

УДК 630\*52

В. А. Усольцев, А. А. Сальников,  
С. А. Горбунова, З. Я. Нагимов  
(Уральская государственная лесотехническая академия)

## ПРИНЦИПЫ ФОРМИРОВАНИЯ БАЗ ДАННЫХ ПО ФИТО- МАССЕ ЛЕСОВ РОССИИ И ШВЕЙЦАРИИ

*Представлены алгоритмы стыковки экспериментальных данных фитомассы древостоев с традиционными базами данных лесоинвентаризации стволовой древесины. Теоретическая основа предложенного подхода включает применение псевдоинвариантных биологически обусловленных взаимосвязей при оценке массы крон деревьев, использование регрессионного анализа как инструмента вскрытия многомерной природы изменчивости фитомассы древостоев, а также применение рекурсивного (рекуррентного) принципа как методологической основы стыковки данных фитомассы с традиционными данными лесоустройства.*

В центре современных научных исследований все в большей степени оказываются сложные саморазвивающиеся системы, в которые в качестве активно действующего компонента включается сам человек. Один из идеологов нового образа мышления И. Р. Пригожин полагает, что по сути речь идет о новой глубокой научной революции (Лесков, 1992). Одним из проявлений этой тенденции является реализация международного экологического мониторинга и тесно смыкающихся с ним глобальных экологических программ.

Поскольку лесной покров играет доминирующую роль во всех процессах биосферы, то реализация любой экологической программы начинается с оценки биологической продуктивности лесных экосистем. В связи с насущной проблемой обеспечения экологической безопасности человека лесная экология в определенном смысле становится прикладной наукой. В исследовании биопродуктивности лесных экосистем можно выделить несколько приоритетных направлений.

**Биопродуктивность лесов и изменение климата.** В связи с ухудшением экологической обстановки на планете в настоящее время разрабатывается ряд экологических программ на международном (IGBP, IGAC, GCTE, START, BIOME, IPCC, WCRP, BOREAS) и национальном (TIGER – в Великобритании, CDRP – в США, NOP-MLK – в Нидерландах и т. д.) уровнях (Усольцев, 1993). Международным сообществом финансируется и Международным институтом прикладного системного анализа в Австрии разрабатывается программа по оценке биологических ресурсов лесов бывшего

СССР и их вклада в углеродный баланс (Shvidenko et. al., 1994). Успешно завершён первый этап совместного российско-японского проекта «Накопление углерода и углеродный баланс в лесных экосистемах», разрабатываемого Исследовательским институтом лесоводства и лесных продуктов в Саппоро и Якутским институтом биологии РАН с целью выяснить роль сибирской тайги в изменении глобального углеродного баланса, а также влияние глобального потепления на лесные экосистемы в зоне вечной мерзлоты (Takahashi, 1994). В рамках проекта «Изучение лесных экосистем» ГНТП 18 «Глобальные изменения природной среды и климата» проводятся исследования по оценке депонирования углерода в фитомассе лесных экосистем России в Центре по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН в Москве (Исаев и др., 1993).

Характерная черта всех проводимых исследований – отсутствие научно обоснованного методического подхода к проблеме, в результате чего оценки ежегодно связываемого лесной растительностью углерода разнятся на порядок и более. При таком разбросе данных возможность какого-либо прогнозирования экологической ситуации представляется сомнительной.

**Международный экологический мониторинг лесов.** XIX Мировой конгресс ИЮФРО в 1990 г. инициировал разработку Руководящих указаний по международному мониторингу лесов, в которой приняли участие ученые более 20 стран (IUFRO..., 1994). Указания преследуют долговременную цель глобальной экологической информационной службы – создание информационной системы мировых лесных ресурсов и межнациональной сети стандартизованных баз данных и методов идентификации материалов дистанционного зондирования. Первоочередное значение на всех уровнях мониторинга имеют данные по продукции фитомассы лесов. В мае 1993 г. Совещание экспертов ФАО ООН и ЕЭК по глобальной оценке лесных ресурсов специально поставило вопрос о международном мониторинге фитомассы лесов.

Рабочей группой ИЮФРО «Лес, изменение климата и загрязнение атмосферы» опубликован отчет (Schlaepfer, 1993) «Последствия климатических изменений и атмосферных загрязнений для лесных экосистем», в котором отмечается общая тенденция снижения охвоенности полога в лесах Европы, тогда как прирост лесов в течение последних 20 лет имеет неуклонную тенденцию существенного повышения. Одна из возможных причин такого парадокса состоит в применении визуальных методов оценки степени повреждения лесов, когда игнорируется связь между ассимилирующей поверхностью полога и приростом. Делаются лишь первые единичные попытки использования физиологически обусловленных взаимосвязей при оценке массы крон в исследовании этой парадоксальной ситуации (Horntvedt, 1993).

В русле названных инициатив и программ в июне 1993 г. началось формирование информационной сети по исследованию структуры лесного полога, финансируемое Национальным фондом науки США. Ее цель — использовать материалы ученых разных стран и научных направлений по пространственной структуре лесного полога и создать в течение двух лет систематизированную базу данных (Nadkarni, Parker, 1994). В нашей стране работы по лесному мониторингу и экологическим программам всех уровней, дистанционному зондированию лесов и его наземной идентификации не скоординированы между собой. Применение различных методов и подходов дает несопоставимые результаты. Для одних территорий информация отсутствует, для других — дублируется. Более того, утвержденные Рослесхозом в 1993 г. «Основные положения лесного мониторинга в России» построены на методике ЕЭК и не состыкованы с Указаниями ИЮФРО.

**Создание баз данных по фитомассе лесов.** Применяемая в России и большинстве западных стран технология лесоустройства не учитывает потребности экологического мониторинга и не благоприятствует решению актуальных экологических проблем. Создаваемые в настоящее время базы лесостроительных данных дают информацию только по запасам стволовой древесины. Лесная таксация за всю свою 150-летнюю историю накопила огромное количество нормативов для оценки таких запасов, которые невозможно продублировать аналогичными нормативами для всей фитомассы в силу их чрезвычайной трудоемкости. Единственно приемлемый путь — использовать традиционные нормативы и базы данных по запасам стволовой древесины, сопрягая их с данными по фитомассе лесов на основе переводных коэффициентов.

Исследования структуры и динамики фитомассы лесов России ведутся с 30-х годов текущего столетия и имеют свою специфику. Это трудоемкость весового определения фракционного состава фитомассы, разнообразие лесорастительных условий, неполный учет исследователями факторов, определяющих запас фитомассы на 1 га, разнообразие применяемых методик, что в совокупности делает значительную часть полученного материала трудно сопоставимым. Перечисленные обстоятельства являются одной из причин того, что на сегодня не разработана процедура инвентаризации всей фитомассы лесов по аналогии с инвентаризацией стволовой древесины. Тем не менее предпосылки к этому созданы.

Изучение биологической продуктивности лесов получило существенный импульс в связи с Международной биологической программой. Не претендуя на анализ состояния исследований по проблеме биопродуктивности в этот период, можно лишь отметить данные многолетних исследований по структуре фитомассы основных лесобразующих пород европейской части СССР А. А. Молчанова

(1971) и В. В. Смирнова (1971) и данные по фитомассе сосняков различных типов леса и березняков чернично-мшистых в возрастной динамике (Продуктивность..., 1974). Первые сводки данных биопродуктивности лесов различных пород по типам леса появились как отдельно по европейской части СССР (Гортинский и др., 1975) и Сибири (Поздняков, 1975), так и по СССР в целом (Уткин, 1970). Последняя, по-видимому, наиболее полно суммирует итоги работ по биопродуктивности лесов на тот период. Из работ последних лет можно отметить сводку данных лесной фитомассы М. Кэннела (Cannell, 1982), представленную в виде унифицированной схемы по ключевым участкам и древесным породам большинства стран — держателей лесов.

