоту. Из уравнений (4.2)—(4.5) следует, однако, что средний диаметр более информативен, так как (4.2) и (4.4) имеют более высокие значения R^2, нежели (4.3) и (4.5). Табулирование (4.2) и (4.4) (табл. 4.3) показало, что при одинаковом числе стволов в группе в пределах класса возраста площадь ее возрастает с увеличением среднего диаметра дерева. Та же закономерность наблюдается с увеличением числа деревьев в биогруппе при фиксированном среднем диаметре. Связь площади биогруппы с возрастом при двух других фиксированных факторах неоднозначна. Об этом можно судить и по наличию синергизмов с участием фактора возраста, число которых в порослевых березняках равно трем. За некоторыми редкими исключениями, площадь биогруппы в порослевых березняках при одинаковых значениях определяющих факторов больше, чем в семенных.

Электронный архив УГЛТУ

Таблица 4.3

Площадь биогрупп березняков в зависимости от происхождения, возраста, среднего диаметра ствола и числа деревьев в биогруппе

$D_{бг}$, см	$n_д$	F, м² семенные	F, м² порослевые	$D_{бг}$, см	$n_д$	F, м² семенные	F, м² порослевые	$D_{бг}$, см	$n_д$	F, м² семенные	F, м² порослевые
	A=10 лет				A=30 лет				A=50 лет		
	3	1,03	1,58		3	3,15	4,72		3	15,2	16,7
	8	2,40	3,46		8	7,31	12,4	12	8	35,4	46,0
1	20	5,28	7,21	4	20	16,1	30,3		20	77,7	118
	50	11,6	15,0		50	35,3	74,5				
	150	29,8	36,2						3	23,2	23,0
					3	7,64	9,25	16	8	54,0	63,3
	3	3,44	4,85		8	17,8	24,2		20	119	163
	8	7,99	10,6	8	20	39,0	59,4				
4	20	17,6	22,2		50	85,8	146		3	32,3	29,6
	50	38,6	46,2					20	8	75,0	81,2
	150	99,2	111		3	12,8	13,7		20	165	208
				12	8	29,8	35,9				
	3	4,88	6,74		20	65,6	88,1		3	42,2	36,2
	8	11,4	14,8		50	144	216	24	8	98,6	99,4
6	20	24,9	30,8						20	216	256
	50	54,8	64,1								
	150	141	154								

Число биогрупп $n_б$ на единице площади древостоя с возрастом снижается, что описано уравнениями: для порослевых березняков

$$\lg n_б = 3{,}7257 - 0{,}9553 \lg A; \quad R^2 = 0{,}585; \qquad (4.6)$$

для семенных

$$\lg n_б = 3{,}6461 - 0{,}6936 \lg A; \quad R^2 = 0{,}618. \qquad (4.7)$$

Отмечено также некоторое увеличение числа одиночных деревьев, достигающее к 50 годам 2—5%. Среднее их число — 1,3—1,7% от общего. Изменчивость морфометрических признаков биогрупп объясняется на 83—98% двумя факторами — возрастом и густотой — согласно уравнению (табл. 4.4)

$$\lg y = a_0 + a_1 \lg A + a_2 \lg N + a_3 \lg A \lg N. \qquad (4,8)$$

Электронный архив УГЛТУ

4.1.4. Динамика распределения числа деревьев в биогруппах. Варьирование морфометрического признака и обусловленные этим явлением ряды распределения деревьев по данному признаку определяются комплексом факторов: возрастом древостоя, в пределах класса возраста — густотой биогруппы, в пределах ступени густоты — средним диаметром стволов и т. д. Поскольку изменчивость морфометрических признаков биогрупп объясняется их возрастом и густотой (см. табл. 4.4), представляет интерес анализ по этим факторам и рядов распределения деревьев в биогруппах. С увеличением числа учитываемых факторов в динамике строения требуется многократное увеличение объема экспериментальных данных. Иначе варьирование и ряды распределения признака, особенно моменты r_3 и r_4, будут в возрастающей степени определяться неучтенным фоном в силу недостаточной репрезентативности выборок. Однако в пределах имеющегося экспериментального материала можно установить оптимальную степень его дробности по факторам, и критерием оптимальности служит коэффициент детерминации моделей, объясняющих изменчивость моментов распределения признака. Исходя из этого в пределах ступеней возраста и густоты $N_м$, по которым систематизировались биогруппы, выделено по 2—4 ступени текущей густоты и по каждой составлены ряды распределения числа деревьев по 10 классам толщины ствола. Для полученных на ЭВМ статистик выведены уравнения для порослевых и семенных березняков (табл. 4.5). Значения R^2 находятся на том же уровне или выше соответствующих R^2 в моделях строения, выполненных для древостоев элемента леса (Кузьмичев, 1977). Первые два момента определяются только возрастом и густотой биогруппы. Варьирование r_3 в порослевых березняках на достоверном уровне объясняется названными двумя факторами и густотой $N_м$, с которой r_3 находится в отрицательной связи. Последнее можно объяснить тем, что при густом размещении порослевых гнезд поросль вторичных генераций вследствие неблагоприятного радиационного режима не в состоянии выйти в основной ярус и постепенно отмирает. Но по мере снижения исходной $N_м$ в основной ярус выходит все большее число деревьев вторичных генераций, а это вследствие меньших их размеров сказывается на величине r_3. Таким образом, при более редком размещении порослевых гнезд возрастает положительная асимметрия ряда распределения, однако на величину первых двух моментов это не оказывает достовер-

Электронный архив УГЛТУ

Таблица 4.4

Характеристика уравнений (4.8)

Морфометрические признаки биогрупп		Константы				Ошибка уравнения σ	Коэффициент детерминации R^2
		a_0	a_1	a_2	a_3		
Порослевые березняки							
$H_{бг}$	мин.	0,1376	0,5899	—0,2177	—	0,075	0,922
	сред.	0,3306	0,5119	—0,2274	—	0,048	0,958
	макс.	0,3961	0,4881	—0,1819	—	0,063	0,920
$D_{бг}^{кр}$	мин.	—0,0319	0,3545	—	—0,2640	0,068	0,870
	сред.	0,1214	0,2823	—	—0,2623	0,061	0,865
	макс.	0,1818	0,2665	—	—0,2386	0,065	0,828
Семенные березняки							
$H_{бг}$	мин.	0,3121	0,5223	—0,2084	—	0,081	0,895
	сред.	0,5782	0,4202	—0,2565	—	0,041	0,968
	макс.	0,6507	0,4214	—0,2591	—	0,036	0,974
$D_{бг}^{кр}$	мин.	0,0447	0,2970	—	—0,2668	0,034	0,968
	сред.	0,1396	0,2685	—	—0,2745	0,028	0,978
	макс.	0,2401	0,2417	—	—0,2915	0,053	0,927

ного влияния. Четвертый момент найден, исходя из r_3, по полиному 2-го порядка, как это было реализовано ранее для сосняков (Кузьмичев, 1977). В основе такой аппроксимации лежит детерминированная связь r_4 с квадратом r_3 для некоторых типов распределений (Макаренко, 1982). Парная связь $\bar{\sigma}$ с $\bar{X}$, выраженная логарифмическим полиномом 2—3-го порядков, оказалась менее значимой, чем множественная связь $\bar{\sigma}$ с A и N, а связь r_3 с $\bar{X}$ — либо недостоверной, либо находящейся на нижнем пределе допускаемых значений $t_{0,05}$.

По уравнениям связи с возрастом первого момента распределения числа биогрупп по густоте (см. табл. 4.2) рассчитаны для соответствующих классов возраста густоты и подстановкой тех и других в уравнения табл. 4.5 получены четыре основные момента распределения деревьев в биогруппах по классам толщины. Значение $N_м$ принято постоянным — 1,67 тыс. экз./га, $H_{бг}$ рассчитана по уравнению связи с возрастом первого момента распределения числа биогрупп по

Электронный архив УГЛТУ

Таблица 4.5

Регрессионные модели динамики статистик распределения деревьев в биогруппах по диаметру

Уравнения множественной регрессии	Ошибка уравнения σ	Коэффициент детерминации R^2
Порослевые березняки		
$\lg\bar{X}=0{,}291+0{,}5519\lg A-0{,}3693\lg N$	0,042	0,970
$\lg\sigma=0{,}7412+0{,}5149\lg A\ \lg N-1{,}0257\lg N$	0,043	0,964
$\lg(r_3+1)=-0{,}0569+0{,}2643\lg A\ \lg N-0{,}3841\lg N_м$	0,057	0,520
$r_4=2{,}035-1{,}2721r_3+2{,}4024r_3^2$	0,520	0,810
Семенные березняки		
$\lg\bar{X}=0{,}0975+0{,}6770\lg A-0{,}3051\lg N$	0,030	0,988
$\lg\sigma=1{,}5624-0{,}5709\lg A+0{,}3075\lg A\ \lg N-0{,}9214\lg N$	0,048	0,925
$\lg(r_3+1)=-1{,}1266+0{,}9690\lg A+$ $+1{,}9356\lg H_{бг}-2{,}4652\lg\bar{X}$	0,053	0,872
$r_4=2{,}2135+1{,}6906r_3^2$	0,220	0,925

высоте (см. табл. 4.2). По четырем моментам с применением семейства кривых Пирсона (Ма..аренко и др., 1978) построены ряды распределения числа деревьев в биогруппах порослевых и семенных березняков по классам толщины в возрастной динамике (табл. 4.6). Эти ряды существенно отличаются от рядов распределения числа биогрупп по классам среднего диаметра, построенных по данным табл. 4.2, что следует и из сравнения моментов распределения тех и других. Динамичность рядов распределения числа биогрупп статистически подтверждена лишь по первым двум моментам, а ряды распределения деревьев динамичны по всем четырем моментам. Первые ряды обладают более выраженной положительной асимметрией, а асимметрия вторых имеет меньшие числовые значения и с возрастом становится отрицательной. Абсолютные величины r_3 тех и других в порослевых березняках выше, чем в семенных, что обусловлено, по-видимому, наличием уже упомянутых вторичных генераций поросли. Очевидны и вполне объяснимы различия названных распределений по моменту r_4.

Вследствие наличия большего пространства роста для порослевых биогрупп величины первых двух моментов распределений биогрупп и составляющих их деревьев в порослевых березняках выше. С возрастом это различие сглаживается.

Таблица 4.6

Распределение числа деревьев в биогруппах порослевых и семенных березняков, %, по классам толщины в возрастной динамике и статистики рядов

Возраст, лет	Классы толщины ствола										$\bar{X}$, см	$\bar{\sigma}$, см	r_3	r_4	$\varkappa$
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10					
Порослевые березняки															
10	21,8	12,8	10,8	9,6	8,8	8,2	7,7	7,2	6,8	6,3	2,785	1,553	0,388	1,903	—0,048
15	21,4	12,9	10,8	9,7	8,8	8,2	7,7	7,3	6,9	6,3	4,040	2,298	0,376	1,896	—0,045
20	18,8	12,7	11,0	10,0	9,3	8,7	8,2	7,7	7,2	6,4	5,352	2,957	0,315	1,873	—0,032
25	14,8	12,3	11,3	10,6	10,0	9,5	8,9	8,4	7,7	6,5	6,733	3,524	0,236	1,869	—0,018
30	10,9	11,6	11,5	11,3	10,9	10,5	9,9	9,1	8,1	6,2	8,171	4,000	0,155	1,895	—0,01
40	4,0	8,8	11,1	12,5	13,2	13,2	12,5	11,1	8,8	4,8	11,246	4,717	0	2,035	0
50	0,6	4,4	8,5	12,3	15,1	16,5	16,2	13,8	9,4	3,2	14,541	5,178	—0,133	2,247	—0,01
Семенные березняки															
10	20,7	28,8	22,9	14,6	7,9	3,5	1,2	0,3	0,1	—	2,27	1,41	0,80	3,30	—0,426
15	12,0	21,3	21,6	17,9	12,9	8,0	4,1	1,6	0,4	0,2	3,60	1,87	0,58	2,78	—0,192
20	8,3	17,1	19,5	18,3	15,0	10,8	6,6	3,3	1,0	0,1	4,99	2,19	0,44	2,54	—0,103
25	6,2	14,3	17,7	17,9	15,9	12,5	8,6	4,8	1,8	0,3	6,43	2,43	0,34	2,41	—0,060
30	5,0	12,5	16,4	17,5	16,3	13,5	9,9	6,0	2,5	0,4	7,91	2,59	0,27	2,34	—0,037
40	4,0	10,6	14,8	16,6	16,3	14,4	11,3	7,5	3,7	0,8	11,0	2,83	0,19	2,27	—0,018
50	3,0	8,9	13,2	15,7	16,3	15,2	12,6	9,0	4,9	1,2	14,2	2,94	0,11	2,23	—0,006

Электронный архив УГЛТУ

Электронный архив УГЛТУ

Все ряды распределения аппроксимируются кривой типа I Пирсона. В целом различие строения биогрупп березняков разного происхождения более выражено в молодом возрасте.

Полученные регрессионные модели динамики горизонтальной структуры могут быть использованы в качестве основы для моделирования роста и формирования древостоя на уровне биогрупп. Поэтому необходимо прежде всего проанализировать закономерности изменения продуктивностных показателей биогрупп в связи с возрастом и густотой.

4.2. Продуктивность биогрупп как микромоделей древостоев различной густоты

4.2.1. Диапазоны продуктивности для оптимальной и предельной густот биогрупп. Динамика густоты или полноты лесных фитоценозов является ведущим процессом, определяющим изменение их продуктивности, и регулирование этого процесса в направлении его оптимизации относится к мероприятиям, наиболее доступным для лесохозяйственной практики (Кузьмичев, 1980). Известно, что в растительных ценозах, в том числе древостоях, существует оптимум густоты, обеспечивающий наибольшую продуктивность фитомассы на 1 га (Синягин, 1975: Thomasius, Thomasius, 1976 а, б; Рубцов и др., 1976; Кайрюкштис, Юодвалькис, 1976; Рябоконь, 1979; Бузыкин, Пшеничникова, 1980; Тябера, 1982). И. И. Синягин (1975) связывает этот оптимум с наиболее выгодным соотношением между размерами ассимилирующей поверхности и интенсивностью фотосинтеза, отнесенной на единицу этой поверхности, а А. И. Бузыкин (1975) и А. П. Рябоконь (1979) видят его в структуре, обеспечивающей единство потребности деревьев в элементах питания с ресурсами местообитания. А. И. Бузыкин и Л. С. Пшеничникова (1980, с. 59) полагают, что «...оптимальной густотой, обеспечивающей максимальный запас стволовой древесины, служит та наибольшая густота, которой характеризуются древостои», отмечая в то же время, что при чрезмерном перегущении запас древостоев снижается, и не уточняют количественных соотношений «наибольшей густоты» и «чрезмерного перегущения».

Л. А. Кайрюкштис и А. И. Юодвалькис (1976) приходят к выводу, что критерии оптимальной густоты древостоев не могут быть едиными на протяжении всего цикла их роста, и устанавливают критерии, дифференцированные по возрастным этапам, с учетом площади питания, проекции кроны и

перекрытия кроны. А. П. Рябоконь (1979) вслед за А. К. Поляковым (1973) приходит к определению биологического оптимума густоты как ее значения, обеспечивающего максимальный текущий прирост древостоя. Эта закономерность детально конкретизирована Н. О. Томазиусом (Thomasius, 1978), который вывел зависимость объемного прироста дерева от площади его питания (в интервале от минимально возможной до площади роста без конкуренции) в различных классах возраста и на основании полученной поверхности объемного прироста древостоя установил возрастную динамику его максимального значения, которому соответствует густота, оптимальная для того или иного возраста. В. И. Рубцов с соавт. (1976) подтвердили вывод Л. А. Кайрюкштиса и А. И. Юодвалькиса. Они показали, что понятие оптимальной густоты может быть многозначным и густота, оптимальная с точки зрения производительности древостоя, не всегда оптимальна в хозяйственном аспекте. И. Е. Березюк (1959) приходит к выводу, что в засушливых условиях Северного Казахстана практика редких посадок сосны, казалось бы обеспечивающих при большей площади питания лучшие лесорастительные условия, фактически приводит к чрезмерному развитию транспирирующей массы кроны, которая не может быть обеспечена необходимым количеством влаги, это вызывает в критические периоды частичную или полную гибель культур.

Детальный анализ методов оценки и регулирования продуктивности древостоев выполнен В. В. Кузьмичевым (1977). Он выделяет две группы методов регулирования продуктивности. Первая включает эмпирический подбор характеристик древостоев в целом, когда рост леса рассматривается как вероятностный процесс, характеризуемый определенными параметрами. Вторая предполагает изучение динамики пространства роста деревьев с учетом неравномерности их размещения и степени напряженности их взаимовлияний в древостое. Далее им было показано, что древостой не может постоянно поддерживать нормальную площадь сечений в соответствии с таблицами хода роста, а лишь на какое-то время достигает табличного оптимума, причем его возраст в это время зависит от начальных условий — густоты и размещения деревьев на площади.

Вследствие группового сложения древостоя его строение в целом обычно не совпадает со строением на уровне биогрупп как элементарных структурных единиц, и вопрос опти-

Электронный архив УГЛТУ

мизации густоты не может быть решен без учета горизонтальной структуры и соотношения, в котором находятся показатели густоты и продуктивности на двух названных уровнях. Мозаичность эколого-ценотических условий лесного фитоценоза как одна из причин группового сложения формирующегося древостоя в экстремальных климатических условиях становится, по существу, доминирующим фактором устойчивости ценоза. В исследуемом регионе, расположенном на южной границе лесного ареала, экстремальные условия обуславливают наиболее резко выраженный групповой характер древостоев. Тем самым сочетается оптимальная в аспекте устойчивости морфоструктура биогрупп (наличие дифференциации деревьев, действие механизма естественного отбора, благоприятное соотношение ассимилирующей и скелетной частей полога и др.) с возможностью заимствовать влагу и питательные вещества на прилегающих площадях (Березюк, 1959; Бирюкова, 1974; Грибанов, 1974). Чрезмерное перегущение биогрупп в молодом возрасте зачастую сочетается со сравнительно низкой плотностью древостоя в целом. Для воспитания таких древостоев в условиях оптимальной плотности нужны соответствующие критерии.

В разделе исследуются продуктивностные показатели биогрупп в сосняках Казахского мелкосопочника (по экспериментальным данным В. Т. Внучкова, 1976) и в березняках порослевого и семенного происхождения. По каждой биогруппе древостоя рассчитаны продуктивностные показатели: сумма площадей сечения G (в м²/га), запас в коре и без коры $V_{вк}$ и $V_{бк}$ (в м³/га), масса древесины и коры ствола в абсолютно сухом состоянии $P_{др}$ и $P_к$ (в т/га), а также сомкнутость крон в биогруппах $C_{кб}$. Последний показатель, строго говоря, характеризует степень напряженности конкурентных отношений в биогруппе. Вместе с тем показатели $C_{кб}$ и G являются характеристиками ее плотности и, следовательно, продуктивности. Размерности запаса и массы древесины в биогруппах приняты по аналогии с общеупотребительными размерностями для тех же показателей на уровне древостоя с предположением, что 1/10000 условного гектара биогруппы эквивалентна 1 м² площади биогруппы.

Запасы древесины в биогруппах рассчитаны на ЭВМ путем суммирования объемов стволов, вычисленных по известным высоте и диаметру с использованием уравнений: в порослевых березняках

$$\lg V_{вк} = -0{,}4974 + 1{,}1051 \lg D + 1{,}0244 \lg D \lg H; \qquad (4.9)$$

Электронный архив УГЛТУ

$$\sigma = \pm 0{,}048; \quad R^2 = 0{,}992;$$

$$\lg V_{бк} = -0{,}7117 + 1{,}0578 \lg D + 0{,}2242 \lg H + 0{,}9668 \lg D \lg H; \quad (4.10)$$

$$\sigma = \pm 0{,}045; \quad R^2 = 0{,}994;$$

и в семенных

$$\lg V_{вк} = -1{,}3027 + 1{,}6998 \lg D + 1{,}1767 \lg H; \quad (4.11)$$

$$\sigma = \pm 0{,}034; \quad R^2 = 0{,}996;$$

$$\lg V_{бк} = -1{,}4631 + 1{,}6792 \lg D + 1{,}2726 \lg H; \quad (4.12)$$

$$\sigma = \pm 0{,}036; \quad R^2 = 0{,}996,$$

где $V_{вк}$ и $V_{бк}$ — объемы ствола в коре и без коры, дм³.