## БАНКИ ДАННЫХ И ГЕОГРАФИЧЕСКАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ФИТОМАССЫ ЛЕСОВ

Один из важнейших этапов создания банков данных по фитомассе лесов представляет исследование географических закономерностей динамики фитомассы. Здесь путь традиционной лесной таксации (Загреев, 1978; Тябера, 1988), основанной на стереометрических методах оценки стволовой древесины, также неприемлем (Уткин, 1982), поскольку предстоит исследовать влияние экологических факторов на распределение фракций фитомассы. Географические закономерности динамики фитомассы исследуются, как правило, либо на локальном, по типам леса, либо на глобальном (Родин, Базилевич, 1965) уровнях. Выявление подобных закономерностей на национальном уровне затруднено вышеупомянутыми обстоятельствами, а также значительным варьированием показателей фитомассы на локальном уровне и более высокими требованиями к точности оценки по сравнению с глобальным.

Единственная попытка не только составить исчерпывающую сводку, но и выявить возрастные закономерности распределения фитомассы древостоев на примере ели европейской по трем климатическим поясам бореальной зоны (европейская часть СССР и частично — Центральная Европа), по-видимому, принадлежит Я. К. Палуметсу (1988, Palumets, 1991). Автор использовал данные 30 авторов и авторских коллективов по 101 древостою в возрастном интервале 10...250 лет. Однако при анализе географических закономерностей распределения фитомассы автор не в полной мере реализовал те возможности, которые давала ему имевшаяся в его распоряжении сводка данных: он ограничивался исследованием парных связей показателей фитомассы с климатическими факторами и возрастом по каждому поясу. Динамика фитомассы древостоя, как и любой экосистемы, имеет многофакторную природу, поэтому необходимо применение многомерных методов. Кроме того, ограни-

чение климатических поясов уровнем ФАР представляется слишком упрощенным. В пределах таких климатических поясов могут быть существенные колебания в распределении фитомассы. Например, по нашим наблюдениям, сосна Велико-Анадольского лесного массива и Казахского мелкосопочника, произрастающая примерно на одном широтном уровне, при одинаковых линейных размерах ствола различается по охвоенности побегов в 2...3 раза, поскольку в первом случае хвоя держится на побегах в течение двух лет, а во втором — до семи. Сравнение наших данных по запасам хвои пихты сибирской в условиях горного Алтая (черневая тайга) и горного Урала (сложные пихтарники, наполовину смешанные с елью, сосной и березой) показывает, что при условии равенства показателей возраста, класса бонитета и полноты запасы хвои у пихты на Урале больше в 1,7 раза.

Таким образом, необходимость учета географических особенностей структуры фитомассы древостоев на национальном уровне очевидна, однако принципы отбора факторов, определяющих географическую изменчивость фитомассы, пока не разработаны.

## НЕКОТОРЫЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ СОЗДАНИЯ БАЗ ДАННЫХ ПО ФИТОМАССЕ ЛЕСОВ

Переводной коэффициент фитомасса фракции: объем ствола ( $P_i : M$ ), по-видимому, впервые был предложен в прошлом веке Ф. Флури (Flury, 1892). Позднее он был рекомендован в России Л. К. Поздняковым с соавторами (1969) при оценке фитомассы древостоев. Его применение при оценке запасов и годичного депонирования углерода в фитомассе лесов претерпело ряд методических модификаций (Sharp et al., 1975; Smith, 1976; Hitchcock, 1979; Adams, 1982; Johnson and Sharpe, 1983). Сегодня алгоритмы расчета переводного коэффициента предлагаются самые разнообразные: он принимается постоянным для данной породы или группы пород (Armentano and Ralston, 1980; Delcourt et al., 1981; Birdsey, 1992; Sampson, 1992; Kolchugina and Vinson, 1993b; Аткин, 1994) либо рассматривается как функция одной переменной, например, среднего диаметра древостоя (Brown et al., 1989) либо возраста (Исаев и др., 1993).

В Канаде при первой инвентаризации фитомассы лесов был использован метод регрессий (Воппог, 1985). Согласно принятой в Канаде стандартной методологии инвентаризации ликвидной древесины леса стратифицированы по породам, возрасту, индексу местообитания и другим показателям. Для каждого страта использовалась информация о величине занимаемой площади и распределении деревьев по толщинам, а также регрессионные уравнения для оценки фитомассы деревьев по их высоте и диаметру. Проводимая в настоящее время вторая инвентаризация фитомассы лесов

Канады основана на новом подходе. Итогом первой фазы проекта являются матрицы переводных коэффициентов, с помощью которых значения запасов балансовой древесины переводятся на показатели надземной фитомассы по провинциям, породам, возрасту и индексу местообитания. Переводной коэффициент рассчитывается для каждого гипотетического древостоя, как отношение суммарной массы надземных фракций к их суммарному объему стволов. Затем показатели массы фракций усредняются по всем местообитаниям с учетом удельной площади каждого местообитания и класса возраста. Переводной коэффициент  $P_i : M$  рассматривается, таким образом, как функция двух переменных – возраста и индекса местообитания (Pepper, 1995).

В связи с необходимостью учета всех компонентов, составляющих глобальный цикл углерода, получены первые оценки фитомассы и продуктивности лесных экосистем бывшего СССР и России (Olson et al., 1983; Kolchugina, Vinson, 1993 a, b; Исаев и др., 1993), которые имеют существенные различия как по показателям общей фитомассы, так и по запасам углерода в ней. Анализируя причины этих расхождений, А. С. Исаев с соавторами (1993) отмечают, что первые оценки основаны на материалах учета площадей на уровне биомов (лесотундра, тайга, смешанные леса, лесостепь), тогда как экспериментальный материал получен лишь с нескольких ключевых точек, т. е. применен методический подход, используемый при оценке глобального уровня. Очевидно, что правомерность распространения данных фитомассы небольших выборок на обширные площади без учета природного, возрастного, структурного разнообразия лесов весьма сомнительна. В отличие от названного подхода, А. С. Исаев с соавторами (1993) основывают свои оценки на базе данных Государственного учета лесов РСФСР по состоянию на 01.01.1988 г., дифференцированных по породам и группам возраста, и на банке эмпирических данных по фитомассе лесов в количестве 600 определений из 150 литературных источников.

Алгоритм расчета накопленной и ежегодно депонируемой фитомассы древесной и кустарниковой растительности включал в себя:

- распределение общей площади лесного фонда по категориям земель;

- распределение покрытой лесом площади по основным лесообразующим породам и группам возраста древостоев;

- удельные запасы стволовой древесины для основных лесообразующих пород по группам возраста древостоев;

- соотношения (переводные коэффициенты) между запасами стволовой древесины и общей фитомассы древостоев для основных лесообразующих пород и групп возраста древостоев;

- общие запасы фитомассы древесной, кустарниковой и травянистой растительности на всех категориях земель лесного фонда;