Уравнения (4.9)—(4.12) получены по 100 модельным деревьям в порослевых и по 80 — в семенных березняках, взятым в различных классах возраста, по результатам замера диаметров в коре и без коры на относительных высотах 0; 0,05; 0,1; 0,2; ... 0,9. Экспериментальные данные по запасу ствола в коре биогрупп сосны пересчитаны на запас без коры и на показатели массы по уравнениям, выведенным по 140 модельным деревьям на 14 пробных площадях в возрасте древостоев от 25 до 106 лет, взятым при изучении первичной биологической продуктивности сосняков (см. главу 3):

$$\lg П_к^{o} = 2{,}732 - 0{,}736 \lg A - 0{,}682 \lg R_д + 0{,}290 \lg A \lg R_д + 0{,}069 \lg R_д \lg N_д; \quad (4.13)$$

$$\sigma = \pm 0{,}073; \quad R^2 = 0{,}776;$$

$$\rho_{усл}^{др} = 428{,}8 - 0{,}421A - 1{,}089R_д + 24{,}25Z + 0{,}0117AR_д; \quad (4.14)$$

$$\rho_{усл}^{к} = 508{,}0 - 0{,}776A - 1{,}608R_д + 22{,}99Z + 0{,}0057AR_д, \quad (4.15)$$

где $П_к^{o}$ — процент коры к объему ствола; $N_д$ — густота древостоя, тыс. экз./га; $\rho_{усл}^{др}$ — условная плотность древесины ствола, кг/м³. Показатель $\rho_{усл}^{к}$, кг/м³, можно назвать условной объемной массой (Перелыгин, Уголев, 1971). Он несколько занижен в сравнении с условной плотностью вещества коры (без разделения на пробку и луб), поскольку ее объем взят без учета пустот и трещин, отсутствия коры на срезах ветвей и т. д. Этот показатель имеет значение только в качестве коэффициента пересчета объема коры, полученного по разности объемов ствола в коре и без коры, на ее массу в абсолютно сухом состоянии. Однако при необходимости $\rho_{усл}^{к}$ можно скорректировать на трещиноватость коры по методике, предложенной Х. Л. Гольцом (Gholz, 1980).

Электронный архив УГЛТУ

Масса древесины и коры березы рассчитана по значениям условной плотности, найденной по уравнениям

$$\rho_{усл}^{др} = 418{,}2 + 2{,}097A + 0{,}735R_d + 26{,}68Z - \\ - 1{,}177A\,Z - 0{,}325R_dZ; \qquad (4.16)$$

$$\rho_{усл}^{к} = 743{,}2 - 4{,}176A - 3{,}67R_d - 32{,}21Z + 1{,}284A\,Z + \\ + 0{,}0522A\,R_d. \qquad (4.17)$$

Уравнения (4.16) и (4.17) выведены по 253 модельным деревьям на 9 пробных площадях в возрасте древостоев от 5 до 50 лет, взятым при исследовании биологической продуктивности березняков. Уравнения (4.14)—(4.17) получены по методике, изложенной в разделе 3.5, их коэффициенты детерминации не приводятся. Экспериментальные значения $V_{вк}$ сосны и выведенные по ним с помощью (4.13), (4.14), (4.15) значения $V_{бк}$, $P_{др}$ и $P_к$, обозначенные ниже через y, аппроксимированы регрессиями

$$\lg y = a_0 + a_1\lg N + a_2\lg^2 N + a_3\lg A + a_4\lg^2 N\lg A + \\ + a_5\lg N\lg^2 A + a_6\lg^3 N + a_7\lg^3 N\lg A, \qquad (4.18)$$

где N — густота биогруппы, тыс. экз./га. Уравнения (4.18) действительны только в пределах экспериментальных данных, т. е. при A от 30 до 100 лет и при N от 1 до 30 тыс. экз./га. Их характеристика дана в табл. 4.7.

Графическая интерпретация (4.18) для $P_{др}$ (рис. 19) показывает наличие линий густоты, оптимальной в отношении продуцирования фитомассы и предельной, или максимально возможной для данного уровня, продуктивности. Последняя одновременно характеризует максимальную продуктивность при заданной густоте. Если густота 6,5 тыс. экз./га в возрасте 30 лет обеспечивает максимальную фитомассу 39 т/га, то предельное значение продуктивности 65 т/га при той же густоте не является максимальным для возраста 70 лет, в котором оптимален уже другой, значительно более низкий уровень густоты — 3,2 тыс. экз./га с соответственно более высокой продуктивностью — 112 т/га. Линия оптимальной густоты для массы древесины сдвинута относительно линии для массы коры в сторону снижения густоты (табл. 4.8), а линия предельных густот, — напротив, в сторону ее увеличения, что связано, очевидно, с возрастанием доли коры при повышении густоты биогрупп в статике.

При нахождении оптимальной (как и экстремальной) густоты есть смысл говорить не о линии и тем более не о точ-

Таблица 4.7

Характеристика уравнений (4.18)

Показатели	Константы (в числителе) и значимость их по Стьюденту (в знаменателе)								Ошибки уравнения σ	Коэффициенты детерминации R^2
	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7		
$V_{вк}$, м³/га	—3,439	6,637 / 2,3	—12,056 / 2,1	3,005 / 4,1	6,237 / 2,1	—1,571 / 2,2	7,748 / 2,7	—4,796 / 2,8	0,052	0,976
$V_{бк}$, м³/га	—3,596	6,680 / 2,3	—12,301 / 2,1	3,055 / 4,2	6,367 / 2,2	—1,586 / 2,2	7,890 / 2,7	—4,878 / 2,9	0,052	0,978
$P_{др}$, т/га	—4,212	6,615 / 2,3	—12,258 / 2,1	3,174 / 4,4	6,377 / 2,2	—1,553 / 2,2	7,799 / 2,7	—4,824 / 2,9	0,051	0,980
$P_к$, т/га	—4,162	6,514 / 2,3	—11,857 / 2,1	2,714 / 3,8	6,176 / 2,1	—1,493 / 2,1	7,635 / 2,7	—4,735 / 2,9	0,051	0,949

Электронный архив УГЛТУ

Электронный архив УГЛТУ

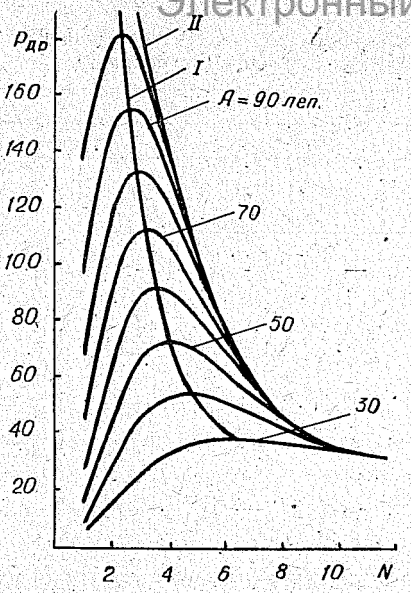


Рис. 19. Зависимость массы древесины стволов от возраста и густоты биогрупп сосны; I, II — линии оптимальной и предельной густот

ке оптимума, а о некотором диапазоне (полосе) условий, который может определяться как эколого-ценотической ситуацией, своеобразной в онтоценогенезе каждого конкретного древостоя (Кузьмичев, Савич, 1979), так и спецификой лесохозяйственного производства и выбором критерия оптимальности (Кайрюкштис, Юодвалькис, 1976). Пытаясь установить такие диапазоны продуктивности для оптимальных и экстремальных густот в березняках порослевого и семенного происхождения, мы применили метод расчленения той или иной закономерности на составляющие, описываемые более простыми монотонными функциями. Сумма площадей сечения биогруппы и, следовательно, продуктивность пропорциональны произведению квадрата среднего диаметра на густоту. С возрастом средний диаметр увеличивается, а густота снижается. Вследствие этого продуктивность с возрастом изменяется по колоколообразной выпуклой кривой. Как уже отмечалось, расчленение этой закономерности на составляющие, выполненные Г. Б. Кофманом и В. В. Кузьмичевым (1979), оказалось весьма плодотворным. Продуктивность биогрупп в статике изменяется в связи с густотой по аналогичной выпуклой кривой (см. рис. 19). В основе такой закономерности также находятся две составляющие: увеличение продуктивности с густотой биогрупп при фиксированном среднем диаметре и снижение среднего диаметра при увеличении густоты, что при высокой густоте влечет за собой снижение продуктивности. На рис. 19 для каждого возраста представлен результирующий эффект названных двух факторов, структура воздействия каждого из них в отдельности

Электронный архив УГЛТУ

Таблица 4.8

Соотношения густоты N и продуктивности $P_{др}$, $P_к$ биогрупп по массе древесины и коры в сосняках различного возраста

Возраст, лет	Оптимальные				Предельные			
	древесина		кора		древесина		кора	
	N	$P_{др}$	N	$P_к$	N	$P_{др}$	N	$P_к$
30	6,5	39	7,5	11,0	—	—	—	—
40	4,7	55	5,1	13,0	8,7	40	8,0	11,0
50	4,0	73	4,2	15,5	8,0	46	6,6	12,8
60	3,5	92	3,7	18,0	7,3	53	6,0	14,4
70	3,2	112	3,4	20,3	6,5	65	5,5	16,0
80	2,9	133	3,1	22,8	5,8	80	5,0	18,0
90	2,6	154	2,8	25,2	5,0	103	4,6	20,0
100	2,4	181	2,6	27,8	—	—	—	—

осталась скрытой. В силу колоколообразности распределения случайной величины крайние значения густоты биогрупп в данном возрасте всегда менее репрезентативны в сравнении со значениями в середине интервала густот. Поэтому расчленение комплексной закономерности на составляющие обладает также тем достоинством, что снижает вероятность погрешности из-за ошибки выборки и дает возможность взаимно согласовывать, или «гармонизировать», составляющие закономерности (Кузьмичев, 1980; Jacobs, Cunia, 1980).

Систематизация экспериментальных продуктивностных показателей биогрупп в березняках по трем факторам: возрасту, в пределах возраста — по густоте и в пределах ступени густоты — по среднему диаметру — и графический анализ их позволили рассчитать множественные регрессионные уравнения, приведенные к линейному виду

$$\lg y = a_0 + a_1 \lg A + a_2 \lg N + a_3 \lg D_{бг} + a_4 \lg^2 A + a_5 \lg^2 N + a_6 \lg^2 D_{бг} + a_7 \lg A \lg N + a_8 \lg A \lg D_{бг} + a_9 \lg N \lg D_{бг}. \quad (4.19)$$

Характеристика полученных уравнений (4.19) приведена в табл. 4.9. Графически они могут быть представлены в возрастной динамике серией поверхностей (одна из них показана на рис. 20), описываемых сочетанием двух монотонных

Таблица 4.9

Характеристика уравнений (4.19)

Показатели	Константы (в числителе) и их значимость по Стьюденту (в знаменателе)										Ошибки уравнения σ	Коэффициенты детерминации R^2
	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	a_8	a_9		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Семенные древостои												
$V_{вк}$, м³/га	—1,679	5,986 / 4,9	—	—4,296 / 4,6	—2,724 / 5,0	0,694 / 8,2	—	—1,615 / 5,2	3,346 / 6,2	2,724 / 6,9	0,075	0,968
$V_{бк}$, м³/га	—1,878	6,246 / 4,9	—	—4,499 / 4,6	—2,847 / 5,0	0,711 / 8,1	—	—1,679 / 5,2	3,492 / 6,2	2,808 / 6,8	0,078	0,968
$P_{др}$, т/га	—2,218	6,198 / 5,0	—	—4,424 / 4,7	—2,796 / 5,0	0,709 / 8,3	—	—1,667 / 5,2	3,436 / 6,2	2,790 / 7,0	0,076	0,970
$P_к$, т/га	—2,491	5,071 / 3,6	—	—3,143 / 2,9	—2,078 / 3,3	0,647 / 6,7	—	—1,440 / 4,0	2,341 / 3,7	2,476 / 5,5	0,086	0,949
G, м²/га	—1,099	2,945 / 4,5	—	—1,872 / 3,8	—1,364 / 4,7	0,507 / 11,3	—	—0,808 / 4,9	1,784 / 6,2	1,667 / 8,0	0,040	0,982
$C_{кб}$	—1,169	1,021 / 3,5	1,289 / 7,9	—	—0,345 / 2,9	—	—	—0,809 / 4,0	0,242 / 2,0	0,280 / 2,1	0,052	0,902

Электронный архив УГЛТУ

Продолжение табл. 4.9

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
					Порослевые древостои							
$V_{вк}$, м³/га	—1,249	—	2,366 / 5,5	2,128 / 6,6	—	—0,570 / 3,3	—	—	0,476 / 4,7	—0,623 / 2,6	0,091	0,958
$V_{бк}$, м³/га	—1,335	—	2,308 / 5,2	2,067 / 6,3	—	—0,553 / 3,1	—	—	0,507 / 4,9	—0,547 / 2,3	0,093	0,958
$P_{др}$, т/га	—1,638	—	2,284 / 5,1	2,002 / 6,0	—	—0,547 / 3,0	—	—	0,549 / 5,2	—0,528 / 2,1	0,096	0,958
$P_{к}$, т/га	—2,190	—	2,464 / 5,4	2,214 / 6,6	—	—0,603 / 3,3	—	—	0,422 / 3,9	—0,827 / 3,3	0,096	0,951
G, м²/га	—0,862	0,073 / 2,0	0,839 / 16,4	1,705 / 26,8	—	—	—	—	—	0,180 / 4,1	0,059	0,964
$C_{кб}$	—0,520	—	0,723 / 8,0	0,517 / 3,4	—	—	—0,179 / 4,7	—0,208 / 5,3	0,328 / 3,8	—0,235 / 2,0	0,066	0,618

Электронный архив УГЛТУ

Электронный архив УГЛТУ

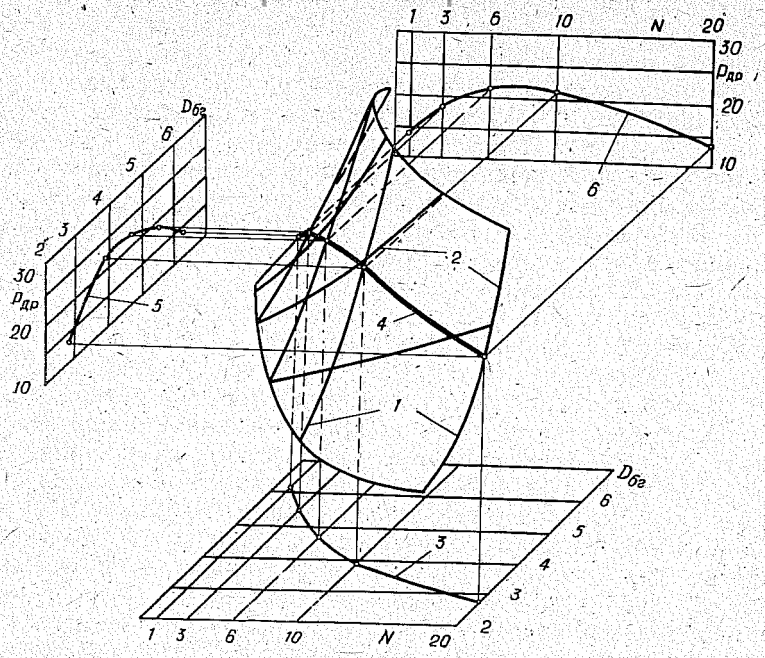


Рис. 20. Геометрическая интерпретация уравнения (4.19) для семенных березняков в возрасте А=20 лет: 1 — линии равной густоты; 2 — линии равного диаметра; 3 — кривая функции $D_{бг}^{ср}=f(N)$ по уравнению (4.22); 4 — проекция линии 3 на поверхность, описываемую уравнением (4.19); 5, 6 — проекции линии 4 на плоскости $P_{др}$—$D_{бг}$ и $P_{др}$—N

функций $P=f(D_{бг})$ и $P=\varphi(N)$, где P положительно связана с $D_{бг}$ и N. Уравнения адекватны и могут быть использованы для оценки продуктивности березовых древостоев порослевого и семенного происхождения на уровне биогрупп. Исключение составляет уравнение для сомкнутости крон в биогруппах порослевых березняков ($R^2=0{,}618$). Это объясняется более сложным строением порослевых березняков в сравнении с семенным (см. раздел 4.1), вследствие чего один и тот же набор факторов по-разному обуславливает изменчивость сомкнутости тех и других. Но точность прогноза по большинству показателей будет определяться главным образом точностью предсказания факторов N и $D_{бг}$, которые за-

Электронный архив УГЛТУ

висят от эколого-ценотических условий в процессе естественного изреживания биогрупп и от целенаправленного антропогенного воздействия при рубках ухода. Этот вопрос нуждается в специальном исследовании. Дальнейшее изложение ограничивается анализом продуктивности березняков на основе модели (4.19). Предстоит проследить, как изменяются продуктивностные показатели при различных уровнях A, N и $D_{бг}$. Предварительно исследуется зависимость $D_{бг}=f(A, N)$.

В. В. Кузьмичев и Ю. Н. Савич (1979) показали, что средний размер дерева в древостоях различной начальной густоты с возрастным увеличением среднего расстояния между деревьями возрастает лишь до определенного предела, описываемого ограничивающей линией. Х. О. и Х. Х. Томазиусами (Thomasius, Thomasius, 1976 а, б) на основе функции Мичерлиха построена модель прироста дерева ели в 40-летнем возрасте как функция эффективной площади роста. К. Хозуми (Hozumi, 1980) независимо от названных работ с помощью выведенной им унифицированной модели, совмещающей логистическую теорию роста и «правило 3/2» для процесса естественного изреживания, смог объединить названные два подхода. Результаты имитации он представил системой двух взаимопересекающихся вееров кривых в координатах «объем дерева — густота», ограниченной сверху огибающей для предельных размеров растений. Первый веер состоит из кривых, соответствующих различным уровням начальной густоты, и описывает процесс, аналогичный изложенному в работе В. В. Кузьмичева и Ю. Н. Савича (1979). Второй веер включает те же соотношения для различных фиксированных значений возраста, трансформированного К. Хозуми в понятие «биологическое время», т. е. здесь отражен принцип, положенный в основу модели Х. О. и Х. Х. Томазиусов (Thomasius, Thomasius, 1976 а, б). Верификация модели по данным хода роста и естественного изреживания культур сосны веймутовой за период с 1904 по 1955 гг. показала ее полную адекватность.

Структура модели К. Хозуми в принципе позволяет применить ее на уровне не только дерева, но и биогруппы, но, к сожалению, мы не располагаем сведениями о начальной густоте биогрупп, поскольку в процессе формирования древостоя происходит их перераспределение в пространстве и во времени (см. раздел 4.1). Имея экспериментальные данные для получения второго из вышеназванных вееров кривых, а именно для установления взаимосвязи «размер среднего де-

Электронный архив УГЛТУ

рева биогруппы — густота биогруппы» по классам возраста, мы предприняли попытку использовать модель Х. О. и Х. Х. Томазиусов, предварительно модифицировав ее включением фактора возраста. В модель для статического случая

$$D_{бг}=D_{макс}\{1-\exp[-C(1/N-1/N_{макс})]\} \qquad (4.20)$$

ввели функции: $D_{макс}=f(A)$, $N_{макс}=\psi(A)$, $C=\varphi(A)$, где $D_{макс}$ — максимальный диаметр дерева в данном возрасте; $N_{макс}$ — максимальная густота биогруппы, при которой $D_{бг}=0$ (представляет фиктивную величину, устанавливаемую для каждого возраста экстраполяцией эмпирических данных); C — фактор влияния густоты. Полученная двухфакторная модель

$$D_{бг}=a_0A^{a_1}\{1-\exp[-a_2A^{a_3}(1/N-A/(a_4-a_5A))]\} \qquad (4.21)$$

обладает тем преимуществом, что имеет логическое обоснование: с уменьшением N значение $D_{бг}\to D_{макс}=f(A)$, с увеличением N величина $D_{бг}$ асимптотически приближается к конечному минимальному значению. Однако попытка реализовать эту модель на экспериментальных данных по березе не привела к успеху, поскольку константа $C=\varphi(A)$ в каждом статическом случае имела существенный тренд по густоте и различие крайних значений C в исследуемых интервалах густоты достигало 370%. При произвольном варьировании значений $D_{макс}$ и $N_{макс}$ при $A=const$ названный тренд оставался практически без изменений. Таким образом, модель (4.21) в биогруппах березняков устойчиво завышает показатели роста при низкой густоте и занижает — при высокой.

Анализ соотношения экспериментальных данных диаметра среднего дерева биогруппы и густоты биогрупп в сосняках и березняках на логарифмической диаграмме показывает отклонение от линейной зависимости $\lg D_{бг}=a_0+a_1\lg N$ в пользу криволинейной связи. Поэтому нами была рассчитана для каждого возраста логарифмическая парабола $\lg D_{бг}=a_0+a_1\lg^2 N$ и затем — зависимости $a_0=f(A)$ и $a_1=\varphi(A)$. В итоге получены нелинейные модели: для семенных березняков

$$\lg D_{бг}=b_0A^{b_1}+b_2A^{b_3\lg A}\lg^2 N \qquad (4.22)$$

и для порослевых

$$\lg D_{бг}=b_0A^{b_1}+b_2A^{b_3\lg A+b_4}\lg^2 N. \qquad (4.23)$$

Чтобы установить полосы продуктивности для оптимальной и предельной густот (по аналогии с двумя линиями на

Электронный архив УГЛТУ

рис. 19), необходимо знать закономерности изменения $D_{бг}=f(A, N)$ не только для средних $D_{бг}^{ср}$, но также максимальных $D_{бг}^{макс}$ и минимальных $D_{бг}^{мин}$ значений среднего диаметра биогрупп в пределах имеющегося экспериментального материала. Различие уравнений $a_1=\varphi(A)$ для $D_{бг}^{мин}$, $D_{бг}^{ср}$ и $D_{бг}^{макс}$ статистически недостоверно, поэтому константа a_1 рассчитана по уравнению, общему для $D_{бг}^{мин}$, $D_{бг}^{ср}$ и $D_{бг}^{макс}$. Характеристика (4.22) и (4.23) дана в таблице 4.10. Графи-

Таблица 4.10

Характеристика уравнений (4.22), (4.23)

Показатели	Константы					Ошибки уравнений σ	Коэффициенты детерминации R^2
	b_0	b_1	b_2	b_3	b_4		
Семенные березняки (4.22)							
$D_{бг}^{мин}$	0,082	0,686	—0,07	0,282	—	0,134	0,916
$D_{бг}^{ср}$	0,187	0,484	—0,07	0,282	—	0,066	0,977
$D_{бг}^{макс}$	0,269	0,403	—0,07	0,282	—	0,047	0,988
Порослевые березняки (4.23)							
$D_{бг}^{мин}$	0,270	0,370	—2,43	1,210	—2,265	0,120	0,936
$D_{бг}^{ср}$	0,321	0,346	—2,43	1,210	—2,265	0,058	0,981
$D_{бг}^{макс}$	0,385	0,320	—2,43	1,210	—2,265	0,078	0,962

ческая интерпретация (4.22) и (4.23) для $D_{бг}^{ср}$ (рис. 21) показывает, что порослевые березняки реагируют на повышение густоты биогрупп в статике более резким снижением среднего диаметра ствола, при этом можно провести линии предельного диаметра, огибающие вееры кривых для порослевых и семенных березняков. У последних эта линия проходит значительно выше, что, по-видимому, связано с различиями горизонтальной структуры тех и других.

На рис. 20 на горизонтальную плоскость $D_{бг}$—N нанесена зависимость $D_{бг}^{ср}=f(N)$ (линия 3) по уравнению (4.22) при A=20 лет. Проекция линии 3 на поверхность, описываемую уравнением (4.19), дает соответствующую ей линию продуктивности (линия 4). Проекция последней на вертикальные плоскости $P_{др}$—$D_{бг}$ и $P_{др}$—N дает зависимости продуктивности, соответственно, от $D_{бг}$ (линия 5) и от N (линия 6). Рисунок иллюстрирует, каким образом две модели,

Электронный архив УГЛТУ

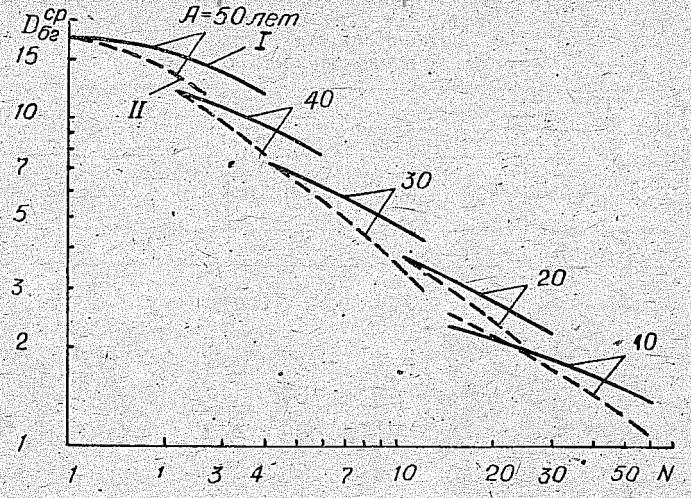


Рис. 21. Изменение среднего диаметра ствола биогрупп с густотой и возрастом: I — семенные, II — порослевые березняки

представленные в статике в виде $P_{др}=f(D_{бг}, N)$ и $D_{бг}=\psi(N)$, описываемые монотонными функциями, при их совмещении дают зависимости $P_{др}=\xi(D_{бг})$ и $P_{др}=\varphi(N)$, описываемые колоколообразными кривыми. В результате совмещения уравнений (4.19), (4.22) и (4.23) получены искомые модели для продуктивностных показателей, представляющие количественное выражение для полос оптимальной и предельной продуктивностей. Результаты совместного табулирования приведены в прил. 7. Подобные модели, представленные рекуррентной системой уравнений, когда зависимая переменная предшествующего уравнения выступает в качестве независимой переменной последующих, находят широкое применение в эконометрии (Четыркин, 1977).

По результатам табулирования и графическим построениям, выполненным на их основе, выведены оптимальные и предельные соотношения густоты и продуктивности биогрупп при минимальном, среднем и максимальном диаметрах среднего дерева в возрастной динамике биогрупп (табл. 4.11). Линии оптимума суммы площадей сечения по сравнению с таковыми для массы фракций ствола сдвинуты в сторону увеличения густоты, причем в молодом возрасте в большей ме-

Электронный архив УГЛТУ

Таблица 4.11

Соотношения показателей густоты и продуктивности биогрупп

$D_{бг}$	Показатели	Оптимальные в возрасте, лет					Предельные в возрасте, лет		
		10	20	30	40	50	20	30	40
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Порослевые березняки									
$D_{бг}^{мин}$	N	10	6	3	2	2	11	6	5
	$P_{др}$	9	18	31	50	82	16	25	30
	N	10	6	4	2	2	10	5	4
	$P_к$	3	5	8	13	20	5	8	10
	N	12	6	4	2,5	2	10	6	4
	G	7	11	14	18	23	11	13	16
$D_{бг}^{ср}$	N	10	6	4	2	2	11	7	4
	$P_{др}$	13	30	51	91	155	25	37	66
	N	10	6	4	2	2	11	6	4
	$P_к$	4	8	13	21	38	7	11	16
	N	13	7	4	2,5	2	10	6	4
	G	10	17	21	27	34	16	20	24
$D_{бг}^{макс}$	N	10	5	3	2	2	12	7	4
	$P_{др}$	20	50	91	171	291	38	64	120
	N	10	5	3	2	2	11	7	4
	$P_к$	6	12	23	43	70	10	15	29
	N	14	7	4	2,5	2	11	6	4
	G	15	25	32	40	51	24	30	38
Семенные березняки									
$D_{бг}^{мин}$	N	10	3	1	2	3	15	15	15
	$P_{др}$	5	12	24	51	115	5	5	5
	N	10	3	3	3	3	19	16	12
	$P_к$	1	3	6	11	20	1	2	4
	N	25	7	4	3,5	3	18	16	14
	G	4,5	6,5	11	20	36	5	6	8
$D_{бг}^{ср}$	N	30	6	4	3	3	13	12	9
	$P_{др}$	14	22	43	80	151	19	22	35
	N	30	8	5	4	3	16	13	11
	$P_к$	4	6	10	16	25	5	6	8
	N	45	10	6	5	4	19	14	11
	G	12	13	20	30	45	12	14	19

Электронный архив УГЛТУ

Продолжение табл. 4.11

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$D_{бр}$ макс	N	40	10	6	4	3	15	11	9
	$P_{др}$	32	41	71	126	219	38	50	70
	N	45	11	6	5	4	17	12	9
	$P_к$	8	10	15	23	34	9	12	17
	N	70	14	7	5	4	20	13	10
	G	24	23	30	42	60	22	26	32

ре, а к возрасту спелости линий выравниваются. Биогруппы в семенных березняках достигают максимальной продуктивности при большей густоте, нежели в порослевых, и с несколько меньшими средними показателями продуктивности. Размах продуктивностей, соответствующих минимальному и максимальному диаметрам среднего дерева биогрупп, значительный, так что минимальные значения последующего класса возраста больше максимальных значений предыдущего. Этот размах в порослевых березняках выше, чем в семенных, что согласуется с показателями коэффициентов вариации диаметров среднего дерева тех и других (см. раздел 4.1).

4.2.2. Динамика сомкнутости крон и полога. Сомкнутость крон и полога относится к характеристикам плотности биогруппы и древостоя в целом, поддержание оптимума которых в возрастной динамике обеспечивает максимальную продуктивность лесного фитоценоза. Г. С. Разин (1979) рассматривает закономерность изменения сомкнутости крон с возрастом как основную в морфогенезе древостоев, поскольку она определяет возрастную динамику всех морфометрических показателей дерева и древостоя. Эта закономерность имеет общий характер с возрастными динамиками текущего прироста, дифференциации деревьев в древостое, ассимилирующей массы полога и др. и характеризуется резким увеличением сомкнутости в первые годы жизни до максимума и последующим постепенным спадом. При этом темп нарастания и снижения сомкнутости крон и полога прямо пропорционален начальной густоте. Аналогичную закономерность динамики сомкнутости культур сосны демонстрирует Е. А. Макаренко (1978), по данным обмера стационарных объектов в возрасте до 24 лет с густотой посадки от 8 до 12 тыс. экз./га. Обоими ав-

Электронный архив УГЛТУ

торами установлено, что максимумы сомкнутости разнесены по возрасту и абсолютной величине. Кривые, соответствующие различным уровням начальной густоты, в ельниках с увеличением возраста взаимно пересекаются. В сосновых культурах из-за ограниченного возрастного интервала подобная закономерность четко не прослеживается.

Конфигурация кривых сомкнутости определяется также характером распределения деревьев по площади (Кузьмичев, 1980): чем неравномернее размещение, тем более растянуто во времени достижение максимальной сомкнутости. Влияние различного характера размещения на динамику сомкнутости показано ниже на сравнении березняков порослевого и семенного происхождения. Это сравнение выполнено в двух вариантах. В первом за исходную структурную единицу взята прямоугольная пробная площадь в целом, сравнительно однородная, без видимых следов антропогенных и стихийных воздействий, во втором — биогруппа как составная часть пробной площади. Приняв определение сомкнутости крон $C_к$ и полога $C_п$ по Г. С. Разину (1979), введем дополнительные индексы для сомкнутости крон и полога в биогруппах $C_{кб}$ и $C_{пб}$ и сомкнутости крон и полога древостоя в целом $C_{кд}$ и $C_{пд}$, где $C_{пд}$, $C_{кд}$ — отношения площади проекции полога и суммарной площади проекций крон деревьев на пробе соответственно к площади пробы; $C_{пб}$, $C_{кб}$ — отношения тех же величин к площади биогруппы. Отсюда следует, что показатели $C_{кд}$, $C_{пд}$ и $C_{пб}$ рассчитываются на уровне древостоя и их динамика рассматривается, как и динамика рядов распределения биогрупп по различным признакам (см. табл. 4.2), только в возрастном аспекте. Показатель $C_{кб}$, характеризующий биогруппу как исходную структурную единицу, более динамичен по сравнению с остальными, и его изменчивость, как и динамику рядов распределения деревьев в биогруппах, нельзя объяснить на уровне какого-то одного фактора. Зависимость первых трех показателей сомкнутости от возраста A рассчитана по логарифмическому полиному второго порядка (4.1). Характеристика уравнений дана в табл. 4.12.

Анализ связи опытных значений $C_{кб}$ с густотой N биогрупп в порослевых березняках при фиксированном возрасте показал, что с увеличением густоты $C_{кб}$ вначале повышается, а затем снижается (табл. 4.13, нижняя строка). Это явление не поддавалось объяснению, пока поле рассеяния опытных данных $C_{кб}$ не было разбито на составляющие совокупности по двум дополнительным факторам: числу деревьев в

Электронный архив УГЛТУ

Таблица 4.12

Характеристика уравнений (4.1) для связи показателей сомкнутости с возрастом

Показатели сомкнутости	Константы			Коэффициенты детерминации R^2
	a_0	a_1	a_2	
	Порослевые березняки			
$C_{кд}$	—1,0108	1,7508	—0,6905	0,966
$C_{пб}$	—0,0082	0,0218	—0,0136	0,872
$C_{пд}$	—1,3126	1,7010	—0,5973	0,984
	Семенные березняки			
$C_{кд}$	—0,9779	2,2266	—0,9860	0,924
$C_{пб}$	—0,0360	0,0705	—0,0351	0,980
$C_{пд}$	—0,6425	1,0562	—0,4426	0,973

биогруппе $n_д$ и густоте материнского древостоя $N_м$. Тогда выявились три закономерности возрастания величины $C_{кб}$ (см. табл. 4.13): с увеличением N (при постоянных $n_д$ и $N_м$), с увеличением $n_д$ (при постоянных $N_м$ и N) и с уменьшением $N_м$ (при постоянных N и $n_д$). Первая закономерность отмечалась в ельниках (Разин, 1979) и сосновых молодняках (Макаренко, 1978), вторая — в сосняках Казахского мелкосопочника (Внучков, 1976), третья связана, по-видимому, с улучшением условий освещенности биогрупп при уменьшении $N_м$ и вследствие этого — с более интенсивным взаимным проникновением крон деревьев. При прочих равных условиях, в частности при одинаковом числе деревьев в порослевом гнезде (биогруппе), густота их в расчете на единицу площади вследствие большего развития крон снижается. Таким образом, густота материнского древостоя и густота деревьев в порослевом гнезде или биогруппе находятся в прямой связи. Приведенный пример с криволинейной связью сомкнутости крон и густоты биогрупп является характерным случаем, когда использование парных связей в исследовании биологических объектов без вскрытия механизма воздействия других определяющих факторов на исследуемый процесс приводит к противоречивым и ошибочным выводам.

Опытные значения $C_{кб}$, характеристика распределения которых в возрастной динамике приведена в табл. 4.2, систематизированы по четырем факторам (A, N, $n_д$, $N_м$) в порослевых и по трем (A, N, $n_д$) — в семенных березняках и аппро-

Электронный архив УГЛТУ

Матрица средних экспериментальных значений $C_{кб}$ по различным

Густота материнского древостоя, тыс. экз./га	Густота биогруппы, тыс. экз./га								
	3,0			4,3			5,6		
	Число деревьев в биогруппе								
	2—3	4—6	7 и более	2—3	4—6	7 и более	2—3	4—6	7 и более
1,16	1,28	1,33	1,62	1,65	—	1,75	—	1,58	2,06
1,41	—	—	—	—	1,29	1,39	1,41	—	1,87
1,69	—	—	—	—	—	—	—	1,12	—
2,63	—	—	—	—	—	—	1,07	—	—
Средние значения		1,41			1,52			1,52	

ксимированы согласно зависимости $C_{кб}=f(A, N, n_д, N_м)$ степенной функцией мультипликативного вида, приведенной путем логарифмирования к линейной аддитивного вида. Получены уравнения: для порослевых березняков

$$\lg C_{кб}=0{,}0821+0{,}1623\ \lg A-0{,}09174\ \lg^2 A-0{,}1440\ \lg N_м+ \\ +0{,}1409 \lg N \lg n_д-0{,}02531 \lg A/\lg n_д; \qquad (4.24)$$

$$\sigma=\pm 0{,}056; \qquad R^2=0{,}708;$$

для семенных

$$\lg C_{кб}=-2{,}2153+2{,}8884 \lg A-0{,}9258 \lg^2 A+0{,}5427 \lg N+ \\ +0{,}0632 \lg N \lg n_д-0{,}1872 \lg N \lg A-0{,}0372 \lg A/\lg n_д; \qquad (4.25)$$

$$\sigma=\pm 0{,}074; \qquad R^2=0{,}976.$$

Таким образом, на возрастную динамику сомкнутости $C_{кб}$ накладывается дополнительно влияние густоты биогрупп, числа деревьев в биогруппе и густоты материнского древостоя в порослевых березняках и густоты биогрупп и числа деревьев в семенных. Густота материнского древостоя относится к начальным условиям, ее можно принять стабильной для всего возрастного интервала и равной, например, средней величине по пробным площадям — $N_м=1{,}67$ тыс. экз./га. Густота биогруппы и число деревьев в ней изменяются как в статике, так и в динамике, и точность нахождения сомкнутости по (4.24) и (4.25) будет определяться главным образом

Электронный архив УГЛТУ

Таблица 4.13

факторам в 17-летнем порослевом березняке

Густота биогруппы, тыс. экз./га											
6,9			8,2			10,2			12,9		
Число деревьев в биогруппе											
2—3	4—6	7 и более	2—3	4—6	7 и более	2—3	4—6	7 и более	2—3	4—6	7 и более
—	—	2,19	1,28	—	2,64	—	—	—	—	—	—
—	—	2,02	—	—	2,13	—	—	—	—	—	—
—	—	1,56	—	—	1,63	—	1,48	1,74	—	—	—
—	1,11	1,39	—	1,26	1,30	1,19	—	1,49	1,20	—	1,57
	1,65			1,71			1,48			1,38	

варьированием величин N и $n_д$. Средние траектории последних в возрастной динамике характеризуются константами уравнений для первых моментов распределения числа биогрупп по N и $n_д$ (см. табл. 4.2). Эти уравнения протабулированы по классам возраста, и найденные N и $n_д$ подставлены в уравнения (4.24) и (4.25). В итоге получены значения $C_{кб}$ для разных возрастов средних N и $n_д$.

Соотношения полученных значений $C_{кб}$ и показателей сомкнутости из табл. 4.12 представлены на рис. 22. Показатели сомкнутости крон и полога биогрупп порослевых и семенных древостоев имеют примерно одинаковую возрастную динамику, но значения $C_{кб}$ по возрастам в первых ниже, чем во вторых. Сомкнутость порослевого древостоя в целом по показателям $C_{пд}$ и $C_{кд}$ существенно ниже, чем семенного на всем возрастном интервале, и выравнивается с последней лишь к возрасту спелости. Кривые для $C_{пд}$ и $C_{кд}$ различаются также различным временем прохождения максимума: в семенных — в возрасте 10—15 лет и в порослевых — в возрасте 20—25 лет. Тем самым подтверждается вывод В. В. Кузьмичева (1980) о более раннем достижении максимальной сомкнутости древостоями большей густоты и с более равномерным размещением деревьев. Порослевые древостои недоиспользуют потенциальную производительность местообитания вследствие более низкой плотности.