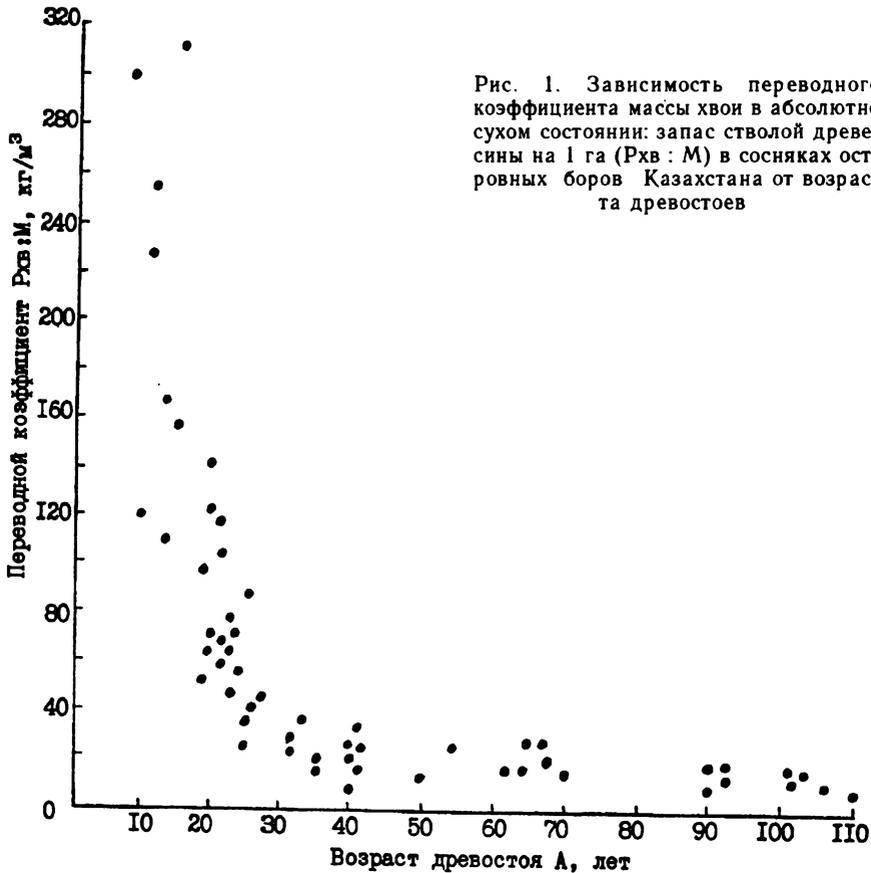
- общие запасы углерода в древесной, кустарниковой и травянистой растительности на территории лесного фонда;
- годовые изменения среднего запаса стволовой древесины древесных и кустарниковых пород в расчете на 1 га;
- средние годовые изменения запаса фитомассы древесных и кустарниковых пород и количества ежегодно депонируемого ими углерода.

Авторы рассматривают свои оценки запасов и депонирования углерода на землях лесного фонда России как первый этап исследований, которые они продолжают по аналогичной методике на уровне отдельных экономических районов и далее — по республикам, краям, областям и отдельным лесхозам по принципу «от общего к частному». Однако есть опасение, что по мере дробления объекта исследования адекватного повышения точности суммарных оценок может не произойти, если методика остается при этом неизменной.

Поскольку интенсивность круговорота веществ по составляющим фракциям фитомассы различная, то оценка ее по обезличенным переводным коэффициентам (полная фитомасса : запас стволовой древесины) оправдана лишь при ориентировочных расчетах. Если учесть, что выделение кислорода и поглощение углекислоты являются составляющими одного цикла, то переводные коэффициенты фитомасса: углерод (Кобак, 1988) должны быть дифференцированы по фракциям фитомассы и совмещены с коэффициентами интенсивности выделения кислорода (Белов, 1964) при оценке как полной биопродуктивности с учетом отпада и опада, так и части ее, касающейся накопления наличной фитомассы. Поскольку вклад не покрытой лесом и нелесной площадей в общее депонирование фитомассы составляет всего 10% (Исаев и др., 1993), то совершенствование методики учета фитомассы по этим площадям практически ничего не изменит. И напротив, с учетом изложенного дальнейшие усилия по совершенствованию методики оценки фитомассы на покрытых лесом площадях могут быть вполне оправданными.

Особого внимания требует методический подход к оценке депонирования фитомассы на площадях под лесными культурами, которые на ранних этапах относятся к категории не покрытых лесом, а после смыкания уравниваются с естественными древостоями (Исаев и др., 1993). Это положение можно проиллюстрировать на примере тропических лесных плантаций. Несмотря на существенно более высокую интенсивность связывания атмосферного углерода плантациями по сравнению со спелыми естественными древостоями, их роль в углеродном балансе обычно игнорировалась вследствие небольших площадей (менее 1% общей площади тропических лесов). Однако важен не столько размер площади под плантациями, сколько темпы их создания, соотношенные со скоростью сведе-

ния лесов. Фактическое приращение около 1 га плантаций на каждые 9 га вырубаемых сомкнутых спелых древостоев выводит плантации в число существенных составляющих углеродного цикла. Количество атмосферного углерода, депонируемого в тропических плантациях, составляет около 70 млн т/год, большая часть которого (79%) приходится на первые два класса возраста (Brown et al., 1986). Однако именно первые два класса возраста обычно характеризуются наибольшим варьированием переводного коэффициента. Ф. Флури (Flury, 1892) установил, что ошибка определения массы ветвей с использованием переводного коэффициента составляет в ельниках: в возрасте 20 лет – около 40%, 30 лет – около 30% и 100 лет – 3%. В буковых древостоях 40-, 50- и 100-летнего возраста аналогичная ошибка составила соответственно 66, 22 и 4%.



На рис. 1 нанесены наши экспериментальные данные переводного коэффициента масса хвои : запас стволовой древесины на 1 га чистых одновозрастных сосняков островных боров лесостепной зоны Казахстана (естественные древостой и культуры, классы бонитета с Ia по Va, полнота с 0,4 до 1,0) в зависимости от возраста древостоев. Их анализ показывает, что в возрасте 10, 20, 40 и 100 лет перепад значений переводного коэффициента (разность между максимальным и минимальным значениями) составляет соответственно 200, 90, 20 и 10 кг/м<sup>3</sup>. Следовательно, оценка депонируемой фитомассы по переводному коэффициенту, усредненному по классам возраста, связана с наибольшей ошибкой именно в первых двух классах возраста, на которые приходится основная доля депонируемой лесными экосистемами фитомассы. Использование переводного коэффициента, усредненного по грациям высоты дерева, дает несколько меньшую ошибку определения массы ветвей в молодняках, чем при усреднении по классам возраста – в ельниках около 30%, в буковых древостоях – 27% (Flury, 1892), тем не менее она по-прежнему довольно велика. Аналогичная закономерность, характеризующая повышенным варьированием переводного коэффициента в молодняках и пониженным – в спелых древостоях, наблюдается при группировке переводных коэффициентов по ступеням среднего диаметра древостоя (Wrown et al., 1989). Поскольку группировка переводных коэффициентов только по одному определяющему фактору (таксационному показателю древостоя) при оценке фитомассы молодняка связана со значительной ошибкой, необходим учет нескольких определяющих факторов и применение многомерного регрессионного анализа.

На рис. 2 показано поле распределения экспериментальных данных массы скелета кроны ( $P_c$ , т/га) по возрасту ( $A$ , лет), полученных на тех объектах в сосняках островных боров Казахстана. Кривая на рис. 2,а описывает усредненный возрастной тренд массы скелета кроны согласно уравнению

$$\ln P_c = -0,5284 + 0,7244 \ln A \quad (1)$$

с коэффициентом  $R^2 = 0,306$  и ошибкой  $\pm 55\%$ . Все константы здесь и далее значимы на уровне  $t_{05}$  и выше. Если в уравнении (1) наряду с возрастом учесть класс бонитета, то получим

$$\ln P_c = -4,4110 + 0,8398 \ln A + 0,3532 \ln H_{100}, \quad (2)$$

где  $H_{100}$  – класс бонитета, выраженный высотой древостоя (м) в базовом возрасте 100 лет по бонитетной шкале М. М. Орлова. Коэффициент  $R^2$  повысился до 0,556, а ошибка снизилась до  $\pm 36\%$ . Поля распределения данных, дифференцированных по классам бонитета, существенно сужаются (рис. 2, б). Далее, если в уравнение (2) наряду с возрастом и классом бонитета ввести третий опреде-