Электронный архив УГЛТУ

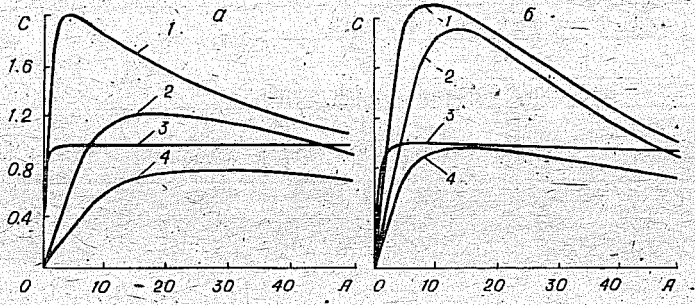


Рис. 22. Сомкнутость: 1 — крон биогрупп, 2 — крон древостоя, 3 — полога биогрупп, 4 — полога древостоя; а — в порослевых, б — в семенных березняках

4.2.3. Соотношение максимальной, оптимальной и предельной сомкнутости крон в биогруппах. Рекуррентная система уравнений (4.22) и (4.23), характеризующих связь диаметра среднего дерева биогруппы с возрастом и густотой, и уравнения (4.19), выражающего зависимость сомкнутости крон в биогруппах от возраста, густоты и диаметра среднего дерева, позволяет установить соотношения максимальной, оптимальной и предельной сомкнутостей крон. Предварительно по аналогии с прил. 7 путем последовательного табулирования (4.22) и (4.23) и затем (4.19) рассчитаны сомкнутости крон биогрупп порослевых и семенных березняков по заданным возрасту и густоте в пределах экспериментальных данных (прил. 8). С графиков, построенных по данным прил. 8, для каждой возрастной ступени сняты максимальные сомкнутости крон биогрупп и соответствующие им густоты (табл. 4.14). Затем значения оптимальной и предельной густот для $P_{др}$ (см. табл. 4.11) подставлены в рекуррентную систему уравнений для сомкнутости крон. Практически это выполнено графическим путем: названные густоты нанесены на ось абсцисс на графике, построенном по данным прил. 8, и сняты значения сомкнутости, оптимальной и предельной в аспекте продуктивности по показателю $P_{др}$ (табл. 4.14). Эти расчеты могут быть выполнены аналитически с получением более точных результатов, однако, если учитывать доверительные зоны рекуррентных регрессий, оказывается, что точность последних ниже точности не только

Таблица 4.14

Соотношение сомкнутостей крон биогрупп

Сомкнутость крон	Возраст, лет	Порослевые березняки						Семенные березняки					
		Диаметр среднего дерева											
		мин.		сред.		макс.		мин.		сред.		макс.	
		N	$C_{кб}$	N	$C_{кб}$	N	$C_{кб}$	N	$C_{кб}$	N	$C_{кб}$	N	$C_{кб}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Максимальная	10	130	2,8	150	3,0	160	3,3	130	2,2	150	3,1	160	3,9
	20	20	1,7	30	1,9	40	2,1	15	1,2	20	1,5	22	1,8
	30	8	1,5	9	1,6	12	1,7	6	1,1	8	1,3	8	1,5
	40	4	1,4	6	1,4	8	1,5	4	1,2	4	1,3	4	1,5
	50	4	1,3	5	1,3	6	1,4	3	1,3	3	1,4	3	1,5
Оптимальная	10	10	1,7 / 60	10	1,8 / 60	10	2,0 / 60	10	1,3 / 60	30	2,5 / 80	40	3,2 / 82
	20	6	1,6 / 94	6	1,7 / 89	5	1,7 / 81	3	0,9 / 75	6	1,3 / 87	10	1,7 / 94
	30	3	1,4 / 93	4	1,5 / 93	3	1,5 / 88	1	0,8 / 73	4	1,3 / 100	6	1,5 / 100
	40	2	1,3 / 92	2	1,3 / 92	2	1,3 / 87	2	1,1 / 92	3	1,3 / 100	4	1,5 / 100

Электронный архив УГЛТУ

Продолжение табл. 4.14

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
	50	2	1,1/85	2	1,1/85	2	1,0/71	3	1,3/100	3	1,4/100	3	1,5/100
Предельная	20	11	1,7/100	11	1,8/95	12	1,9/90	15	1,2/100	13	1,5/100	15	1,8/100
	30	6	1,5/100	7	1,6/100	7	1,7/100	15	1,0/91	12	1,3/100	11	1,5/100
	40	5	1,4/100	4	1,4/100	4	1,4/93	15	0,9/75	9	1,2/92	9	1,4/93

Примечание. В числителе — абсолютные значения сомкнутости, в знаменателе — в процентах от максимальной.

Электронный архив УГЛТУ

аналитически, но и графически полученных значений сомкнутости биогрупп. Данные табл. 4.14 показывают, что оптимальная сомкнутость в молодняках значительно меньше максимальной, с возрастом их значения сближаются, а в семенных березняках совпадают. Это означает, что для обеспечения максимальной продуктивности молодняков необходимо разреживать биогруппы более интенсивно (в порослевых до 10 тыс. экз./га и в семенных — до 30—40 тыс. экз./га), а с возрастом $C_{кб}$ нужно поддерживать на уровне, близком или несколько более низком по отношению к максимуму, что согласуется с выводами Л. А. Кайрюкштиса и А. И. Юодвальскиса (1976). Предельная в отношении продуктивности сомкнутость является в то же время максимально возможной в данном возрасте с незначительными отклонениями в сторону большей или меньшей густоты.

4.2.4. О соотношении продуктивности древостоя и составляющих его биогрупп. В естественных древостоях начальная густота неизвестна. Более того, в силу группового сложения древостоя она неоднозначна и варьирует по биогруппам: коэффициент вариации в 5-летнем порослевом березняке достигает 56% и с возрастом снижается до 35—40%. При рубках ухода положение каждого дерева оценивается по отношению к соседям, т. е. соблюдается локальный принцип отбора с учетом ценотической ситуации конкретной биогруппы. Эти биогруппы перераспределяются во времени и пространстве, и оценка названной ситуации вследствие постоянно меняющегося статуса биогруппы (площади, конфигурации, местоположения, степени гомогенности и др.) выполняется в статике. Таким образом, дискретный характер рубок согласуется с дискретным принципом оценки эколого-ценотической ситуации биогрупп, и знание начальной густоты естественного древостоя в практическом приложении теряет смысл.

Тем не менее, как уже отмечалось, вопрос оптимизации густоты должен решаться с учетом того соотношения, в котором находятся ее показатели на двух уровнях: биогруппы и древостоя. Исследование продуктивностных характеристик биогрупп можно рассматривать в качестве необходимого этапа, промежуточного звена между определением продуктивности дерева как частного случая биогруппы при $n_д=1$ и расчетом продуктивности древостоя как совокупности биогрупп разной (или оптимальной) густоты и непродуктивных «окон» (незаполненного кронами пространства полога). Е. Ассман

Электронный архив УГЛТУ

(Assmann, 1961) различает два показателя продуктивности, относя последнюю либо к площади проекции кроны, либо к площади роста дерева. В последнем случае показатель всегда ниже, поскольку площадь роста больше площади проекции кроны на величину площади проекции «окон», приходящейся на долю данного дерева. Исходя из этого, Е. Ассман показал, что при известном значении продуктивности всех деревьев, отнесенной к площади проекции крон, продуктивность древостоя может быть найдена умножением названного значения на показатель сомкнутости полога. Сказанное позволяет связать продуктивностные показатели биогрупп и древостоя в целом, используя известные значения сомкнутости полога древостоя $С_{пд}$ для различных возрастов, полученные по уравнению (4.1) (константы см. в табл. 4.12).

Предварительно необходимо соотнести густоты биогруппы и древостоя и, умножив значения числа деревьев на условном гектаре биогруппы (прил. 7) на показатель $С_{пд}$ для данного возраста, определить число деревьев на 1 га древостоя. Проделав аналогичную операцию с показателями $Р_{др}$, $Р_к$, G (прил. 7), в итоге получаем таблицу, в которой при заданных возрасте и сомкнутости $С_{пд}$ в зависимости от густоты древостоя приводятся значения минимальной и максимальной (теоретически возможных при минимальном и максимальном диаметрах среднего дерева биогруппы), а также средней продуктивностей древостоя.

В настоящее время ведутся исследования горизонтального размещения деревьев и их совокупностей с целью получения обобщающих закономерностей, обуславливающих продуктивность древостоев. В. В. Кузьмичев с соавт. (1979) приходят к выводу, что процессы формирования первоначальной структуры естественного древостоя и его последующего изреживания имеют в значительной степени случайный характер. Это дает основание предполагать возможность принципиально нового решения оптимизации густоты на основе методов имитационного моделирования. Названное направление может быть реализовано в три этапа: оптимизация продуктивностных характеристик биогрупп как условных микромоделей древостоев по определяющим морфометрическим показателям; выявление частотных распределений биогрупп по тем же показателям; оптимизация продуктивности древостоя на основе альтернативных оценок с использованием как полученных, так и заданных частотных распределений координатных, размерных и продуктивностных показате-

Электронный архив УГЛТУ

лей биогрупп с идентификацией результатов с имеющими место в реальных ситуациях. Накопленный опыт построения динамических имитационных моделей роста и продуктивности древесных пород на уровне дерева (Schneider, Kreysa, 1981) позволяет считать весьма перспективным подобное моделирование и на уровне биогруппы.

В разделе 3.4 показано, что фактором, определяющим предельную густоту древостоя в статике, является ассимилирующая масса. Правые ветви колоколообразных кривых зависимости массы листвы на площади древостоя от густоты (см. рис. 9, а) для различных возрастов пересекаются, образуя линию предельной густоты. Для массы ствола на площади древостоя (представляющей, в отличие от массы листвы, кумулятивный показатель) кривые не пересекаются (см. рис. 9, б), а линия предельной густоты получена путем снятия ее с рис. 9, а. В то же время кривые для массы ствола на площади биогруппы (см. рис. 19) пересекаются, образуя линию предельной густоты. Но этого не происходит, если в рекуррентной системе уравнений зависимость среднего диаметра ствола биогруппы от густоты в логарифмических координатах имеет не параболический, как на рис. 21, а линейный вид. Преимущество параболической формы установлено визуально и строго не доказано, поскольку древостой в естественном состоянии в результате самоизреживания не достигает предельной густоты, и аналитическое выражение связи $D_{бг}$—N всегда предполагает наличие экстраполяции на правом участке линий регрессии (см. рис. 21). По-видимому, это тот случай, когда при установлении оптимального вида связи (линейного или нелинейного в логарифмических координатах) нельзя обойтись без применения принципа самоорганизующихся моделей А. Г. Ивахненко (1982). Вторая возможность конкретизации вопроса предельной густоты — установление зависимостей, аналогичных представленным на рис. 19—21, для остальных фракций, в частности для листвы. Однако отсутствие приемлемых экспресс-методов для замера массы крон деревьев на достаточно больших площадях затрудняет реализацию этой возможности.

4.3. Вертикальная структура и фитонасыщенность древесного полога

Исследование вертикальной структуры и фитонасыщенности кроны дерева и древесного полога относится к фитомет-

Электронный архив УГЛТУ

рическому направлению изучения архитектоники растительного покрова (Росс, 1975). Названное направление развивается в различных целевых аспектах, из которых преобладающим в настоящее время можно назвать «энергетический». Он включает исследования, сопряженные с радиационным и водно-тепловым режимами, газообменом, продукционным процессом и т. д., то есть с комплексом явлений, определяющих лесной биогеоценоз как лабораторию, в которой происходит аккумуляция и превращение вещества и энергии (Сукачев и др., 1957). Анализ вертикальной структуры фитомассы древостоев в статике привел к выделению биогеогоризонтов по вертикальному профилю древесного полога. Такие исследования выполняются на отдельных деревьях и их совокупностях, обычно без привлечения статистических методов (Бялович, 1960; Уткин, Дылис, 1966; Дылис, Носова, 1977). Иногда наряду с количественными показателями фитомассы изучается химизм фракций по вертикальному профилю деревьев (Второва, 1982). Однако осознается и определенная доля условности в методике выделения биогеогоризонтов (Уткин и др., 1980).

Вертикальная структура и фитонасыщенность растительных сообществ изучаются в аспекте так называемых корнелистовых функциональных связей в росте и жизнедеятельности растений (Казарян, 1969), в морфогенетическом плане (Выгодская и др., 1977), при оценке ветрозащитных свойств лесных полос в агролесомелиорации (Ковалев, 1981) и при оценке акустических свойств лесного полога, играющего роль одновременно и фильтра, и резонатора звуковых частот в зависимости от области звукового спектра. Последний подход перспективен в целях как снижения общего уровня транспортного и промышленного шума при городском и ландшафтном проектировании, так и учета возможных экологических последствий урбанизации в эволюции звукового общения лесных животных (Martens, 1980). Наконец, острая потребность в изучении вертикальной структуры полога ощущается, как уже отмечалось, в связи с развивающимися аэрокосмическими методами изучения природных ресурсов на основе дистанционного зондирования земной поверхности.

Часть исследователей идет по пути формализации изучаемых закономерностей с применением математико-статистических методов, что обусловлено самой логикой процесса познания морфоструктуры дерева и лесного фитоценоза как в статике, так и в динамике (Росс, 1975; Кибзун, Ле Чонг Кук,

Электронный архив УГЛТУ

1979). При этом особого внимания заслуживают методы, исключающие деструктивный характер измерения фитомассы и фитонасыщенности деревьев, в частности, метод наклонной иглы, первоначально используемый для травостоя и сельхозкультур (Lewi, Madden, 1933; Warren Wilson, 1965), но в последние годы реализуемый на древостоях, в частности, на березе бумажной, с применением вертикальной иглы (Kinerson, 1979).

Исследование вертикальной структуры крон березы повислой выполнено нами в уже упоминающемся 45-летнем древостое порослевого происхождения. Проведено сплошное картирование 104 деревьев на площади 0,16 га. После рубки с каждого дерева получены весовые, морфометрические, физиологические, биохимические и другие характеристики (всего около 50), из которых в настоящем разделе анализируются лишь 11 весовых и морфометрических признаков. Учитывали высоту крепления на стволе каждой ветви первого порядка, ее общую длину, в том числе — облиственной части, диаметр ветви у основания и угол ее крепления, вес в свежесрубленном состоянии облиственной ветви в целом и после ощипывания листьев, а также вес мужских и женских сережек на них. Положение ветвей вдоль по стволу фиксировали на относительных высотах и для каждой их градации с шагом 0,1H вычисляли среднестатистические значения и коэффициенты вариации признаков по пяти группам рангов дерева по диаметру (Усольцев, Данченко, 1981).

Значения всех 11 признаков аппроксимированы по двум ценотическим факторам — рангу дерева по диаметру ствола R_d и относительной высоте ствола h — по следующей модели:

$$y = a_0 + a_1 h + a_2 h^2 + a_3 h^3 + a_4 h^4 + a_5 R_d + a_6 R_d^2 + a_7 h R_d + a_8 h R_d^2 + a_9 h^2 R_d + a_{10} h^2 R_d^2. \quad (4.26)$$

Характеристика (4.26) в табл. 4.15 свидетельствует о хорошем соответствии полученных моделей опытным данным. Модели (4.26) позволяют рассчитать объемы крон деревьев разного ранга, массы различных фракций дерева и дать аналитическое выражение для фитонасыщенности — плотности заполнения пространства различными фракциями фитомассы. Однако подобные аналитические выражения чересчур громоздки и в плане настоящей работы не нашли бы надлежа-

Электронный архив УГЛТУ

Показатели	Константы (в числителе) и значимость их					
	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
1	2	3	4	5	6	7
Длина ветви первого порядка l, м	—0,824	8,625 7,0	—7,763 8,4	—	—	0,0654 10,9
Длина безлистной части ветви $l_{безл}$, м	—1,272	4,296 6,7	—3,209 6,7	—	—	0,0449 6,8
Диаметр у основания ветви первого порядка D_0, см	0,321	5,693 9,5	—5,878 12,9	—	—	—
Расстояние между ветвями по оси ствола t, м	0,279	0,566 1,9	—0,866 3,9	—	—	0,0125 7,5
Угол крепления ветви первого порядка α, °	44,24	—	—	—	—	—
Масса листьев на ветви первого порядка $P_л$, кг	0,1667	—	5,4626 6,2	—	—	—0,00160 3,6
Масса ветви первого порядка $P_в$, кг	0,311	—	—	—	—	—0,146 4,2
Масса мужских сережек на ветви первого порядка $P_{мс}$, г	31,86	—202,6 2,8	361,2 3,2	—191,1 3,5	—	—
Масса женских сережек на ветви первого порядка $P_{жс}$, г	324,6	—1176 4,5	1491 4,8	—660,9 4,8	—	2,587 3,6
Диаметр ствола в коре D_l, см	9,954	—24,37 6,2	30,6 4,5	—	—15,30 4,1	0,142 5,1
Диаметр ствола без коры d_l, см	7,868	—13,07 4,7	14,25 3,0	—	—8,27 3,1	0,128 6,5

Электронный архив УГЛТУ

Таблица 4.15

уравнений (4.26)

по Стьюденту (в знаменателе)					Ошибка уравнения σ	Коэффициент детерминации R^2
a_6	a_7	a_8	a_9	a_{10}		
8	9	10	11	12	13	14
—	$\frac{-0,1183}{6,1}$	—	$\frac{0,0544}{3,7}$	—	0,12	0,986
$\frac{-0,000377}{5,9}$	$\frac{-0,0518}{5,4}$	$\frac{0,000462}{5,0}$	—	—	0,06	0,939
$\frac{0,000458}{17,8}$	—	$\frac{-0,000463}{12,7}$	—	—	0,14	0,976
—	$\frac{-0,0368}{7,0}$	—	$\frac{0,0249}{6,3}$	—	0,03	0,968
$\frac{0,00419}{5,6}$	—	$\frac{-0,00993}{3,4}$	—	$\frac{0,00512}{2,0}$	2,11	0,830
$\frac{-0,00028}{9,7}$	$\frac{0,0479}{12,5}$	$\frac{0,000716}{8,3}$	$\frac{-0,1032}{8,9}$	$\frac{-0,00043}{6,3}$	0,026	0,986
$\frac{0,00373}{8,7}$	$\frac{0,388}{3,5}$	$\frac{-0,00936}{6,5}$	$\frac{-0,260}{3,0}$	$\frac{0,00585}{5,2}$	0,37	0,964
—	—	—	$\frac{1,108}{12,1}$	$\frac{-0,0110}{9,9}$	2,25	0,910
—	$\frac{3,073}{3,1}$	$\frac{0,0401}{4,1}$	—	$\frac{-0,0428}{3,9}$	4,7	0,826
$\frac{0,00054}{2,1}$	$\frac{-0,207}{11,0}$	—	—	—	1,34	0,964
$\frac{0,000479}{2,6}$	$\frac{-0,183}{13,9}$	—	—	—	0,94	0,976

щего применения. Поэтому принят упрощенный расчет, выполненный по формуле

Электронный архив УГЛТУ

$$\Phi = P_{фр}/V_э, \qquad (4.27)$$

где Ф — фитонасыщенность кроны по показателю фитомассы, г/м³;

$P_{фр}$ — масса фракции, приходящаяся на одну ветвь 1-го порядка, г;

$V_э$ — элементарный объем кроны, т. е. объем, приходящийся на одну ветвь 1-го порядка, м³.