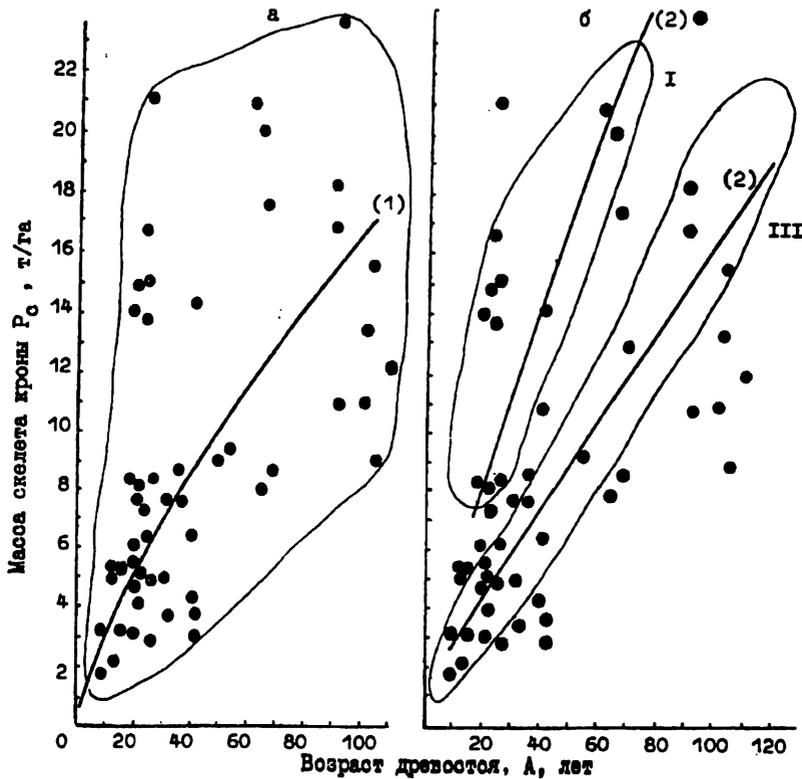


Рис. 2. Зависимость массы скелета кроны в абсолютно сухом состоянии в сосняках островных боров Казахстана от возраста:

а – общее поле распределения экспериментальных данных; б – то же, расчлененное по классам бонитета. (1) и (2) – номера уравнений, аппроксимирующих экспериментальные данные; I и III – номера классов бонитета (соответственно  $H_{100} = 28,5$  м и  $H_{100} = 21,5$  м)

ляющий фактор – абсолютную полноту ( $G, м^2/га$ ), то получим

$$\ln P = -9,7299 + 4,5818 \ln A - 1,2626 \ln A \ln H_{100} + 1,9109 \ln H_{100} \ln G - 0,9235 (\ln G)^2 \quad (3)$$

с коэффициентом  $R^2$ , равным 0,706, и ошибкой  $\pm 32$ . Графическая интерпретация уравнения (3) для III класса бонитета ( $H_{100} = 21,5$  м) показывает (рис. 3), что масса скелета кроны в статике изменяется с увеличением полноты по колоколообразной кривой, а не по монотонно нарастающей, как это имеет место в случае с массой стволов.

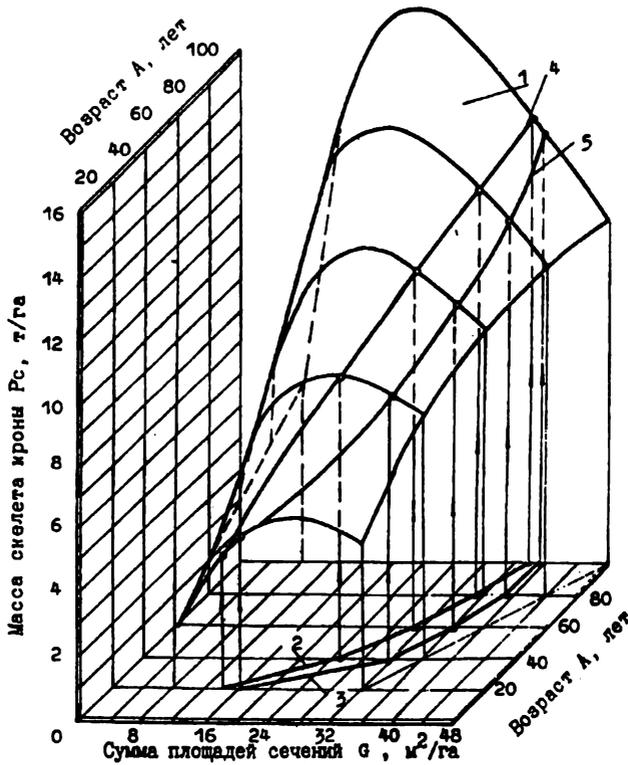


Рис. 3. Геометрическая интерпретация уравнения (3) для III класса бонитета ( $H_{100} = 21,5$  м):

1 – поверхность, описываемая уравнением (3) при  $H_{100} = 21,5$  м. Зависимости  $G = f(A)$ , заимствованные из ТХР сосняков островных (линия 2) и ленточных (линия 3) боров Казахстана, спроецированные на поверхность 1, дают линии соответственно 4 и 5, описывающие возрастные тренды массы скелета полога при заданных значениях  $H_{100}$  и  $G$

### ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ОСНОВА СОЗДАНИЯ БАЗЫ ДАННЫХ ПО ФИТОМАССЕ И ЕЕ РЕАЛИЗАЦИЯ НА ПРИМЕРЕ ЛЕСОВ УРАЛА

Теоретическая основа наших разработок обеспечивается тремя основными положениями:

- применением регрессионного анализа, возможности которого как инструмента вскрытия многомерной природы изменчивости фитомассы древостоев были показаны выше;
- использованием инвариантных биологически обусловленных взаимосвязей как способа снижения трудоемкости натурных работ;

– применением рекуррентного принципа как методологической основы стыковки данных по фитомассе с традиционными таксационными нормативами и лесоустроительными материалами.

В основе принятой теории «пайп-модели» (Shinozaki et al., 1964; Shiba, 1990) лежит инвариантная зависимость, описываемая аллометрической функцией

$$\ln P_i = a_0 + a_1 \ln D_{ок}, \quad (4)$$

где  $P_i$  – масса фракции кроны, кг;  $D_{ок}$  – диаметр ствола у основания кроны, см.

К. Шинозаки с соавторами (Shinozaki et al., 1964) установили, что зависимость (4) является инвариантной не только относительно возраста и условий местопроизрастания, но и в пределах различных популяций одной древесной породы – березы (*Betula platyphylloides japonica*, *B. Maximowiczii*, *B. Ermani*). Аналогичную зависимость (4), общую для четырех популяций березы – *B. subarctica* Orlova, *B. tortuosa* Ledeb. (Мурманская обл.), *B. pendula* (Ленинградская обл.), *B. dahurica* Pall. (Приморский край) – вывели М. В. Козлов и И. В. Соколова (1984). С. Г. Рождественский с соавторами (1991) показали, что зависимость (4) при определении массы листвы дерева является общей для двух пород – березы и осины неморально-кисличной группы типов леса в широком возрастном диапазоне. Эта закономерность подтверждается и на наших объектах исследования, выполненного в березняках Среднего и Южного Урала, Казахского мелкосопочника и островных боров Тургайского прогиба (Усольцев, Сальников, 1993), а также в осинниках Казахского мелкосопочника. Исследованы древостои березы I–VII и осины – I–VI классов возраста. Лесорастительные условия березняков – свежие на Среднем и Южном Урале и в Казахском мелкосопочнике, свежие и сухие – в островных борах. Лесорастительные условия осинников – влажные, свежие и сухие. Классы бонитета березы II–IV, осины Ia–IV. На уральских объектах преобладает береза пушистая, на казахстанских – береза повислая. Во влажных условиях осина представлена зеленокорой формой, в сухих – серокорой. Модельные деревья взяты по ступеням толщины, методика полевых и камеральных работ изложена ранее (Усольцев, 1985а). Общее количество заложенных пробных площадей и взятых модельных деревьев: березы соответственно 24 и 270 и осины – 16 и 160.