Для ветвей принят элементарный объем по всему сечению кроны ($V_{эо}$), а для листьев и генеративных органов — лишь объем слоя мантии кроны ($V_{эм}$), т. е. облиственной ее части без приствольной безлистной зоны (ядра кроны). Расчет элементарных объемов выполнен по формулам

$$V_{эо} = \pi (l \sin \alpha)^2 t; \qquad V_{эм} = V_{эо} - \pi (l_{безл} \sin\alpha)^2 t.$$

Все значения приведенных показателей взяты по табл. 4.15. Рис. 23 иллюстрирует неравномерность плотности распределения фракций как по вертикальному профилю, так и по рангам деревьев. Наибольшая плотность листьев приходится на высоту 0,85Н, значение ее дифференцировано по рангам. Наименьшая плотность листьев в максимально листонасыщенном горизонте соответствует низшим и высшим рангам (10 и 90), для рангов 30 и 70 она больше, максимальная плотность характерна для среднего ранга (рис. 23, а). Плотность листвы для рангов 30 и 70 составляет в максимально листонасыщенном горизонте 59—67% к ее плотности для среднего ранга, а для крайних групп рангов — 49—51%.

Изложенное означает, что наиболее эффективно используют солнечную радиацию и все факторы жизнеобеспечения в пределах пространства роста деревья среднего ранга, находящиеся в ценотически неустойчивом состоянии. Неустойчивость их статуса обусловлена действием непрерывного естественного отбора, который проявляется в дифференциации деревьев по росту и развитию, в том числе и близких по своему ранговому положению к среднему. Дальнейшая их участь определяется эффективностью использования пространства роста, в зависимости от которой они оказываются либо в подчинении, либо в доминирующем подъярусе. Но в любом случае эффективность фотосинтетической «работы» листвы снижается: у подчиненных деревьев — в силу их статуса «кандидатов на отмирание», а у лидеров — вследствие отсутст-

Электронный архив УГЛТУ

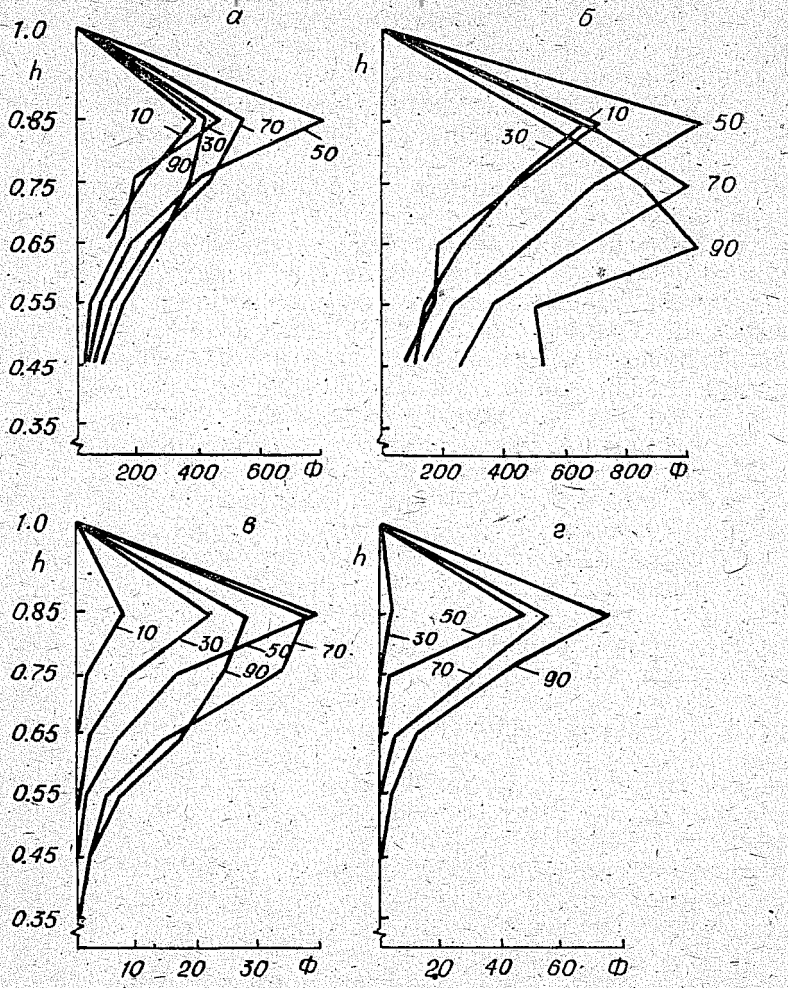


Рис. 23. Плотность заполнения кронового пространства по относительным высотам и рангам дерева: а — листьями, б — ветвями, в — мужскими и г — женскими сережками; 10, 30, ... 90 — ранг дерева по диаметру

вия серьезных конкурентов и наибольших возможностей для развития кроны. На основании изложенного можно сделать

Электронный архив УГЛТУ

предположение, что в онтоценогенезе древостоя фитонасыщенность находится в непрерывном развитии, возможно, согласуясь с динамикой перегруппировки деревьев по рангам. Этот вопрос нуждается в специальных исследованиях, которые повысят и точность учета фитомассы деревьев, и возможности прогнозирования их биопродуктивности. Полученные результаты согласуются с выводами Л. А. Кайрюкштиса (1969) о том, что хотя наиболее интенсивное накопление ассимилятов происходит у деревьев с развитым ассимиляционным аппаратом, эффективная продуктивность листвы имеет максимальные значения у деревьев не I, а II класса роста. В определенной степени согласуется с нашими результатами и вывод Д. А. Рыбинцевой (1973) для сосны Казахского мелкосопочника о том, что масса хвои по отношению к объему ветвей (и, по-видимому, к объему кроны) наибольшая у деревьев, близких по диаметру к среднему.

Е. Ассман (Assmann, 1961) в качестве критерия экономичности использования пространства роста предлагает показатель объемного прироста, отнесенный к 1 м^2 проекции кроны. Используя названный показатель, он установил, что при постоянной площади проекции кроны экономичность использования площади роста увеличивается по мере возрастания степени доминирования дерева в ценозе, но для деревьев данного класса оптимум продуктивности, отнесенной к площади роста, соответствует средним размерам кроны. Е. Ассман пришел к выводу о наличии колоколообразной кривой в последней закономерности, и хотя математически это не показано, из хода его рассуждений ясно, что названную кривую можно разложить на две монотонные с противоположными наклонами: по мере уменьшения размера (площади проекции) крон деревьев одного класса роста продуктивность, отнесенная к площади проекции кроны, увеличивается, а отношение площади проекции кроны к площади роста дерева снижается. Продуктивность по площади роста является результатом перемножения названных двух показателей и дает в итоге колоколообразную зависимость от площади проекции кроны. Аналогичная процедура разложения колоколообразной закономерности изменения суммы площадей сечения древостоя с возрастом была применена, как уже упоминалось, Г. Б. Кофманом и В. В. Кузьмичевым (1979). Независимо от того, каким образом связываются между собой составляющие закономерности — простым произведением двух зависимых переменных либо рекуррентным соотношением,

Электронный архив УГЛТУ

показанным в разделе 4.2, — возможность разложения колоколообразной кривой на составляющие имеет, видимо, всеобщий характер, и есть основания предположить, что эта процедура может оказаться результативной по отношению ко многим аналогичным биологическим закономерностям.

Максимальное насыщение кронового пространства ветвями (без листьев и генеративных органов) у деревьев ранга ниже среднего соответствует, как и для листвы, высоте 0,85H и нарастает с повышением ранга (см. рис. 23, б). При дальнейшем его увеличении фитонасыщенность ветвей остается на достигнутом уровне, но пик ее смещается вниз: для ранга 70 — на высоту 0,75H и для ранга 90 — на высоту 0,65H, т. е. у наиболее крупных деревьев отмирание нижней части кроны вследствие лучших условий роста происходит с наименьшей интенсивностью. Максимальная плотность заполнения кронового пространства генеративными органами приходится на высоту 0,85H и с повышением ранга дерева закономерно возрастает (см. рис. 23, в, г). Однако показатель плотности заполнения кроны для мужских сережек у деревьев ранга 90 снижается в большей мере, чем для рангов 70 и 50, по-видимому, по той же причине, что и показатель плотности листьев. Это подтверждается высокой коррелятивной связью массы мужских сережек с массой листвы ($R = 0{,}740 > R_{01}$), закладка их; как и листвы, программируется в предыдущем вегетационном периоде, и формируются они совместно под влиянием комплекса экологических условий. Массы женских сережек и листвы в год проведения исследований также были тесно скоррелированы ($R = 0{,}789$). Очевидно, такая связь будет проявляться не ежегодно, поскольку условия внешней среды оказывают большее влияние на формирование первого признака, хотя количество женских сережек, как и листьев, также программируется в предшествующем году.

При расчленении вертикального профиля лесного фитоценоза на биогеогоризонты их горизонтальные проекции подразделяются на зоны более или менее интенсивного образования фитомассы, как это показано на рис. 23 для отдельных рангов дерева. По вертикальному профилю ценоза в целом эти зоны не совпадают, и их абсолютная высота дифференцируется по рангам дерева. Фитонасыщенность полога древостоя может быть определена с использованием интегральной кривой распределения деревьев по толщине и соотношения высот и диаметров деревьев.

Электронный архив УГЛТУ

Таким образом, фракции фитомассы кроны различаются не только степенью чувствительности на изменения эколого-ценотических условий, обусловленной их функциональными различиями и взаимосвязями, но и характером реакции на эти изменения, который в конечном итоге находит отражение в количественных показателях фитомассы. Для повышения надежности прогнозирования биопродуктивности дерева необходимо изыскивать возможность количественного выражения не только для пространства его роста, но и для ценотического окружения с определенной ретроспективной коррекцией.

Установление аналогичных зависимостей для древостоев различного возраста и разных типов горизонтальной структуры в дальнейшем создает предпосылку для моделирования возрастной динамики пространственной структуры древесного полога лесных фитоценозов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В условиях постоянно растущего потока информации снижается коэффициент ее использования, что является фактором, сдерживающим темпы научно-технического прогресса. В этих условиях стихийные исследования уступают место системным, комплексным, а период накопления эмпирических данных сменяется этапом обобщающих теоретических исследований. Это относится и к лесоводственной науке как разделу биологии. Математическое моделирование биопродукционных процессов в лесных фитоценозах предстает, таким образом, в роли единственной разумной альтернативы создавшейся в известной степени кризисной ситуации. В то же время оно является составной частью моделирования и прогнозирования на более высоком и обширном уровне биосферных процессов.

По мере совершенствования техники и технологии лесозаготовительного и лесоперерабатывающего производств и научно-технического прогресса в целом, истощения ископаемых источников энергии и необходимости эффективного использования возобновляемых ее источников, обострения ситуации с обеспечением человека пищей животного и растительного происхождения эффективно используемая продукция леса будет все более приближаться к биологической продукции. Тогда на повестку дня лесоводственной науки встанет необходимость создания устойчивых и высокопродуктивных лесо-

Электронный архив УГЛТУ

экологических комплексов, обеспечивающих постоянное продуцирование фито- и биомассы в условиях интенсивной антропогенной нагрузки.

Математическое моделирование и прогнозирование биопродукционного процесса лесного фитоценоза, помимо общетеоретического, имеет и чисто прикладное значение. Наша страна располагает наибольшими в мире лесными ресурсами. Долгое время бытовало мнение о неисчерпаемости наших лесных богатств, особенно сибирских лесов, которое в настоящее время уже не является неоспоримым. Хотя центр тяжести лесозаготовок все более перемещается в необжитые районы Восточной Сибири, подобный экстенсивный путь развития лесохозяйственно-промышленного комплекса не удовлетворяет все возрастающей потребности народного хозяйства в лесопродукции. Он характеризуется низким уровнем использования фитомассы лесов и повышением лесоэксплуатационных и транспортных затрат по мере удаления районов заготовок от основных лесопотребителей. Все более актуальным становится переход на интенсивный путь развития лесопользования, предусматривающий полное использование всей фитомассы деревьев на основе совершенствования структуры лесохозяйственно-промышленного комплекса. В этой связи требуется актуализация действующих нормативов по учету древесных запасов с ориентацией их на оценку всей фитомассы древостоев.

Приведенный в книге материал иллюстрирует возможности применения современных математических методов и средств в исследовании структуры и динамики фитомассы древостоев и составлении нормативов ее учета. Множественный регрессионный анализ показал, что основные показатели фитомассы — количественные, качественные и морфометрические, а также соотношения надземных и подземных фракций — определяются, в основном, набором одних и тех же факторов — онтогенетического, эдафического (экологического), ценотических. Глобальный характер воздействия названных факторов на структуру фитомассы определяет возможность и необходимость исследования таких воздействий на биопродукционный процесс фитоценоза с целью его оптимизации. Лесная фитомасса аккумулирует ретроспективную информацию о реакции фитоценоза на воздействия экзо- и эндогенных факторов в пространстве и времени, и овладение методами расшифровки этой информации является необходимым условием для оптимизации названного процесса.

Электронный архив УГЛТУ

Анализ продуктивности древостоев, выполненный на уровне биогрупп, позволил выявить оптимальные диапазоны числа деревьев и сомкнутости крон, обеспечивающие максимальную фитомассу на единице площади, а исследование фитонасыщенности крон по вертикальному профилю деревьев различного ценотического положения показало эффективность использования пространства роста деревьями в связи с их положением в пологе. Результаты изучения продуктивностных характеристик деревьев и древостоев с учетом их горизонтальной и вертикальной структур могут найти применение при разработке программ рубок ухода. Они дают придержки для формирования биогрупп оптимальной плотности путем отбора в рубку наименее перспективных деревьев, характеризуемых низкой эффективностью использования пространства роста.

Совершенствование методов учета и прогнозирования лесных ресурсов на основе применения математических методов вряд ли потеряет когда-либо свою актуальность. Предложенные в книге подходы к моделированию структуры и динамики фитомассы древостоев и результаты этого моделирования, представленные в виде таблиц учета фитомассы, могут быть полезны в современном лесоустройстве и в перспективном централизованном планировании комплексного освоения лесов, при котором в оптимальных соотношениях будут реализованы все «весомые» и «невесомые» полезности лесных фитоценозов.

Электронный архив УГЛТУ

Приложение 1

Объем ветвей березы в 0,0001 м³ (числитель — общий объем, знаменатель — при диаметре 3 см в верхнем сечении)

Диаметр у основания ветви, см	Длина ветви, м									
	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0	10,0	11,0
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
2,0	2,65	4,20	5,50	—	—	—	—	—	—	—
3,0	5,43	8,65	11,2	—	—	—	—	—	—	—
4,0	—	14,7 9,04	19,4 11,9	26,1 16,0	—	—	—	—	—	—
5,0	—	21,8 17,7	28,6 23,2	38,6 31,3	47,1 38,2	—	—	—	—	—
6,0	—	37,1 33,4	48,8 43,9	60,0 54,0	72,4 65,2	—	—	—	—	—
7,0	—	—	55,2 51,6	74,6 69,8	90,8 84,9	106 99,1	123 115	—	—	—
8,0	—	—	—	96,2 91,9	118 113	137 131	158 151	—	—	—
9,0	—	—	—	120 117	146 142	171 166	194 189	223 217	—	—
10,0	—	—	—	—	178 174	209 205	240 235	272 267	—	—
11,0	—	—	—	—	215 212	252 249	291 287	328 324	367 362	—
12,0	—	—	—	—	—	297 294	342 338	387 383	432 427	475 470
13,0	—	—	—	—	—	352 349	405 401	457 453	511 506	562 557
14,0	—	—	—	—	—	433 430	499 495	564 559	630 625	692 686

Электронный архив УГЛТУ

Надземная фитомасса березы и осины в свежесрубленном состоянии, кг на дерево

Диаметр ствола, см	Высота ствола, м	Фитомасса						
		древесная зелень		ветви		ствол		Итого
		всего	в т. ч. листья	всего	в т. ч. кора	всего	в т. ч. кора	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Береза								
I разряд высоты								
8	14,7	2,73	1,73	2,58	1,23	36,17	9,01	41,48
16	19,7	12,63	8,01	22,72	8,64	177,5	35,1	212,85
24	22,0	27,50	17,4	70,60	23,3	414,7	82,5	512,80
32	23,2	46,65	29,6	159,8	47,5	736,9	166,5	943,35
40	23,9	69,11	43,8	287,6	73,0	1114	284,1	1470,71
II разряд высоты								
8	13,3	2,42	1,53	2,31	1,10	31,95	7,95	36,68
16	17,8	11,35	7,20	20,12	7,65	154,2	30,5	185,67
24	19,9	25,57	16,2	65,07	21,5	359,2	71,5	449,84
32	21,1	44,19	28,0	144,2	42,9	633,3	143,1	821,69
40	21,7	66,73	42,3	261,1	66,3	955,7	243,7	1283,53
III разряд высоты								
8	11,9	2,14	1,36	2,06	0,98	28,22	7,03	32,42
16	15,9	10,21	6,47	17,82	6,77	132,3	26,2	160,33
24	17,8	23,59	15,0	57,97	19,1	306,6	61,0	388,16
32	18,9	41,76	26,5	126,9	37,7	540,4	122,1	709,06
40	19,4	64,31	40,8	236,1	59,9	814,7	207,7	1115,11
IV разряд высоты								
8	10,5	1,90	1,20	1,85	0,88	24,93	6,21	28,68
16	14,0	9,18	5,82	15,78	6,0	113,6	22,5	138,66
24	15,7	21,77	13,8	51,65	17,0	261,6	52,0	335,02
32	16,6	39,36	25,0	115,8	34,4	457,6	103,4	612,76
Осина								
I разряд высоты								
8	14,7	0,72	0,50	1,71	0,88	34,44	8,16	36,87
16	19,7	6,56	4,59	11,20	5,31	165,9	29,4	183,66
24	22,0	18,91	13,2	44,28	18,2	389,6	61,9	452,79
32	23,2	34,44	24,1	126,5	44,5	707,3	119,5	868,24
40	23,9	49,90	34,9	300,2	95,9	1094	209,0	1444,1

Электронный архив УГЛТУ

1	2	3	4	5	6	7	8	9
				II разряд высоты				
8	13,3	0,87	0,61	2,08	1,08	31,25	7,41	34,20
16	17,8	7,48	5,24	13,36	6,33	146,1	25,9	166,94
24	19,9	20,15	14,1	50,09	20,6	344,1	54,7	414,34
32	21,1	35,01	24,5	139,0	48,9	617,7	104,4	791,71
40	21,7	48,62	34,0	320,1	102,3	951	181,6	1319,72
				III разряд высоты				
8	11,9	1,04	0,73	2,54	1,31	28,34	6,72	31,92
16	15,9	8,52	5,96	16,85	7,98	128,6	22,8	153,97
24	17,8	21,60	15,1	57,38	23,6	299,8	47,7	378,78
32	18,9	35,62	24,9	153,6	54,0	536,2	90,6	725,42
40	19,4	47,32	33,1	343,0	109,6	822,0	157,0	1212,32
				IV разряд высоты				
8	10,5	1,25	0,87	3,09	1,60	25,72	6,10	30,06
16	14,0	9,71	6,80	19,01	9,01	113,2	20,0	141,92
24	15,7	23,15	16,2	65,73	27,0	261,3	41,5	350,18
32	16,6	36,27	25,4	170,3	59,9	462,3	78,1	668,87

Приложение 3

Надземная фитомасса белого саксаула в свежесрубленном состоянии, кг на дерево

Диаметр ствола у шейки корня, см	Высота, м	Процент товарной массы	Надземная масса при диаметре кроны, м					
			1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0
1	2	3	4	5	6	7	8	9
				I разряд высоты				
4	2,1	26	2,8	6,4	10,4	—	—	—
6	2,4	32	4,0	8,9	14,7	—	—	—
8	2,6	36	5,0	11,6	18,8	—	—	—
10	2,8	40	—	13,9	22,7	32,0	—	—
12	3,0	44	—	16,4	26,7	37,7	—	—