Применив метод регрессий с блоковыми фиктивными переменными (Дрейпер, Смит, 1973), мы установили, что влияние принадлежности березы к трем популяциям (Урала, Казахского мелкосопочника и островных боров) на показатель массы листвы ( $P_L$ ) в свежем состоянии статистически недостоверно: значимость фиктивной блоковой переменной находится в пределах от 0,82 до 1,06, что ниже табличного  $t_{05}=2$ . По показателю массы скелета кроны ( $P_c$ )

уровень значимости блоковой переменной близок к предельному и составляет от 3,06 до 4,53: линии регрессии на рис. 4, 16 фактически сливаются в одну. Поэтому выведены зависимости (4), общие для березы трех регионов (табл. 1). Поскольку аллометрические константы уравнений (4), рассчитанные по массиву данных из 160 модельных деревьев осины (табл. 1, рис. 4, 11), различаются с аналогичными константами для березы лишь в третьем знаке и свободные члены уравнений – во втором, выведены уравнения (4), общие для обеих пород. Применение инвариантной зависимости (4) позволяет существенно снизить трудоемкость получения экспериментальных данных. В частности, отпадает необходимость взятия 300...500 модельных деревьев для охвата всего диапазона факторов, определяющих запас фитомассы на 1 кг (все классы возраста, в пределах каждого – все классы бонитета и в пределах каждого класса бонитета – все группы полнот).

Таблица 1

Характеристика уравнений (4)

Порода	Фракция фитомассы	Константы		R <sup>2</sup>
		a <sub>0</sub>	a <sub>1</sub>	
Береза	Рл	-2,9565	2,0646	0,953
	Рс	-3,5254	2,6799	0,959
Осина	Рл	-3,1163	2,0320	0,936
	Рс	-3,3733	2,6904	0,976
Береза + Осина	Рл	-3,0666	2,0750	0,941
	Рс	-3,4234	2,6638	0,967

Специальное исследование показало, что вследствие инвариантности зависимости (4) для ее получения достаточно не более 20 модельных деревьев, взятых случайным образом в указанном диапазоне определяющих факторов. Ошибки оценок фитомассы на 1 га по уравнениям (4), рассчитанным по массивам из 20 и 300...500 деревьев, практически одинаковые. Тем не менее, для получения надежных регрессионных моделей (3) пробные площади должны быть заложены по всему диапазону определяющих факторов. И здесь реализуется еще одна возможность снижения трудоемкости натуральных работ: процедура взвешивания заменяется менее трудоемкой процедурой обмера диаметров у основания кроны  $D_{ок}$  и на высоте груди  $D$  с целью получения зависимостей  $D_{ок} = f(D)$ , дифференцированных по всему диапазону возрастов и эколого-ценотических условий.

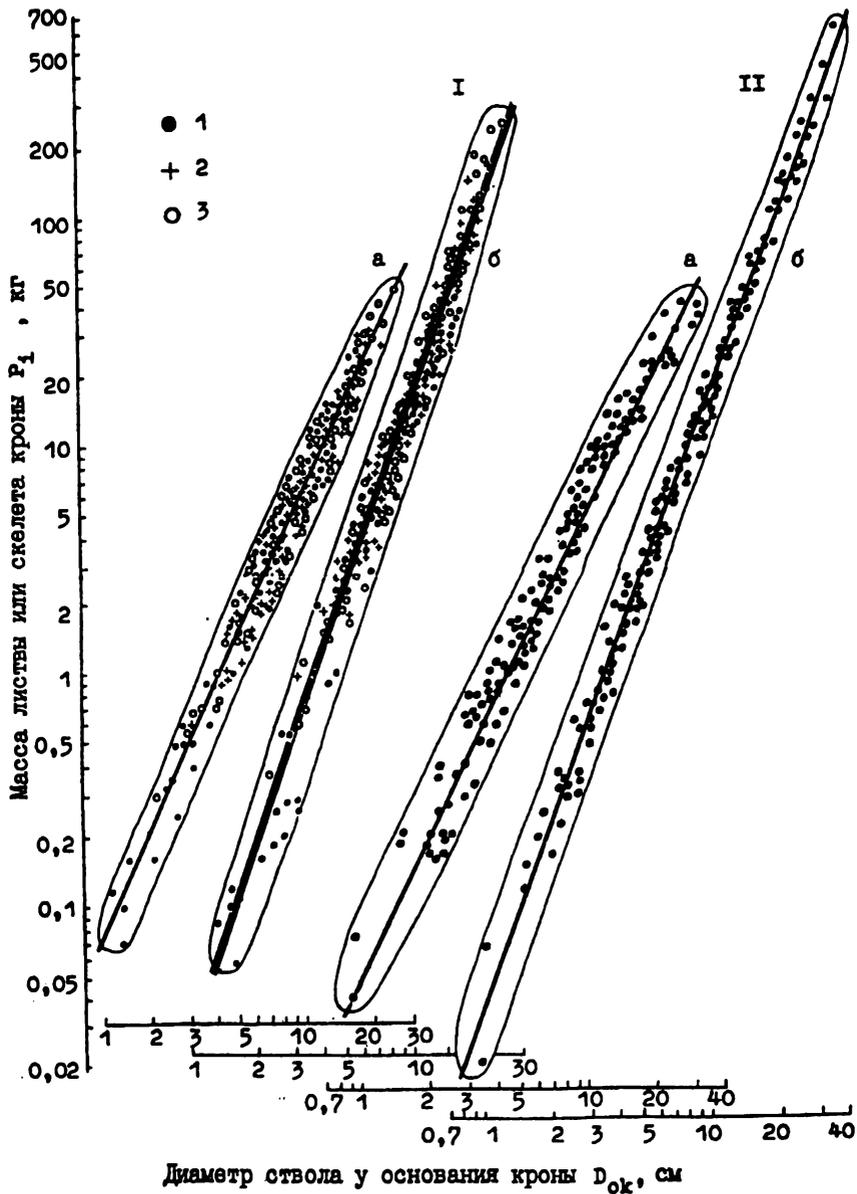


Рис. 4. Зависимость массы листьев (а) и скелета кроны (б) в березняках (I) и осинниках (II) от диаметра ствола у основания кроны:

1 – береза уральского региона; 2 – береза Казахского мелкосопочника;  
 3 – береза Аракарагайского бора

Рекуррентный принцип, обеспечивающий стыковку полученных многомерных моделей (3) с любой ТХР, был использован при составлении эскизов таблиц биопродуктивности для основных лесообразующих пород Казахстана (Усольцев, 1985 б, 1988). Применительно к уравнению (3) он может быть реализован в виде системы зависимостей

$$\left. \begin{array}{l} \text{I. } P_i = f(A, H_{100}, G) \\ \text{II. } G = f(A, H_{100}) \end{array} \right\} \quad (5)$$

где  $P_i$  – масса фракции в абсолютно сухом состоянии, т/га. Система (5) многоварианта, поскольку в ней одному (основному) уравнению I может соответствовать несколько вспомогательных зависимостей II, взятых из разных ТХР. Если уравнение I для заданного III класса бонитета представить колоколообразной поворачивающей линией 1 (рис. 3), то соотношения II, взятые из ТХР для сосняков островных (линия 2) и ленточных (линия 3) боров Казахстана, спроецированные на поверхность 1, дают линии 4 и 5, описывающие возрастные тренды массы скелета полого, различающиеся по регионам.

Используя рекуррентный принцип, уравнение (3) (или I – в системе (5)) можно состыковать не только с ТХР, но и с банком лесоустроительных данных. В этом случае уравнение предпочтительно модифицировать, заменив  $P_i$  относительным показателем  $P_i/M$ , где  $M$  – запас стволовой древесины, м<sup>3</sup>/га. Для этой цели подходит структура регрессионных моделей динамики различных фракций фитомассы, предложенная А. А. Онучиным и А. Н. Борисовым (1984):

$$P_i/M = f(A, B, M), \quad (6)$$

где  $B$  – порядковый номер класса бонитета. Модели рассчитаны по экспериментальным данным, полученным как в естественных древостоях, так и в культурах на территории от Карелии до Средней Сибири, и включают в себя основные факторы, определяющие фитомассу древостоя на единице площади. Эти факторы в виде учитываемых таксационных показателей присутствуют во всех банках таксационных лесоустроительных данных. Абсолютная полнота  $G$  (уравнение (3)), хотя и является легко измеряемым показателем, однако не учитывает варьирования полнодревесности стволов при определении запаса древесины и отсутствует в банках лесоустроительных данных.

Вводимые в действие «Основные положения лесного мониторинга в России» предполагают организацию общегосударственной сети автоматизированных рабочих мест лесничих, что является предпосылкой для создания баз данных по фитомассе лесов по принципу «от частного к общему», т. е. с иерархией от уровня лесничеств и

лесхозов до общенационального. Покажем принцип реализации такой предпосылки на примере Северского лесничества Учебно-опытного лесхоза УГЛТА. В качестве исходных данных для проведения анализа количественного представительства лесных насаждений с различной лесотаксационной характеристикой и получения итоговых результатов исследования использовались лесоустроительные материалы, а именно – повыдельные таксационные описания.

Наиболее трудоемкой частью работы является процесс распределения элементарных лесных площадей (выделов) по градациям основных таксационных показателей. Процесс автоматизации данного блока работ состоит из четырех основных этапов:

- 1) разработки и создания специального математического (программного) обеспечения ЭВМ для экстракции необходимых данных из таксационного описания выдела;

- 2) собственно экстракции данных и импортирования их в специальный формат;

- 3) разработки и создания специального математического обеспечения ЭВМ для сортировки подготовленных на этапе 2 данных и вычисления необходимых абсолютных и относительных итоговых характеристик распределения лесных площадей по градациям основных таксационных показателей;

- 4) автоматического распределения данных и вычисления итоговых результатов.

Для проведения данного блока работ применялся IBM-совместимый персональный компьютер с процессором Intel 80486, оснащенный встроенным математическим сопроцессором. Применение подобной мощной вычислительной техники для автоматизации производства такого рода исследований оправдано, поскольку требуется обработка большого информационного объема с множеством ключевых параметров. Математическое обеспечение для второго этапа подготовки данных было разработано на языке программирования Pascal (версия Borland Pascal 7.0). Далее описывается последовательность процессов, выполняемых программой, без представления алгоритма и исходного кода.

Таксационные описания, изначально представленные в виде обычных текстовых файлов, содержащих повыдельные таксационные характеристики кварталов, подвергались логическому разбиению по элементам на основе характерных строковых последовательностей в следующем порядке: лесхоз, лесничества, поквартальное разбиение, повыдельное разбиение, разбиение по отдельным таксационным показателям. Данные, прошедшие интеграцию в описанной выше последовательности, оформлялись в текстовый файл, пригодный для исполнения автоматического импорта в формат системы управления базами данных (СУБД) FoxBase plus (версия 2.0).

Четвертый (заключительный) этап рассматриваемого блока работ производился с использованием математического обеспечения, созданного с использованием средств, предоставляемых стандартной СУБД FoxBase plus. Выбор конкретной среды разработки не имел решающего значения, поскольку все современные СУБД предоставляют разработчику мощные средства сортировки данных, что собственно и являлось основной задачей на данном этапе исследований. Далее описывается последовательность процессов, выполняемых программой, без представления алгоритма и исходного кода. Подготовленные в ходе 2-го этапа работ данные импортировались в файл-таблицу (табл. 2).

Таблица 2

**Форма представления итогов второго этапа сортировки  
повыделного банка данных**

Поле	Тип данных	Ширина	Точность
Номер квартала	Цифровой	5	0
Номер выдела	Цифровой	3	0
Площадь выдела	Цифровой	7.	1
Коэффициент состава-1	Цифровой	2	0
Порода-1	Символьный	5	
Коэффициент состава-2	Цифровой	2	0
Порода-2	Символьный	5	
Коэффициент состава-3	Цифровой	2	0
Порода-3	Символьный	5	
Коэффициент состава-4	Цифровой	2	0
Порода-4	Символьный	5	
Коэффициент состава-5	Цифровой	2	0
Порода-5	Символьный	5	
Коэффициент состава-6	Цифровой	2	0
Порода-6	Символьный	5	
Коэффициент состава-7	Цифровой	2	0
Порода-7	Символьный	5	
Класс возраста	Цифровой	2	0
Средняя высота	Цифровой	2	0
Средний диаметр	Цифровой	2	0
Класс бонитета	Цифровой	1	0
Буква класса бонитета	Символьный	1	
Тип леса	Символьный	7	
ТУМ	Цифровой	3	0
Полнота	Цифровой	3	1
Запас	Цифровой	5	0
Класс товарности	Цифровой	1	0

Используя изложенную программу, получаем распределение площадей лесфонда по категориям земель, а также покрытой лесом площади и соответствующих запасов стволовой древесины по лесообразующим породам. Затем для каждой породы производим сортировку величин площадей и соответствующих им запасов по двум определяющим факторам – возрасту и классу бонитета. Установили, что в общей площади лесфонда Северского лесничества покрытая лесом площадь составляет 87%. Доля сосны в лесопокрытой площади 64, березы – 26 и ели – 10%. Результаты сортировки в поведельном банке данных запасов стволовой древесины сосны по классам возраста и бонитета представлены двояким образом (табл. 3). Во-первых, запасы стволовой древесины отнесены к

Таблица 3

Результаты сортировки запасов стволовой древесины сосны в поведельном банке лесоустроительных данных Северского лесничества

Класс бонитета	Класс возраста									Итого
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	
Ia	–	<u>105</u>	–	<u>260</u>	<u>789</u>	–	–	–	–	–
		1		3	27					31
I	<u>19</u>	<u>161</u>	<u>201</u>	<u>314</u>	<u>357</u>	<u>340</u>	<u>300</u>	<u>285</u>	<u>276</u>	–
	1	68	96	137	363	65	6	16	38	790
II	<u>25</u>	<u>155</u>	–	<u>234</u>	<u>264</u>	<u>310</u>	<u>260</u>	<u>280</u>	<u>244</u>	–
	1	5		9	21	11	3	70	41	161
III	–	–	<u>80</u>	–	–	–	<u>140</u>	<u>240</u>	<u>190</u>	–
			1				1	1	1	4
IV	–	–	<u>53</u>	<u>115</u>	<u>155</u>	–	–	<u>101</u>	<u>103</u>	–
			1	1	7			2	3	14
Итого	<u>–</u>	<u>–</u>	<u>–</u>	<u>–</u>	<u>–</u>	<u>–</u>	<u>–</u>	<u>–</u>	<u>–</u>	–
	2	74	98	150	418	76	10	89	83	1000

Примечание. Числитель – запасы, отнесенные к 1 га, знаменатель – то же, приведенные к 1000 м<sup>3</sup>.

единице площади (числитель), чтобы обеспечить возможность стыковки относительных показателей  $P_i/M$  в уравнениях (6) с систематизированным по классам возраста и бонитета поведельным бан-

ком данных, и, во-вторых, эти же стратифицированные запасы выражены в долях от 1000 м<sup>3</sup> общего запаса (знаменатель), чтобы распределение состыкованных значений  $P_i/M$ , приведенное к абсолютным значениям  $P_i$ , можно было перенести на сосновые древостои любой площади или административно-хозяйственной единицы. Поскольку выдельный банк данных, записанный на магнитных носителях, имеется лишь для половины лесхозов области, этот прием необходим при создании базы данных фитомассы для области в целом на основе обобщенного для этих лесхозов распределения запасов, аналогично приведенному в табл. 3. Распределение относительных показателей массы кроны по классам возраста и бонитета после табулирования соответствующего уравнения (6) по данным табл. 3 (числитель) приведено в табл. 4. После умножения данных табл. 4 на числовые значения табл. 3 (знаменатель) имеем итоговую массу кроны  $P_{кр} = 93,2$  т, приходящуюся на 1000 м<sup>3</sup> запаса (табл. 5). Эта цифра представляет результат взвешивания разнесенных по классам возраста и бонитета относительных показателей массы кроны ( $P_{кр}/M$ ) по фактическим соответствующим запасам  $M$ .