Электронный архив УГЛТУ

1	2	3	4	5	6	7	8	9
14	3,1	47	—	18,6	30,3	42,8	—	—
16	3,3	49	—	21,0	34,1	48,2	—	—
18	3,5	51	—	23,5	38,2	53,9	—	—
20	3,6	52	—	—	41,4	58,5	76,4	—
22	3,7	53	—	—	44,8	63,3	82,7	—
24	3,8	54	—	—	48,1	68,0	88,8	—
26	3,8	55	—	—	51,0	72,1	94,2	—
28	3,8	56	—	—	53,8	75,9	99,2	123
30	3,8	56	—	—	—	79,4	104	129
			II разряд высоты					
4	1,7	26	2,4	5,5	8,9	—	—	—
6	1,9	32	3,4	7,7	12,6	—	—	—
8	2,1	36	4,3	9,9	16,1	—	—	—
10	2,2	40	—	11,9	19,4	27,0	—	—
12	2,4	44	—	14,0	22,8	32,2	—	—
14	2,5	47	—	15,9	25,9	36,6	—	—
16	2,6	49	—	18,0	29,1	41,2	—	—
18	2,8	51	—	—	32,6	46,0	60,0	—
20	2,8	52	—	—	35,3	49,9	65,2	—
22	2,9	53	—	—	38,2	54,0	70,5	—
24	3,0	54	—	—	41,1	58,0	75,8	—
26	3,0	55	—	—	43,5	61,5	80,4	—
28	3,1	56	—	—	—	64,8	84,6	105
			III разряд высоты					
4	1,3	26	2,0	4,7	7,6	—	—	—
6	1,5	32	2,9	6,6	10,7	—	—	—
8	1,7	36	3,7	8,4	13,7	—	—	—
10	1,8	40	4,5	10,1	16,5	—	—	—
12	1,9	44	—	11,9	19,4	27,4	—	—
14	2,0	47	—	13,6	22,1	31,2	—	—
16	2,1	49	—	15,0	24,9	35,1	—	—
18	2,2	51	—	17,0	27,8	39,2	—	—
20	2,3	52	—	—	30,1	42,6	55,6	—
22	2,3	53	—	—	32,6	46,1	60,2	—
24	2,4	54	—	—	35,0	49,5	64,7	—
26	2,4	55	—	—	—	52,5	68,6	85,4

Электронный архив УГЛТУ

Надземная фитомасса березовых и осиновых древостоев в абсолютно сухом состоянии, т/га

Возраст, лет	Высота, м	Диаметр, см	Число стволов на 1 га	Сумма площадей сечения, м²/га	Фитомасса					
					ствол		ветви		листья	итого
					древесина	кора	древесина	кора		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Береза										
Полнота 1,0										
I класс бонитета										
20	10,9	9,7	2639	19,5	44,8	11,6	6,2	5,1	4,2	71,9
30	16,1	14,4	1535	25,0	79,2	17,9	10,4	7,0	4,8	119,3
40	19,7	18,5	1064	28,6	109,6	23,3	15,3	8,9	5,3	162,4
50	22,3	22,0	816	31,1	132,9	27,7	20,4	10,5	5,8	197,3
60	24,2	25,0	664	32,6	148,9	31,1	25,3	11,8	6,2	223,3
70	25,6	27,7	558	33,6	158,5	33,7	29,8	12,8	6,5	241,3
80	26,7	30,1	481	34,2	162,7	35,5	33,6	13,5	6,8	252,1
II класс бонитета										
20	9,2	8,0	3461	17,4	32,6	9,1	4,5	3,9	3,3	53,4
30	13,6	12,0	1963	22,2	57,7	14,0	7,5	5,4	3,8	88,4
40	16,7	15,4	1363	25,4	79,8	18,2	11,1	6,8	4,2	120,1
50	19,0	18,3	1053	27,7	96,8	21,6	14,8	8,0	4,5	145,7
60	20,5	20,9	851	29,2	108,4	24,3	18,3	9,0	4,8	164,8
70	21,7	23,1	723	30,3	115,4	26,3	21,5	9,7	5,1	178,0
80	22,5	25,1	629	31,1	118,5	27,7	24,3	10,3	5,4	186,2
III класс бонитета										
20	7,6	6,4	4849	15,6	22,5	6,8	3,1	2,8	2,5	37,7
30	11,3	9,5	2794	19,7	39,8	10,4	5,2	3,9	2,9	62,2
40	14,0	12,2	1925	22,5	55,1	13,6	7,6	4,9	3,2	84,4
50	15,9	14,5	1484	24,5	66,8	16,2	10,1	5,8	3,4	102,3
60	17,3	16,5	1211	25,9	74,8	18,2	12,5	6,5	3,7	115,7
70	18,3	18,2	1034	26,9	79,6	19,6	14,7	7,1	3,9	124,9
80	18,9	19,8	900	27,7	81,8	20,7	16,6	7,5	4,0	130,6
IV класс бонитета										
20	6,4	4,8	7624	13,8	14,4	4,8	1,9	1,9	1,8	24,8
30	9,3	7,2	4151	16,9	25,4	7,4	3,2	2,6	2,0	40,6
40	11,4	9,2	2888	19,2	35,1	9,6	4,8	3,3	2,2	55,0
50	12,9	10,9	2251	21,0	42,6	11,4	6,4	3,9	2,4	66,7
60	14,0	12,5	1826	22,4	47,7	12,8	7,9	4,4	2,6	75,4
70	14,8	13,9	1556	23,6	51,2	13,8	9,3	4,8	2,8	81,9
80	15,4	15,0	1387	24,5	52,2	14,6	10,5	5,1	2,9	85,3

Электронный архив УГЛТУ

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
					Полнота 0,5					
					I класс бонитета					
20	10,9	15,7	501	9,7	32,8	6,1	3,2	3,2	2,2	47,5
30	16,1	23,3	292	12,5	58,0	9,4	5,3	4,5	2,5	79,7
40	19,7	30,0	202	14,3	80,2	12,2	7,9	5,7	2,7	108,7
50	22,3	35,7	155	15,5	97,3	14,5	10,5	6,7	3,0	132,0
60	24,2	40,6	126	16,3	109	16,3	13,0	7,5	3,2	149,0
70	25,6	44,9	106	16,8	116	17,6	15,3	8,1	3,3	160,3
80	26,7	48,9	91	17,1	119	18,6	17,2	8,6	3,5	166,9
					II класс бонитета					
20	9,2	13,0	658	8,7	23,9	4,7	2,3	2,4	1,7	35,0
30	13,6	19,5	373	11,1	42,2	7,3	3,9	3,4	2,0	58,8
40	16,7	25,0	259	12,7	58,4	9,5	5,7	4,3	2,2	80,1
50	19,0	29,6	200	13,8	70,8	11,3	7,6	5,1	2,3	97,1
60	20,5	33,9	162	14,6	79,4	12,7	9,4	5,7	2,5	109,7
70	21,7	37,4	137	15,1	84,5	13,8	11,0	6,2	2,6	118,1
80	22,5	40,5	120	15,5	86,7	14,5	12,5	6,5	2,8	123,0
					III класс бонитета					
20	7,6	10,4	921	7,8	16,5	3,5	1,6	1,8	1,3	24,7
30	11,3	15,3	531	9,8	29,1	5,5	2,6	2,5	1,5	41,2
40	14,0	19,7	366	11,2	40,3	7,1	3,9	3,1	1,6	56,0
50	15,9	23,5	282	12,2	48,9	8,5	5,2	3,7	1,8	68,1
60	17,3	26,7	230	12,9	54,7	9,5	6,4	4,1	1,9	76,6
70	18,3	29,5	196	13,4	58,3	10,3	7,5	4,5	2,0	82,6
80	18,9	32,0	171	13,8	59,8	10,8	8,5	4,7	2,1	85,9
					IV класс бонитета					
20	6,4	7,8	1449	6,9	10,5	2,5	1,0	1,2	0,9	16,1
30	9,3	11,6	789	8,4	18,6	3,8	1,7	1,7	1,0	26,8
40	11,4	14,9	549	9,6	25,7	5,0	2,5	2,1	1,1	36,4
50	12,9	17,7	428	10,5	31,2	6,0	3,3	2,5	1,2	44,2
60	14,0	20,3	347	11,2	35,0	6,7	4,0	2,8	1,3	49,8
70	14,8	22,5	296	11,8	37,2	7,2	4,8	3,0	1,4	53,6
80	15,4	24,3	263	12,2	38,2	7,6	5,4	3,2	1,5	55,9
					Осина					
					Полнота 1,0					
					Iа класс бонитета					
10	7,2	5,7	6308	16,4	15,6	4,4	2,6	3,7	2,4	28,7
20	13,9	10,6	3034	26,7	59,0	11,8	6,2	6,0	3,4	86,4
30	18,0	16,0	1597	32,1	102	17,6	10,2	6,5	3,6	140,9
40	20,8	21,5	972	35,3	131	20,8	14,6	8,7	3,5	178,6
50	22,7	27,1	646	37,3	144	21,9	19,3	9,8	3,3	198,3

Электронный архив УГЛТУ

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
					I класс бонитета					
10	6,3	4,1	11231	14,6	13,7	3,9	2,3	3,2	2,2	25,3
20	12,4	9,8	3213	24,1	49,8	10,2	5,5	5,3	3,1	73,9
30	16,4	15,4	1591	29,6	84,2	14,9	9,2	6,9	3,3	118,5
40	19,3	20,9	971	33,3	106	17,4	13,6	8,4	3,2	148,6
50	21,4	26,2	668	36,0	115	18,1	18,7	9,8	3,0	164,6
					II класс бонитета					
10	5,0	3,1	16375	13,1	11,8	3,4	2,0	2,8	1,9	21,9
20	10,1	7,4	4907	21,1	41,1	8,6	4,7	4,5	2,8	61,7
30	13,8	12,4	2140	25,9	67,6	12,3	8,2	6,2	2,9	97,2
40	16,6	18,3	1118	29,4	83,5	14,1	12,6	8,0	2,8	121,0
50	18,8	25,3	636	32,0	89,7	14,2	18,1	9,9	2,7	134,6
					III класс бонитета					
20	7,9	5,7	6769	17,6	32,7	7,0	4,0	3,8	2,4	49,9
30	11,3	11,6	2047	21,7	52,2	9,8	7,2	5,5	2,6	77,3
40	13,9	17,5	1033	24,8	63,1	11,1	11,6	7,5	2,6	95,8
50	16,0	22,8	671	27,4	66,6	11,2	17,4	10,0	2,4	107,6
					Полнота 0,5					
					Iа класс бонитета					
10	7,2	7,1	2082	8,2	4,3	1,2	1,8	1,8	2,8	11,9
20	13,9	13,0	1001	13,3	16,3	3,1	4,3	3,0	2,5	29,2
30	18,0	19,6	527	16,0	28,2	4,7	7,1	3,8	2,0	45,8
40	20,8	26,4	321	17,6	36,1	5,6	10,2	4,4	1,6	57,9
50	22,7	33,3	213	18,6	39,8	5,9	13,4	4,9	1,3	65,3
					I класс бонитета					
10	6,3	5,0	3706	7,3	3,8	1,0	1,6	1,6	2,5	10,5
20	12,4	12,0	1060	12,0	13,8	2,7	3,7	2,6	2,2	25,0
30	16,4	18,9	525	14,8	23,2	4,0	6,3	3,4	1,8	38,7
40	19,3	25,7	320	16,6	31,6	4,9	9,2	4,0	1,3	51,0
50	21,4	32,3	220	18,0	37,0	4,9	12,8	4,8	1,2	60,7
					II класс бонитета					
10	5,0	3,9	5404	6,5	3,3	0,9	1,3	1,3	2,2	9,0
20	10,1	9,1	1619	10,5	11,3	2,3	3,1	2,2	2,0	20,9
30	13,8	15,2	706	12,9	18,7	3,3	5,5	3,0	1,6	32,1
40	16,6	22,5	369	14,7	23,1	3,8	8,4	3,8	1,3	40,4
50	18,8	31,1	210	16,0	24,8	3,9	12,1	4,8	1,1	46,7
					III класс бонитета					
20	7,9	7,1	2234	8,8	9,0	1,9	2,6	1,8	1,7	17,0
30	11,3	14,3	675	10,8	14,4	2,7	4,6	2,6	1,4	25,7
40	13,9	21,5	341	12,4	17,4	3,0	7,5	3,5	1,1	32,5
50	16,0	28,1	221	13,7	18,4	3,1	11,3	4,7	0,9	38,4

Электронный архив УГЛТУ

Надземная фитомасса сосны в абсолютно сухом состоянии, кг на дерево

Возраст, лет	Ступени толщины, см	Сухие сосняки				Свежие сосняки			
		фитомасса							
		ствол	ветви	хвоя	итого	ствол	ветви	хвоя	итого
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
40	4	2,4	0,29	0,36	3,05	2,0	0,14	0,08	2,22
	8	8,6	1,02	1,26	10,88	9,8	0,82	0,48	11,1
	12	18,2	2,14	2,65	22,99	24,8	2,36	1,35	28,51
	16	31,2	3,62	4,47	39,29	47,8	4,96	2,84	55,6
50	4	2,4	0,38	0,38	3,16	2,0	0,15	0,08	2,23
	8	9,3	1,12	1,24	11,66	10,4	0,90	0,49	11,79
	12	20,7	2,12	2,48	25,3	27,1	2,60	1,37	31,07
	16	36,3	3,32	4,07	43,69	53,2	5,52	2,86	61,58
60	8	9,9	1,36	1,31	12,57	10,7	0,96	0,50	12,16
	12	22,7	2,31	2,52	27,53	28,3	2,77	1,39	32,46
	16	40,8	3,36	4,00	48,16	56,5	5,87	2,85	65,22
	20	64,3	4,49	5,72	74,51	96,6	10,5	4,98	112,08
70	8	10,4	1,83	1,50	13,73	10,8	1,01	0,53	12,34
	12	24,4	2,79	2,75	29,94	28,9	2,9	1,41	33,21
	16	44,7	3,76	4,24	52,7	58,3	6,1	2,82	67,22
	20	71,5	4,74	5,92	82,16	100	10,8	4,83	115,63

Электронный архив УГЛТУ

Эскизы таблиц биопродуктивности сосняков

Возраст, лет	Высота, м	Диаметр, см	Число стволов, тыс. экз./га*	Сумма площадей сечения, м²/га	Фитомасса в абсолютно сухом состоянии, т/га					
					ствол	ветви	хвоя	итого	изменение фитомассы	
									среднее	текущее
Сухие сосняки										
20	3,8	2,3	32,3/26,1	10,2	25,8	2,2	4,3	32,3	1,6	—
30	4,9	3,1	24,0/22,7	17,3	39,0	4,4	6,5	49,9	1,7	1,8
40	5,9	3,9	18,8	22,6	48,4	5,8	7,2	61,4	1,5	1,2
50	6,9	4,7	15,1	26,6	54,0	7,0	7,5	68,5	1,4	0,7
60	7,9	5,7	11,8	29,7	61,1	8,7	8,1	77,9	1,3	0,9
70	8,9	6,7	9,1	32,0	67,5	12,1	9,3	88,9	1,3	1,1
Свежие сосняки										
40	9,9	8,8	4,13	25,1	53,7	4,6	2,7	61,0	1,5	—
50	12,6	11,7	2,64	28,4	69,9	7,0	3,6	80,5	1,6	1,9
60	14,9	14,7	1,91	31,1	86,6	9,1	4,4	100,1	1,7	2,0
70	16,9	17,0	1,46	33,2	103,0	11,0	4,8	118,8	1,7	1,9
80	18,6	19,5	1,17	35,0	119,0	12,7	5,3	137,0	1,7	1,8
90	19,9	22,0	0,99	36,5	135,0	14,3	5,5	154,8	1,7	1,8
100	21,1	24,3	0,84	37,7	147,0	15,1	5,4	167,5	1,7	1,3

* В числителе — число стволов всего, в знаменателе — высотой 1,3 м и более.

Электронный архив УГЛТУ

Зависимость продуктивностных показателей биогрупп березняков от возраста и густоты

Возраст, лет	Густота биогрупп, тыс. экз./га	$P_{др}$			$P_к$			G		
		Диаметр среднего дерева								
		мин.	сред.	макс.	мин.	сред.	макс.	мин.	сред.	макс.
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
					Порослевые березняки					
10	2	2,9	4,6	7,5	0,9	1,4	2,3	3,5	4,8	7,0
	5	7,0	10,4	16,5	2,1	3,1	4,8	5,8	8,2	12,0
	10	8,8	12,8	19,6	2,7	3,8	5,5	6,9	9,8	14,5
	20	8,1	11,5	16,9	2,6	3,5	4,8	6,7	9,6	14,4
	40	5,7	7,9	11,2	2,1	2,7	3,5	5,2	7,6	11,6
	70	3,6	4,9	6,8	1,6	1,9	2,4	3,6	5,3	8,2
30	1	10,8	20,1	37,8	3,2	6,0	11,3	7,4	10,7	15,7
	2	25,4	45,1	83,3	7,0	12,2	22,1	12,4	18,1	27,2
	4	30,0	51,3	90,4	7,8	12,9	22,0	14,4	21,4	32,3
	6	24,7	41,5	72,0	6,4	10,4	17,1	13,1	19,5	29,7
	10	15,0	24,5	41,2	4,2	6,4	10,1	9,4	14,1	21,7
50	0,5	7,4	15,1	30,6	2,2	4,6	9,6	5,5	8,1	11,8
	1	54,3	104,1	205,8	15,0	28,9	57,0	16,7	24,3	36,2
	2	81,8	155,0	291,3	20,5	37,9	69,8	22,9	34,4	51,3
	3	56,6	102,4	190,3	13,8	24,2	43,6	19,1	28,4	43,0
	6	11,6	20,6	36,9	3,2	5,3	9,1	6,8	10,4	15,9
					Семенные березняки					
10	2	4,9	4,6	4,4	1,3	1,2	1,2	2,8	3,3	3,6
	5	4,8	7,1	9,0	1,3	1,9	2,4	3,3	5,1	6,7
	10	5,0	10,3	16,3	1,4	2,7	4,2	3,9	7,4	11,0
	20	4,6	13,2	25,9	1,4	3,6	6,6	4,4	10,0	17,0
	40	3,3	13,2	32,1	1,1	3,7	8,3	4,2	11,7	22,7
	70	1,9	10,0	28,2	0,7	3,0	7,7	3,4	11,4	24,0
30	1	24,3	29,4	33,6	5,4	5,9	6,3	8,3	10,3	12,1
	2	24,0	37,0	50,1	5,6	7,7	9,5	9,9	14,3	18,5
	4	21,6	42,7	69,0	5,7	9,6	14,0	11,1	18,6	26,7
	6	17,3	39,5	70,6	5,0	9,7	15,4	10,7	19,5	29,9
	10	9,9	27,0	54,5	3,4	7,8	13,7	8,6	17,5	28,8
50	0,5	66,3	70,2	76,1	10,6	10,7	10,8	15,3	16,4	17,9
	1	86,1	99,4	121,0	13,4	14,6	16,4	22,6	25,4	29,8
	2	115,6	144,4	198,3	19,0	22,2	27,7	33,2	39,1	49,4
	3	112,8	151,3	219,3	20,4	25,4	33,3	36,5	45,0	58,6
	6	59,0	86,1	138,7	14,4	19,3	27,9	29,3	38,0	52,7

Электронный архив УГЛТУ

Приложение 8

Зависимость сомкнутости крон биогрупп березняков от возраста и густоты

Возраст, лет	Густота биогрупп, тыс. экз./га	Порослевые березняки			Семенные березняки		
		диаметр среднего дерева					
		мин.	средн.	макс.	мин.	средн.	макс.
10	2	1,10	1,22	1,35	0,60	0,68	0,74
	5	1,41	1,54	1,69	0,97	1,16	1,29
	10	1,65	1,80	1,96	1,33	1,64	1,87
	20	1,91	2,07	2,25	1,71	2,18	2,54
	40	2,20	2,38	2,58	2,05	2,69	3,21
	70	2,45	2,65	2,89	2,22	3,00	3,63
30	1	1,20	1,25	1,30	0,77	0,86	0,92
	2	1,34	1,39	1,43	0,95	1,08	1,18
	4	1,45	1,52	1,57	1,08	1,25	1,40
	6	1,49	1,58	1,65	1,11	1,31	1,47
	10	1,48	1,60	1,70	1,08	1,30	1,48
50	0,5	1,00	1,00	0,97	0,94	0,97	1,02
	1	1,07	1,03	0,97	1,16	1,21	1,28
	2	1,18	1,15	1,09	1,31	1,38	1,48
	3	1,27	1,26	1,22	1,33	1,41	1,52
	6	1,21	1,30	1,37	1,21	1,29	1,40

ЛИТЕРАТУРА

Адлер Ю. П., Маркова Е. В., Грановский Ю. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: Наука, 1976.

Антанайтис В. В. Математические модели текущего прироста некоторых древесных пород. — Лесн. хоз-во, 1971, № 2, с. 49—52.

Антанайтис В. В. Моделирование производительности древостоев в целях мониторинга лесов. — В кн.: Моделирование и контроль производительности древостоев. Каунас: изд. ЛитСХА, 1983, с. 6—8.

Антанайтис В. В., Загреев В. В. Прирост леса. М.: Лесн. пром-сть, 1969.

Анучин Н. П. Лесная таксация. М.: Лесн. пром-сть, 1977.

Березюк И. Е. О густых посадках лесокультур. — Науч. тр./КазНИИЛХА, 1959, т. II, с. 40—49.

Электронный архив УГЛТУ

Биологическая продуктивность лесов Поволжья/Под ред. С. Э. Вомперского. М.: Наука, 1982.

Бирюков В. Н. Группы типов леса Казахстана. Алма-Ата: Кайнар, 1982.

Бирюкова З. П. Об экологической обусловленности зимостойкости сосны обыкновенной в Северном Казахстане. — В кн.: Леса и древес. породы Сев. Казахстана. Л.: Наука, 1974, с. 97—103.

Бузыкин А. И. Уровни регулирования продуктивности лесов. — В кн.: Агрофизич. исслед. почв Средней Сибири. Красноярск: изд. ИЛиД СО АН СССР, 1975, с. 19—26.

Бузыкин А. И., Пшеничникова Л. С. Формирование сосново-лиственных молодняков. Новосибирск: Наука, 1980.

Бусленко Н. П. Моделирование сложных систем. М.: Наука, 1968.

Бяллович Ю. П. Биогеоценотические горизонты. — Бюл. МОИП, 1960, т. 65, № 3, с. 43—60.

Ватковский О. С. Анализ формирования первичной продуктивности лесов. М.: Наука, 1976.

Вейисов С., Каплин В. Г. К методике определения надземной фитомассы белого саксаула в Восточных Каракумах. — Пробл. освоения пустынь, 1976, № 1, с. 60—64.

Внучков В. Т. Горизонтальная структура древостоев сосны Казахского мелкосопочника. — Лесоведение, 1976, № 5, с. 56—62.

Воробьева В. М. Сбег и объем сучьев сосны района Восточного Саяна. — Лесн. журн., 1968, № 2, с. 37—40.

Воронков Н. А., Невзоров В. М. Транспирационный расход влаги и рост культур сосны при остром дефиците увлажнения. — Лесоведение, 1979, № 3, с. 31—40.

Воронков Н. А., Невзоров В. М. Корневая система сосны в связи с водным режимом песчаных почв. — Лесоведение, 1981, № 6, с. 14—23.

Второва В. Н. Особенности вертикального распределения химического состава структурных компонентов ели и сосны в Подмосковье. — В кн.: Комплекс. биогеоценолог. исслед. в лесах Подмосковья. М.: Наука, 1982, с. 5—20.

Выгодская Н. Н., Сазанова С. Г., Шульгин И. А. Структура крон ели. — В кн.: Сообщ. Секретариата PICEA, т. 2. Биология ели. Тарту, 1977, с. 12—22.

Габеев В. Н. Биологическая продуктивность лесов Приобья. Новосибирск: Наука, 1976.

Галицкий В. В., Комаров А. С. Дискретные модели популяции деревьев. — В кн.: Моделирование почвен. процессов и автоматизация их исслед. М.: Наука, 1976, с. 91—106.

Голиков В. В. Объем и сбег сучьев пихты сибирской. — В кн.: Темнохвойные леса. Красноярск: изд. СибТИ, 1963, вып. 35, с. 79—84.

Горбатенко В. М. Зависимости между таксационными и биометрическими показателями сосновых древостоев. — В кн.: Географ. аспекты горн. лесоведения и лесоводства. Чита: изд. Забайкал. филиала Географ. общества СССР, 1971, вып. 2, с. 70—73.

Горбатенко В. М., Протопопов В. В. О точности учета фитомассы крон и хвои сосновых древостоев. — Лесн. хоз-во, 1971, № 4, с. 39—41.

Грибанов Л. Н. Биоэкологические основы хозяйства в ленточных борах Прииртышья. — В кн.: Леса и деревес. породы Сев. Казахстана. Л.: Наука, 1974, с. 10—16.

Электронный архив УГЛТУ

Грибанов Л. Н., Лагов И. А., Чабан П. С. Леса Казахстана. — В кн.: Леса СССР. М.: Наука, 1970, т. 5, с. 5—77.

Гудочкин М. В. Таксационные элементы белосаксаульников пустыни Кызыл-Кум. — Науч. тр./КазНИИЛХА, 1961, т. 3, с. 61—109.

Гудочкин М. В., Чабан П. С. Леса Казахстана. Алма-Ата: Казах. гос. изд-во, 1958.

Данилин М. А. Таблицы объемов сучьев осины. — В кн.: Матер. конф. по итогам н.-и. работ за 1964 г. Секция лесохозяйств. Красноярск: изд. СибТИ, 1965, с. 7—10.

Данилов М. Д. Закономерность развития чистых древостоев в связи с динамикой листовой массы.— Лесн. хоз-во, 1953, № 6, с. 21—24.

Доскач А. Г. Основные черты строения рельефа Северного Казахстана. — В кн.: Природн. районирование Сев. Казахстана. М.—Л.: Изд-во АН СССР, 1960, с. 23—41.

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

Дукарский О. М., Закурдаев А. Г. Статистический анализ и обработка наблюдений на ЭВМ «Минск-22». М.: Статистика, 1971.

Дылис Н. В., Носова Л. М. Фитомасса лесных биогеоценозов Подмосковья. М.: Наука, 1977.

Дылис Н. В., Уткин А. И., Успенская И. М. О горизонтальной структуре лесных биогеоценозов. — Бюл. МОИП, 1964, т. 69, № 4, с. 65—72.

Дыренков С. А. Статистический подход к моделированию структуры и динамики древостоев. — В кн.: Оптимизация использ. и воспроизводства лесов СССР. М.: Наука, 1977, с. 80—93.

Захаров В. К. Лесная таксация. М.: Лесн. пром-сть, 1967.

Ивахненко А. Г. Индуктивный метод самоорганизации моделей сложных систем. Киев: Наукова думка, 1982.

Иевинь И. К., Дикельсон Э. О. Масса крон осины, березы и ели в кисличниках Латвии. — Лесн. хоз-во, 1962, № 4, с. 20—23.

Ильюшенко А. Ф. Сезонное развитие листовой поверхности и биологическая продуктивность в березняках. — Лесоведение, 1968, № 2, с. 3—13.

Исаева Л. Н. Метод расчета локальной и средней плотности абсолютно сухой древесины в стволах сосны и лиственницы. — Лесоведение, 1978, № 4, с. 90—94.

Казарян В. О. Старение высших растений. М.: Наука, 1969.

Казимиров Н. И. Ельники Карелии. Л.: Наука, 1971.

Кайрюкштис Л. А. Научные основы формирования высокопродуктивных елово-лиственных насаждений. М.: Лесн. пром-сть, 1969.

Кайрюкштис Л. А., Юодвалькис А. И. Критерии оптимальной густоты при моделировании максимально продуктивных лесных биогеоценозов. — В кн.: Биофиз. и системные исслед. в лесной биогеоценологии: Тез. докл. Петрозаводск, 1976, с. 89—90.

Калинин М. И. Рост корневых систем культур разной густоты. — Лесн. хоз-во, 1981, № 5, с. 28—30.

Карманова И. В. Математические методы изучения роста и продуктивности растений. М.: Наука, 1976.

Кибзун А. П., Ле Чонг Кук. Опыт математической оценки вертикально-фракционного распределения фитомассы надземной части древостоя лесостепной дубравы. — Лесоведение, 1979, № 5, с. 19—25.

Ковалев Ю. Л. Биометрическое обоснование площади питания де-

Электронный архив УГЛТУ

ревьев и оптимальной ажурности лесных полос. Автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Волгоград, 1981.

Кофман Г. Б. Приложения теории подобия к анализу роста и изреживания древостоев: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. Красноярск, 1981.

Кофман Г. Б., Кузьмичев В. В. Видоспецифичность естественного изреживания древостоев. — В кн.: Формирование эталонных насаждений: Тез. докл. Всесоюзн. конф. Каунас-Гирионис: изд. ЛитНИИЛХ, 1979, ч. 1, с. 99—101.

Кофман Г. Б., Кузьмичев В. В. Подобие в процессе роста и изреживания древостоев. — В кн.: Пространственно-времен. структура лесных биогеоценозов. Новосибирск: Наука, 1981, с. 125—151.

КПСС. Съезд, 26-й. Москва. 1981. Материалы XXVI съезда КПСС. М.: Политиздат, 1981.

Крамер П., Козловский Т. Физиология древесных растений. М.: Гослесбумиздат, 1963.

Кричун В. М. Таблицы веса деревьев саксаула. — Науч. тр./КазНИИЛХА, 1965, т. V, вып. 2, с. 16—19.

Кричун В. М., Усольцев В. А. Форма и объем сучьев березы Северного Казахстана. — Вестн. с.-х. науки Казахстана, 1978, № 7, с. 93—98.

Кричун В. М., Усольцев В. А., Внучков В. Т. Сортиментные таблицы осинников Северного Казахстана. — Вестн. с.-х. науки Казахстана, 1978, № 10, с. 102—106.

Кричун В. М., Усольцев В. А. Регрессионные модели надземной фитомассы белого саксаула. — Вестн. с.-х. науки Казахстана, 1979, № 10, с. 53—56.

Крылов Г. В., Крылов А. Г. Леса Западной Сибири. — В кн.: Леса СССР. М.: Наука, 1969, т. 4, с. 157—247.

Кузиков И. Е. Изменение фитомассы в пихтарниках зеленомошного типа леса в различных климатических условиях Средней Сибири: Автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Красноярск, 1979.

Кузьмичев В. В. Типы леса и особенности роста колочных березняков Барабы. — В кн.: Организация лесн. хоз-ва в некоторых категориях лесов Сибири. Красноярск: изд. ИЛиД СО АН СССР, 1963а, с. 41—59.

Кузьмичев В. В. Основные черты динамики лесного фонда колочных лесов (на примере Подгородного лесхоза Омской области). — В кн.: Организация лесн. хоз-ва в некоторых категориях лесов Сибири. Красноярск: изд. ИЛиД СО АН СССР, 1963б, с. 27—39.

Кузьмичев В. В. Закономерности роста древостоев. Новосибирск: Наука, 1977.

Кузьмичев В. В. Эколого-ценотические закономерности роста одновозрастных сосновых древостоев: Автореф. дис. ... докт. биолог. наук. Красноярск, 1980.

Кузьмичев В. В., Савич Ю. Н. Влияние густоты посадки на рост сосновых культур. — Лесоведение, 1979, № 6, с. 56—63.

Кузьмичев В. В., Черкашин В. П., Ледовских В. Я., Джансеитов К. К. Дистанционная индикация пространственной структуры лесных фитоценозов. — В кн.: Исслед. таеж. ландшафтов дистанц. методами. Новосибирск: Наука, 1979, с. 75—88.

Кулешис А. А. Унифицированные математические модели кривых зависимости высот от диаметров деревьев: Метод. рекомендации. Каунас: изд. ЛитНИИЛХ, 1981.

Электронный архив УГЛТУ

Лакин Г. Ф. Биометрия. М.: Высшая школа, 1973.

Левитин К., Чеховская Г. Математическая экология? Ее еще нет... — Знание — сила, 1975, № 10, с. 29—31.

Лиепа И. Я. Динамика древесных запасов: прогнозирование и экология. Рига: Зинатне, 1980.

Лиепа И. Я. К математическому моделированию в экологии. — В кн.: Моделирование и прогнозирование в биоэкологии. Рига: изд. Латв. ун-та, 1982, с. 3—41.

Лир Х., Польстер Г., Фидлер Г.-И. Физиология древесных растений. М.: Лесн. пром-сть, 1974.

Макаренко А. А. К вопросу о горизонтальном строении древостоев. — В кн.: Леса и древес. породы Сев. Казахстана. Л.: Наука, 1974, с. 39—45.

Макаренко А. А. Ход роста сомкнутых сосновых древостоев Кустанайской области. — В кн.: Справ. по таксации лесов Казахстана. Алма-Ата: Кайнар, 1980, с. 93—95.

Макаренко А. А. Строение древостоев. Алма-Ата: Кайнар, 1982.

Макаренко А. А., Колтунова А. И., Рапп Я. А. О возможностях применения семейства кривых Пирсона в лесоводственных исследованиях. — Науч. тр./КазНИИЛХА, 1978, т. 10, с. 3—12.

Макаренко Е. А. Рост и формирование сосновых культур Казахского мелкосопочника. — Вестн. с.-х. науки Казахстана, 1978, № 2, с. 82—88.

Мак-Лоун Р. Р. Математическое моделирование — искусство применения математики. — В кн.: Математ. моделирование. М.: Мир, 1979, с. 9—20.

Матузанис Я. К. Моделирование хода роста древостоев. — В кн.: Оптимизация использ. и воспроизводства лесов СССР. М.: Наука, 1977, с. 67—75.

Мауринь А. М. Принцип необратимости в моделировании биоэкологических систем. — В кн.: Моделирование и прогнозирование в экологии. Рига: изд. Латв. ун-та, 1978, с. 15—21.

Мауринь А. М. Проблема биологического времени и функция Бакмана. — В кн.: Моделирование и прогнозирование в экологии. Рига: изд. Латв. ун-та, 1980, с. 3—22.

Мауринь А. М., Лиепа И. Я., Дрике А. Я., Поспелова Г. Е. Прогнозирование плодоношения древесных растений. — В кн.: Оптимизация использ. и воспроизводства лесов СССР. М.: Наука, 1977, с. 50—53.

Мелентьев П. В. Приближенные вычисления. М.: Гос. изд-во физ.-мат. литературы, 1962.

Мелехов И. С. Лесоведение. М.: Лесн. пром-сть, 1980.

Мина Н. В., Клевезаль Г. А. Рост животных. М.: Наука, 1976.

Миркин Б. М., Розенберг Г. С. Толковый словарь современной фитоценологии. М.: Наука, 1983.

Миронов В. В. Экология хвойных пород при искусственном лесовозобновлении. М.: Лесн. пром-сть, 1977.

Митропольский А. К. Техника статистических вычислений. М.: Наука, 1971.

Михайловский Г. Е. Термодинамические аспекты системного подхо-

Электронный архив УГЛТУ

да к экологии. — В кн.: Человек и биосфера, вып. 2. Устойчивость эколог. систем. М.: Изд-во МГУ, 1978, с. 103—123.

Моисеев Н. Н. Математика ставит эксперимент. М.: Наука, 1979.

Молчанов А. А. Продуктивность органической массы в лесах различных зон. М.: Наука, 1971.

Молчанов А. А. Продуктивность органической массы в березовых древостоях Московской области. — В кн.: Продуктивность орган. и биолог. массы леса. М.: Наука, 1974, с. 141—161.

Молчанов А. А., Смирнов В. В. Методика изучения прироста древесных растений. М.: Наука, 1967.

Науменко З. М. Продуктивность и биологический состав фитомассы березы в чистых березняках Нечерноземной зоны РСФСР. — Раст. ресурсы, 1978, т. 14, № 1, с. 126—131.

Никитин К. Е., Швиденко А. З. Методы и техника обработки лесоводственной информации. М.: Лесн. пром-сть, 1978.

Оленин С. М. Динамика радиального прироста древостоев сосновых фитоценозов среднетаежной подзоны Предуралья: Автореф. дис. ... канд. биолог. наук. Свердловск, 1982.

Оськина Н. В. Почвенные условия и продуктивность фитомассы сосновых насаждений приокских террас в Московской области: Автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. М., 1982.

Оя Т. Опыт имитационного моделирования роста древостоя умеренного пояса. — В кн.: Пробл. современ. экологии. Тарту: изд. АН ЭстССР, 1978, с. 59—61.

Перелыгин А. М., Уголев Б. Н. Древесиноведение. М.: Лесн. пром-сть, 1971.

Плотников В. В. Эволюция структуры растительных сообществ. М.: Наука, 1979.

Плохинский Н. А. Математическое оснащение биологов. — В кн.: Методы современной биометрии. М.: Изд-во МГУ, 1978, с. 194—206.

Поздняков Л. К. Лесное ресурсоведение. Новосибирск: Наука, 1973.

Поздняков Л. К., Протопопов В. В., Горбатенко В. М. Биологическая продуктивность лесов Средней Сибири и Якутии. Красноярск: кн. изд-во, 1969.

Полубояринов О. И. Плотность древесины. Л.: изд. ЛТА, 1973.

Полубояринов О. И. Влияние лесохозяйственных мероприятий на качество древесины. Л.: изд. ЛТА, 1974.

Полубояринов О. И. Плотность древесины. М.: Лесн. пром-сть, 1976.

Полубояринов О. И., Давидов Г. М. Плотность древесины и весовая продуктивность березовых насаждений Ленинградской области. — Лесн. журн., 1975, № 5, с. 14—18.

Поляков А. К. Определение оптимальной густоты сосны в свежей субори. — Лесн. хоз-во, 1973, № 12, с. 14—18.

Природное районирование Северного Казахстана/Под ред. Б. А. Федоровича. М.: Изд-во АН СССР, 1960.

Программа и методика биогеоценологических исследований. М.: Наука, 1966.

Проскуряков М. А. Горизонтальная структура горных темнохвойных лесов. Алма-Ата: Наука, 1983.

Протопопов В. В. Некоторые особенности биофизического и биохимического влияния лесов Западного Саяна на среду. — В кн.: Матери-

Электронный архив УГЛТУ

алы науч. конф. по изучению лесов Сибири и Дальнего Востока. Красноярск: изд. СибТИ, 1965, с. 140—153.

Протопопов В. В. Методологическое значение биогеоценотического подхода в изучении средообразующей роли леса. — В кн.: Пробл. лесн. биогеоценологии. Новосибирск: Наука, 1980, с. 3—14.

Разин Г. С. Динамика сомкнутости одноярусных древостоев. — Лесоведение, 1979, № 1, с. 20—25.

Рачко П. Имитационная модель динамики роста дерева как элемента лесного биогеоценоза. — Вопр. кибернетики. Управление и оптимизация в экологических системах, 1979, № 52, с. 73—111.

Риклефс Р. Е. Основы общей экологии. М.: Мир, 1979.

Родин Л. Е., Ремезов Н. П., Базилевич Н. И. Методические указания к изучению динамики и биологического круговорота в фитоценозах. Л.: Наука, 1968.

Розенберг Г. С. Состояние и проблемы имитационного моделирования фитоценотических систем. — Успехи соврем. биологии, 1981, т. 91, вып. 2, с. 293—307.

Розенберг Г. С., Феклистов П. А. Прогнозирование годичного прироста древесных растений методами самоорганизации. — Экология, 1982, № 4, с. 43—51.