Таблица 4

Распределение относительных показателей массы кроны ( $P_{кр}/M$ , кг/м<sup>3</sup>) после табулирования модели (6) по данным табл. 3

Класс бонитета	Класс возраста								
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
Ia	—	171	—	116	50	—	—	—	—
I	331	116	108	84	84	94	107	114	119
II	283	101	—	87	86	82	98	97	108
III	—	—	144	—	—	—	115	88	103
IV	—	—	158	101	85	—	—	118	118

Таблица 5

Распределение массы кроны в абсолютно сухом состоянии (т), приходящейся на 1000 м<sup>3</sup> запаса стволовой древесины в сосновых древостоях Северского лесничества

Класс бонитета	Класс возраста									Итого
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	
Ia	—	0,2	—	0,4	1,3	—	—	—	—	1,9
I	0,3	7,9	10,4	11,5	30,5	6,1	0,6	1,8	4,5	73,6
II	0,3	0,5	—	0,8	1,8	0,9	0,3	6,8	4,4	15,8
III	—	—	0,1	—	—	—	0,1	0,1	0,1	0,4
IV	—	—	0,2	0,1	0,6	—	—	0,2	0,4	1,5
Итого	0,6	8,6	10,7	12,8	34,2	7,0	1,0	8,9	9,4	93,2

Для массы хвои и корней уравнения (6) при табулировании по данным табл. 3 дают отрицательные значения вследствие экстраполяции за пределы области применения, поскольку данные по Уралу при расчете моделей (6) отсутствовали. Поэтому мы попытались их скорректировать по нашим экспериментальным данным для Среднего Урала. Общее количество пробных площадей 44 с 250 модельными деревьями, класс бонитета с I по V в типах леса сосняков от разнотравного до болотного, возраст — со II по XV классы. Однако структура модели (6) оказалась неприменимой к нашим данным: определяющие факторы были статистически незначимы, а коэффициент детерминации слишком мал (0,06–0,23). Поэтому мы вернулись к модели (3), заменив в правой части уравнения (6) запас  $M$  абсолютной полнотой  $G$ , но при этом расчленив последнюю на составляющие — средний диаметр ( $D_{cp}$ , см) и плотность ( $N$ , тыс. экз./га). В итоге для скелета кроны, например, получено уравнение

$$\begin{aligned} \ln(P_i/M) = & -16,7155 + 25,5357 \ln A - 2,2484 \ln H_{100} - 3,3939 \\ \ln N + 0,3881 (\ln N)^2 + & 0,4963 \ln D_{cp} \ln A - 8,4956 (\ln A)^2 + \\ + 0,7752 (\ln A)^3 + & 0,1663 \ln N (\ln A)^2; R^2 = 0,874. \end{aligned} \quad (7)$$

По-видимому, наши экспериментальные данные получены в более широких возрастном и эколого-ценотическом диапазонах, чем данные, использованные при расчете моделей (6). В результате запас  $M$  как интегральный показатель, учитывающий также и плотность древостоя, не дал существенного вклада в объяснение изменчивости фитомассы полога на единице площади. Протабулировав уравнение (7) по заданным значениям  $A = 100$  лет,  $H_{100} = 17,5$  м и  $M = 150$  м<sup>3</sup>, приводим его к частному виду:

$$\ln P_i = -5,0060 - 0,1330 \ln N + 0,3881 (\ln N)^2 + 2,2856 \ln D_{cp}. \quad (8)$$

Приняв значение абсолютной полноты  $G = 30$  м<sup>3</sup>/га и разложив ее на составляющие в одном случае  $D_{cp} = 6$  см и  $N = 10,6$  тыс. экз./га, а в другом —  $D_{cp} = 20$  см и  $N = 0,965$  тыс. экз./га, получаем значения массы скелета полога соответственно 2,5 и 6,3 т/га, различающиеся в 2,5 раза. Иными словами, при одном и том же запасе ствольной древесины и одинаковых полнотах древостоев, но при диаметрально противоположных значениях  $D_{cp}$  и  $N$  фитомасса полога существенно различается. По-видимому, это одна из причин непригодности структуры модели (6).

В банках лесостроительных данных отсутствует показатель плотности  $N$ , но есть данные средних диаметра ( $D_{cp}$ ) и высоты ( $H_{cp}$ ) и относительной полноты ( $S$ ). Для обеспечения стыковки с моделью (7) в программу сортировки по выделному банку данных вводится дополнительный блок, включающий расчетный алгоритм

$$G_n = f(H_{cp}) \longrightarrow G = G_n S \longrightarrow N = 12,73 G/D^2_{cp}, \quad (9)$$

где первое звено представляет аналитическое выражение для нормальной абсолютной полноты ( $G_n$ ) как функции средней высоты древостоя. Некоторое усложнение процедуры формирования базы данных фитомассы с использованием уравнений (7) вместо (6), сопровождаемое большей корректностью уравнения (7), практически снимается при компьютерной реализации процедуры.

## ПРИНЦИП ФОРМИРОВАНИЯ БАЗЫ ДАННЫХ ПО ФИТОМАССЕ ЛЕСОВ ШВЕЙЦАРИИ

Структура предложенных регрессионных уравнений (7), характеризуемая набором четырех определяющих факторов, неприемлема для стыковки с банком лесоустроительных данных Швейцарии. Согласно национальной системе лесоинвентаризации Швейцарии (Schweizerisches Landesforstinventar., 1988), одновозрастные древостои составляют всего 18% лесопокрытой площади и абсолютно преобладают разновозрастные смешанные леса с вертикально сомкнутым пологом (плентервальд). Возраст и класс бонитета в обычном понимании не используются. Производительность древостоев определяется верхней высотой древостоя, высотой местоположения над уровнем моря, экспозицией, уклоном, влагообеспеченностью местообитания и др. В. Келлер (Keller, 1978) упорядочил оценку производительности древостоев, по сути повторив подход Б. П. Колесникова с соавторами (1973) при лесотипологическом районировании Урала, без ссылки на уральских исследователей. Он разработал специальную бонитетную шкалу на основе 12 типовых местообитаний, при этом каждое характеризуется специфическим сочетанием экспозиции, уклона местности и других показателей, а также специфической зависимостью верхней высоты древостоя и общей производительности от высоты над уровнем моря. Характеристика каждого местообитания дана для пяти лесобразующих пород (ель, пихта, бук, лиственница, сосна) в табличной и графической форме.

Для удобства пользования классификацией В. Келлера мы заменили дискретный набор местообитаний одним непрерывным рядом, используя метод ранжирования местообитаний по фиктивным переменным (Дрейпер, Смит, 1973). Каждому местообитанию или совокупности нескольких близких по производительности местообитаний присвоен номер (код) в порядке повышения производительности при базовом значении высоты над уровнем моря (Е) 1000 м (табл. 6).

Затем дискретную совокупность зависимостей верхней высоты от Е (Keller, 1978) мы обобщили одной двухфакторной зависимостью (рис. 5)