Росс Ю. К. Радиационный режим и архитектоника растительного покрова. Л.: Гидрометеоиздат, 1975.

Росс Ю. К. Роль физиолого-математических моделей продукционного процесса в экологии растений. — В кн.: Пробл. соврем. экологии. Тарту: изд. АН ЭстССР, 1978, с. 56.

Рубцов В. И., Новосельцева А. И., Попов В. К., Рубцов В. В. Биологическая продуктивность сосны в лесостепной зоне. М.: Наука, 1976.

Рыбинцева Д. А. Охвоенность древостоев сосны в связи с возрастом в Боровском лесном массиве. — В кн.: Исслед. молодых ученых. Алма-Ата: изд. КазНИИЛХА, 1973, с. 84—85.

Рябоконь А. П. Определение биологического оптимума густоты сосновых древостоев в условиях свежей субори. — Лесоведение, 1979, № 3, с. 16—23.

Свалов Н. Н. Моделирование производительности древостоев и теория лесопользования. М.: Лесн. пром-сть, 1979.

Семечкина М. Г. Структура фитомассы сосняков. Новосибирск: Наука, 1978.

Сеннов С. Н. О методике моделирования производительности. — В кн.: Моделирование и контроль производительности древостоев. Каунас: изд. ЛитСХА, 1983, с. 44—46.

Синицын С. Г., Сухих В. И. Использование материалов многозональных и космических съемок в интересах лесного хозяйства. — В кн.: Аэрокосм. исслед. Земли. М.: Наука, 1979, с. 86—101.

Синягин И. И. Площади питания растений. М.: Россельхозиздат, 1975.

Смагин В. Н. Основные закономерности развития и смены лесных биогеоценозов. — В кн.: Динамика лесных биогеоценозов Сибири. Новосибирск: Наука, 1980, с. 6—28.

Смирнов В. В. Сезонный рост главнейших древесных пород. М.: Наука, 1964.

Смирнов В. В. Органическая масса в некоторых лесных фитоценозах европейской части СССР. М.: Наука, 1971.

Электронный архив УГЛТУ

Смирнов Н. Т. Пространственная структура сосново-березовых древостоев Северного Казахстана. — Лесоведение, 1969, № 5, с. 15—26.

Стадницкий Г. В. Опыт построения математической модели выживания насекомых-фитофагов в течение поколения. — Зоолог. журн., 1971, № 7, с. 1011—1020.

Сукачев В. Н., Зонн С. В., Мотовилов Г. П. Методические указания к изучению типов леса. М.: Изд-во АН СССР, 1957.

Тамм Ю. А., Росс В. А. Закономерности распределения надземной фитомассы осины в насаждениях Эстонской ССР. — Лесоведение, 1980, № 1, с. 42—51.

Тауринь Я. К. Динамика прироста и теоретические основы рубок ухода в березовых древостоях Латвийской ССР: Автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Елгава, 1969.

Терсков И. А., Терскова М. И. Рост одновозрастных древостоев. Новосибирск: Наука, 1980.

Технерядов А. В., Шоманов Ж. Ш. Определение весового запаса стволов с помощью условной плотности древесины в культурах сосны Чалдайского лесхоза. — Науч. тр./КазСХИ, 1976, т. XIX, вып. 3, с. 93—100.

Тимофеев-Ресовский Н. В., Воронцов Н. Н., Яблоков А. В. Краткий очерк теории эволюции. М.: Наука, 1977.

Тихонов А. С. Новый метод перечислительной таксации молодняков. — Лесн. журн., 1971, № 1, с. 23—26.

Токмурзин Т. Х., Байзаков С. Б. Рекомендации по таксации надземной массы и освоению древесной зелени сосновых и еловых лесов Казахстана. Алма-Ата: изд. КазСХИ, 1970.

Токмурзин Т. Х., Нурпеисов К. Н. Таблицы хода роста фитомассы древостоев сосны Прииртышья. — Науч. тр./КазСХИ, 1976, т. XIX, вып. 3, с. 127—136.

Тябера А. П. Объем коры, сучьев и масса хвои в сосняках Литвы. — Лесн. журн., 1981, № 6, с. 14—18.

Тябера А. П. Моделирование производительности сосновых древостоев разной густоты. — Лесн. хоз-во, 1982, № 5, с. 59—62.

Усольцев В. А. Взаимосвязь некоторых таксационных элементов кроны и ствола у березы пушистой в Северном Казахстане. — Вестн. с.-х. науки Казахстана, 1971, № 2, с. 80—84.

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. Элементы биологической продуктивности березово-осиновых лесов Северного Казахстана: Автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Свердловск, 1973.

Усольцев В. А. Формирование ствола у березы семенного и порослевого происхождения в аспекте аллометрического роста. — Вестн. с.-х. науки Казахстана, 1976а, № 7, с. 83—88.

Усольцев В. А. Применение регрессионного анализа при исследовании возрастной динамики фитомассы березы и осины. — Лесоведение, 1976б, № 1, с. 35—39.

Усольцев В. А. О закономерностях роста березы порослевого и семенного происхождения. — Вестн. с.-х. науки Казахстана, 1978, № 6, с. 87—93.

Усольцев В. А. Математическое моделирование прироста березы повислой. — Лесоведение, 1979, № 2, с. 13—22.

Усольцев В. А. Применение регрессионных моделей при составле-

Электронный архив УГЛТУ

нии таблиц надземной фитомассы деревьев. — Науч. тр./КазНИИЛХА, 1980, т. 12, с. 201—214.

Усольцев В. А. Прогнозирование биологической продуктивности березы и осины в колочных лесах. — Вестн. с.-х. науки Казахстана, 1983а, № 6, с. 69—77.

Усольцев В. А. Таблицы для подеревного учета надземной фитомассы березы и осины Северного Казахстана. — В кн.: Рациональн. использование и повышение устойчивости лесов Казахстана. Щучинск, 1983б, с. 143—164. (Рукопись деп. в КазНИИНТИ, № 478 Ка-Д83).

Усольцев В. А., Данченко А. М. Вертикальная структура кроны березы повислой. — Вестн. с-х. науки Казахстана, 1981, № 9, с. 81—84.

Усольцев В. А., Крепкий И. С. Закономерности соотношений надземной и подземной фитомассы в сосняках Кустанайской области. — Вестн. с.-х. науки Казахстана, 1984, № 3, с. 73—79.

Усольцев В. А., Кричун В. М. Закономерности формирования надземной фитомассы березы и осины в колочных лесах Северного Казахстана. — Лесоведение, 1982, № 3, с. 41—52.

Усольцев В. А., Макаренко А. А. Возрастная динамика формирования надземной фитомассы сосны кустанайских боров в зависимости от густоты. — Вестн. с.-х. науки Казахстана, 1978, № 12, с. 105—111.

Усольцев В. А., Макаренко А. А., Аткин А. С. Закономерности формирования надземной фитомассы сосны в Северном Казахстане в связи с густотой. — Лесоведение, 1979, № 5, с. 3—12.

Усольцев В. А., Усольцева Р. Ф. Аппроксимирование надземной фитомассы березы и осины по диаметру и высоте ствола. — Вестн. с.-х. науки Казахстана, 1977, № 7, с. 83—89.

Успенский В. В., Попов В. К. Особенности роста, продуктивности и таксации культур. М.: Лесн. пром-сть, 1974.

Уткин А. И. Основные направления в исследованиях по биологической продуктивности лесных фитоценозов за рубежом. — Лесоведение, 1969, № 1, с. 63—83.

Уткин А. И. Исследования по первичной биологической продуктивности лесов в СССР. — Лесоведение, 1970, № 3, с. 58—89.

Уткин А. И. Биологическая продуктивность лесов (методы изучения и результаты). — В кн.: Лесоведение и лесоводство. Итоги науки и техники. М.: ВИНИТИ, 1975, т. 1, с. 9—189.

Уткин А. И. Структура и первичная биологическая продуктивность лесных биогеоценозов (БГЦ): Дис. ... докт. биол. наук в форме научного доклада. Красноярск, 1981.

Уткин А. И., Дылис Н. В. Изучение вертикального распределения фитомассы в лесных биогеоценозах. — Бюл. МОИП, 1966, т. 71, № 6, с. 79—91.

Уткин А. И., Дылис Н. В., Солнцева О. Н. Первичная продуктивность и вертикальная биогеоценотическая структура 83-летнего березняка волосистоосокового. — Бюл. МОИП, 1980, т. 85, № 3, с. 100—117.

Уткин А. И., Ермолова Л. С. Биологическая продуктивность культур сосны обыкновенной в Ульяновском Заволжье. — Лесоведение, 1979, № 3, с. 3—15.

Федоряк В. Е., Усольцев В. А. Моделирование динамики численности звездчатого и красноголового ткачей в период развития их яиц и личинок в кроне деревьев. — Лесоведение, 1978, № 4, с. 104—107.

Электронный архив УГЛТУ

Четыркин Е. М. Статистические методы прогнозирования. М.: Статистика, 1977.

Чиллингуорт Д. Структурная устойчивость математических моделей. Значение методов теории катастроф. — В кн.: Математ. моделирование. М.: Мир, 1979, с. 249—276.

Чуенков В. С. Полнодревесность лиственницы даурской в Амурской области. — Лесн. журн., 1960, № 4, с. 22—25.

Чуенков В. С. Исследования оптимальной структуры насаждений с помощью ЭВМ. — В кн.: Докл. сов. специалистов—участников междунар. симпоз. стран — членов СЭВ по использованию ЭВМ и математ. методов в лесн. хоз-ве. Пушкино: изд. ВНИИЛМ, 1972, с. 68—79.

Шандер В. Д. Влияние сезона и возраста рубки на порослевое возобновление чистых березняков Северного Казахстана. — В кн.: Научн. основы восстановления лесн. фонда и повышения продуктивности лесов Казахстана. Кокчетав: Кайнар, 1970, с. 409—418.

Шмальгаузен И. И. Определение основных понятий и методика исследования роста. — В кн.: Рост животных. М.—Л.: Гос. изд-во биолог. и медиц. лит., 1935, с. 8—60.

Эрнст Л. К., Науменко З. М. Биомасса леса и ее кормовое использование. М.: ВНИИТЭИСХ, 1977.

Якушев Б. И. Электрометрический способ оценки массы подземных органов растений. — Докл. АН БССР, т. 16, № 9, 1972, с. 848—850.

Agren G. I. Problems involved in modelling tree growth. — Stud. Forest. Suec., 1981, N 160, 7—18.

Assmann E. Waldertragskunde. München, Bonn, Wien, 1961.

Attiwill P. M. Estimating branch dry weight and leaf area from measurements of branch girth in Eucalyptus. — Forest Sci., 1962, v. 8, N 2, 132—141.

Beauchamp J. J., Olson J. S. Corrections for bias in regression estimates after logaritlmic transformation. — Ecology, 1973, v. 54, N 6, 1403—1407.

Beauchamp J. J., Hull N. C., Olson J. S. LOGNORM: Computer program for unbiased regression estimates. — Eastern Deciduous Forest Biome Memo Report 71—102, 1973, 68 pp.

Botkin D. B., Janak J. F., Wallis J. R. Some ecological consequences of a computer model of forest growth. — J. Ecology, 1972, v. 60, N 3, 849—872.

Clutter J. L., Allison B. I. A growth and yield model for Pinus radiata in New Zealand. — In: Growth models for tree and stand simulation. Stockholm, 1974, 136—160.

Dixon P. B., Bowles S., Kendrick D. Notes and problems in microeconomic theory. North-Holland, Amsterdam, 1980, 320 pp.

Flewelling J. W., Pienaar L. V. Multiplicative regression with lognormal errors. — Forest Sci., 1981, v. 27, N 2, 281—289.

Forslund R. R. A geometrical tree volume model based on the location of the centre of gravity of the bole. — Can. J. Forest Res., 1982, v. 12, N 2, 215—221.

Gerold Do. Ein Algorithmus zur rationellen und komplexen Auswertung langfristiger ertragskundlicher Versuchsflächen. — Wiss. Z. Techn. Univers. Dresden, 1979, Bd. 28, N 5, 1305—1308.

Gholz H. L. Structure and productivity of Juniperus occidentalis in Central Oregon. — Amer. Midland Natur., 1980, v. 103, N 2, 251—261.

Open Portfolio archive of UFRY

Gould S. Allometry and size in ontogeny and phylogeny. — Biol. Rev., 1966, v. 41, 587—640.

Hakkila P. Investigation on the basic density of Finnish pine, spruce and birch wood. — Commun. Inst. Forest. Fenn., 1966, v. 61, N 5, 1—98.

Hozumi Kazuo. Ecological and mathematical considerations on self-thinning in even-aged pure stands. II. Growth analysis of self-thinning. — Bot. Mag. Tokyo, 1980, v. 93, N 1030, 149—166.

Huxley J. Problems of relative growth. Methuen & Co., London, 1932, 296 pp.

Jacobs M. W., Cunia T. Use of dummy variables to harmonize tree biomass tables. — Can. J. For. Res., 1980, v. 10, N 4, 483—490.

Kinerson R. S. Studies of photosynthesis and diffusion resistance in paper birch (Betula papyrifera Marsh.) with synthesis through computer simulation. — Oecologia (Berl.), 1979, 39, 37—49.

Kittredge J. I. Estimation of amount of foliage of trees and stands. — J. Forestry, 1944, v. 42, N 11, 905—912.

Klem G. Variations in the specific gravity of foreign softwood species and Norway spruce from South and West Norway. — Meddelelser fra Det norske skogforsoksvesen, 1965, N 20, 137—169.

Korsun F. Zivot normalniho porostu ve vzorcich. — Lesnicka prace, 1935, 14, 289—300.

Kotimaki T., Cunia T. Effect of cluster sampling in biomass tables construction: ratio estimators models. — Can. J. For. Res., 1981, v. 11, N 3, 475—486.

Kovats M. Estimating juvenile tree volumes for provenance and progeny testing. — Can. J. For. Res., 1977, v. 7, N 2, 335—342.

Lee I. J. Predicting mortality for even-aged stands of lodgepole pine. — Forest. Chronicle, 1971, v. 47, N 1, 29—32.

Lemmon P. E., Schumacher F. X. Volume and diameter growth of ponderosa pine trees as influenced by site index, density, age and size.— Forest Sci., 1962, v. 8, N 3, 236—249.

Levy E. B., Madden E. A. The point method of pasture analysis. — N. Z. J. Agric., 1933, 46, 267—279.

Martens M. J. M. Foliage as a low-pass filter: experiments with model forests in an anechoic chamber. — J. Acoust. Soc. Amer., 1980, v. 67, N 1, 66—72.

Melzer E.-W. Die stochastischen Beziehungen zwischen Sproß-und Wurzelsystem des Baumes. — Arch. Forstwesen, 1962, Bd. 11, H. 7, 822—838.

Munro D. D. Forest growth models — a prognosis. — In: Growth models for tree and stand simulation. (J. Fries, Ed.). Royal Coll. For. Res. Notes 30, Stockholm, 1974, 7—21.

Newnham R. M., Smith J. H. G. Development and testing of stand models for Douglas-fir and lodgepole pine. — Forest. Chronicle, 1964, v. 40, N 4, 494—502.

Nokoe S. Nonlinear models fitted to stand volume — age data compare favourably with British Columbia Forest Service hand-drawn volume-age curves. — Can. J. For. Res., 1980, v. 10, N 3, 304—307.

Peschel W. Die Mathematische Methoden zur Herleitung der Wachstumsgesetze von Baum und Bestand und die Ergebnisse ihrer Anwendung. Berlin, P. Parey, 1938, 169—248.

Reeve E., Huxley J. Some problems in the study ofallometric

Электронный архив УГЛТУ

growth. — In: Essays on growth and form. Oxford Univ. Press, 1945, 121—156.

Sarma B. S. K. Forest for fuel. — Indian Forest., 1981, v. 107, N 12, 808—812.

Satoo Taisitiroo. Production and distribution of dry matter in forest ecosystems. — Misc. Inform. Tokyo Univ. Forests, 1966, N 16, 1—15.

Schlaegel B. E. Boxelder (Acer negundo L.) biomass component regression analysis for the Mississippi Delta. — Forest Sci., 1982, v. 28, N 2, 355—358.

Schneider T. W., Kreysa J. Dynamische Wachstums — und Ertragsmodelle für die Douglasie und die Kiefer. — Mitt. Bundesforschungsanst für Forst—und Holzwirtschaft. Hamburg—Reinbek, 1981, N 135, 137 s.

Thomasius H. O. Modell des gleichaltriges Reinbestandes. — Techn. Univ. Dresden. Wissenschaftl. Tagung der Sektion Forstwirtschaft II Vorträge. Dresden und Tharandt, 1978, 122—148.

Thomasius H. O., Thomasius H. H. Ableitung eines Verfahrens zur Berechnung der ertragskundlich optimalen Bestandesdichte. — Techn. Univ. Dresden, 1976a. Preprint — Nr. 21-07-76. 16 s.

Thomasius H. O., Thomasius H. H. Anwendungsbeispiel zu einem Verfahren der Berechnung ertragskundlich optimaler Bestandesdichtewerte und Diskussion dieses Verfahrens. — Techn. Univ. Dresden, 1976. Preprint — Nr. 21-16-76. 16 s.

Ulbricht R. Regressionen zwischen dem laufenden Zuwachs und statischen Bestandesdaten. — Arch. Forstwesen, 1969, Bd. 18, H. 9—10, 1079—1084.

Vuokila Y. Growth and yield tables for pine stands treated with intermediate cuttings of varying degree for southern Central Finland. — Comm. Inst. Fenn. Helsinki, 1967, v. 63, N 2, 123 s.

Warren Wilson J. Point quadrat analysis of foliage distribution for plants growing singly or in rows. — Austral. J. of Botany, 1965, v. 13, N 3, 405—409.

Электронный архив УГЛТУ

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение 3
Глава I. Методологические вопросы моделирования структуры и динамики фитомассы древостоев 6
1.1. Некоторые аспекты многомерного подхода к исследованию фитомассы 6
1.2. Вопросы подбора и оценки регрессионных моделей . . . 17
Глава 2. Краткая природная характеристика районов исследований 28
Глава 3. Математические модели динамики биопродуктивности древостоев 35
3.1. Общеметодические вопросы учета фитомассы 35
3.2. Оценка древесины и коры ветвей 46
3.3. Модели биопродуктивности древостоев в статике . . . 54
3.4. Модели биопродуктивности древостоев в онтогенетической и эколого-ценотической динамике 63
3.5. Моделирование динамики плотности и содержания абсолютно сухого вещества древесины 88
3.6. Высота замера диаметра ствола как дополнительный фактор при оценке фитомассы дерева 99
3.7. Эколого-ценотические закономерности в соотношениях надземной и подземной фитомассы 105
Глава 4. Биопродуктивность и пространственная структура древостоев 118
4.1. Элементы динамики горизонтальной структуры древостоев 118
4.2. Продуктивность биогрупп как микромоделей древостоев различной густоты 131
4.3. Вертикальная структура и фитонасыщенность древесного полога 157
Заключение 166
Приложения 169
Литература 179

Электронный архив УГЛТУ

Владимир Андреевич Усольцев

Моделирование структуры и динамики фитомассы древостоев

ИБ № 205

Редактор С. А. Месяц
Художественный редактор А. В. Курицын
Технический редактор Л. А. Панова
Корректоры С. В. Юркова, Т. М. Загребина

Сдано в набор 25.08.84. Подписано к печати 17.01.85. АЛ06072. Формат 60×84 1/16. Бумага тип. № 3. Гарнитура литературная. Высокая печать. Усл. печ. л. 11,2. Уч.-изд. л. 10,9. Тираж 600 экз. Заказ 307. Цена 1 р. 60 к. Издательство Красноярского университета, 660021, Красноярск, пр. Мира, 103. Типография «Красноярский рабочий», 660017, Красноярск, пр. Мира, 91.

1 р. 60 к.

Электронный архив УГЛТУ