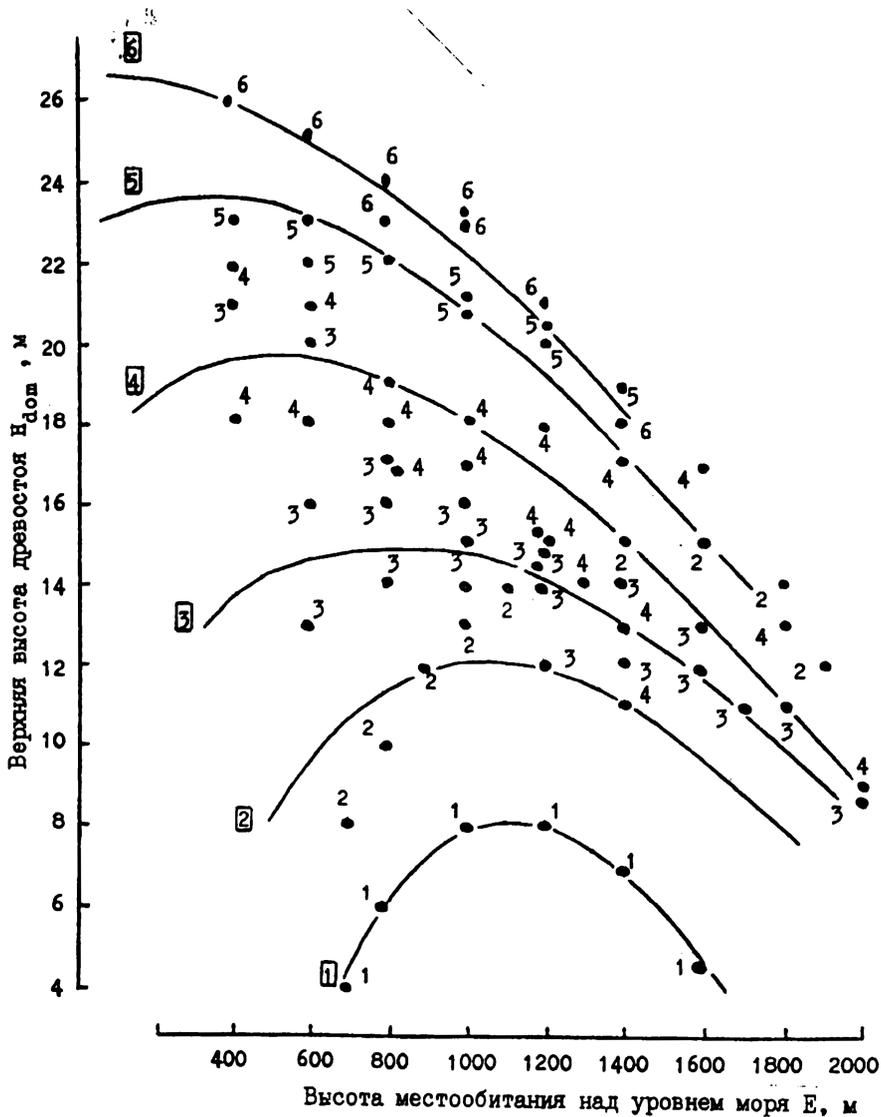


Рис. 5. Зависимость верхней высоты древостоя ( $H_{dom}$ ) от высоты местообитания над уровнем моря ( $E$ ). Цифрами обозначены коды шести укрупненных местообитаний, полученных в результате группировки 12 типовых местообитаний В. Келлера (Keller, 1978)

Таблица 6

Данные В. Келлера (Keller, 1978) о верхней высоте словых древостоев, ранжированные по эдафическим условиям. (Высота над уровнем моря 1000 м)

Код местообитания	Номер таблицы (Keller, 1978)	Верхняя высота, м
1	20	8
2	26	13
3	17, 24, 25	15, 14, 16
4	19, 22, 23	17, 18, 18
5	15, 21	21, 21
6	16, 18	23, 23

$$H_{dom} = f(E, C), \quad (10)$$

где  $H_{dom}$  — верхняя высота древостоя (м), определенная как средняя высота 100 доминирующих деревьев на 1 га;

$E$  — высота над уровнем моря, м;

$C$  — кодовый номер местообитания (табл. 6).

Для формирования базы данных о фитомассе лесов Швейцарии может быть использован банк экспериментальных данных Г. Бургера, опубликованный в серии из 13 работ по биологической продуктивности основных лесообразующих пород в течение 20...50-х гг. (Burger, 1929, 1953). Для расчета переводных коэффициентов использованы архивные материалы Швейцарского федерального института леса, снега и ландшафта по объему модельных деревьев, поскольку они не были опубликованы Г. Бургером. Для лучшей наглядности полученные для ели значения переводных коэффициентов усреднены для каждой пробной площади и нанесены на графики в зависимости от верхней высоты и высоты над уровнем моря (рис. 6 и 7). Их анализ показывает, что переводной коэффициент может быть рассчитан как функция двух переменных

$$p_i/v = f(h_{dom}, E), \quad (11)$$

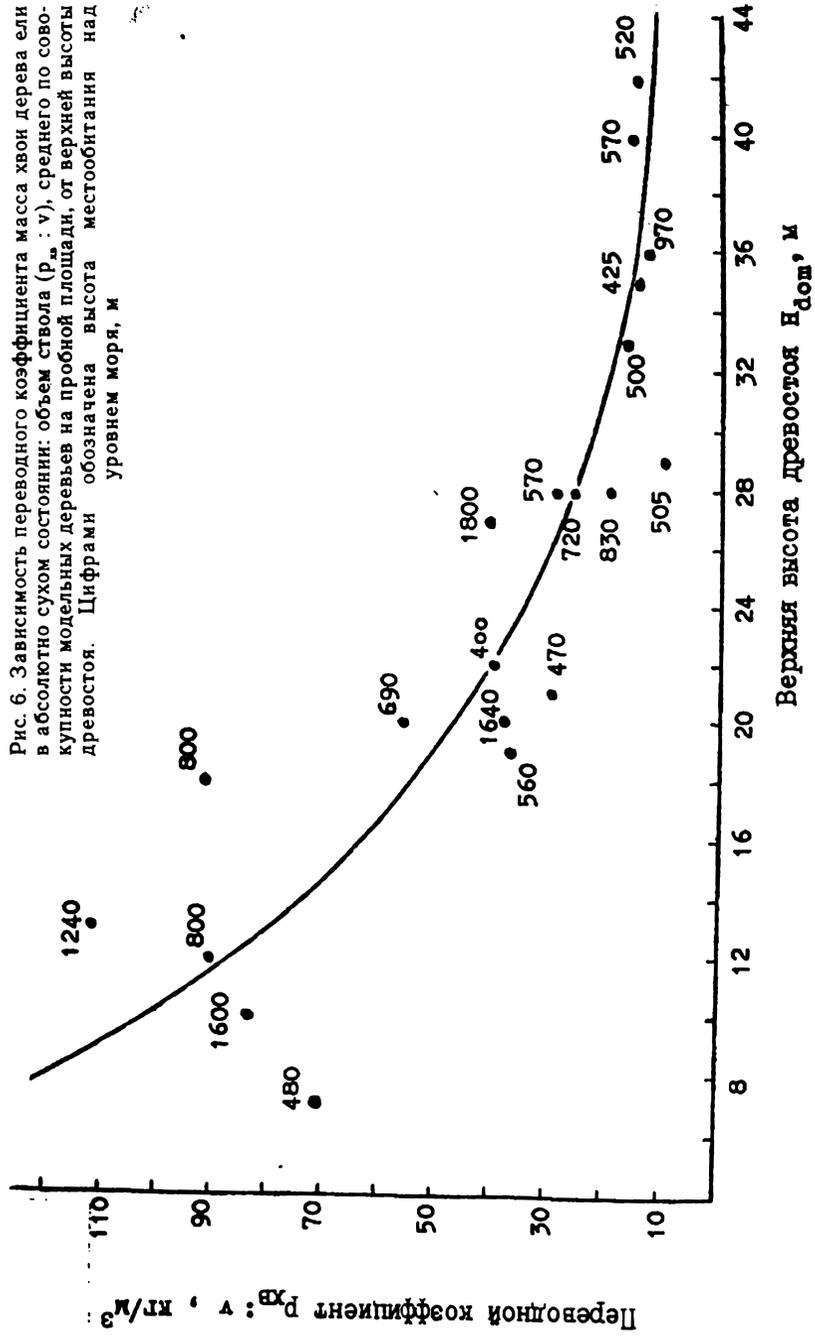
где  $p_i$  — масса хвои или скелета кроны модельного дерева в абсолютно сухом состоянии, кг;

$v$  — объем ствола дерева, м<sup>3</sup>;

$p_i/v$  — переводной коэффициент, кг/м<sup>3</sup>.

Для стыковки экспериментальных данных по фитомассе с лесоустройственной базой данных выводятся уравнения на уровне отдельного дерева (а не среднего по пробе), т. е. в уравнение (11) дополнительно включается диаметр на высоте груди ( $D$ , см), характеризующий ценотическое положение дерева

$$p_i/v = f(H_{dom}, E, D). \quad (12)$$



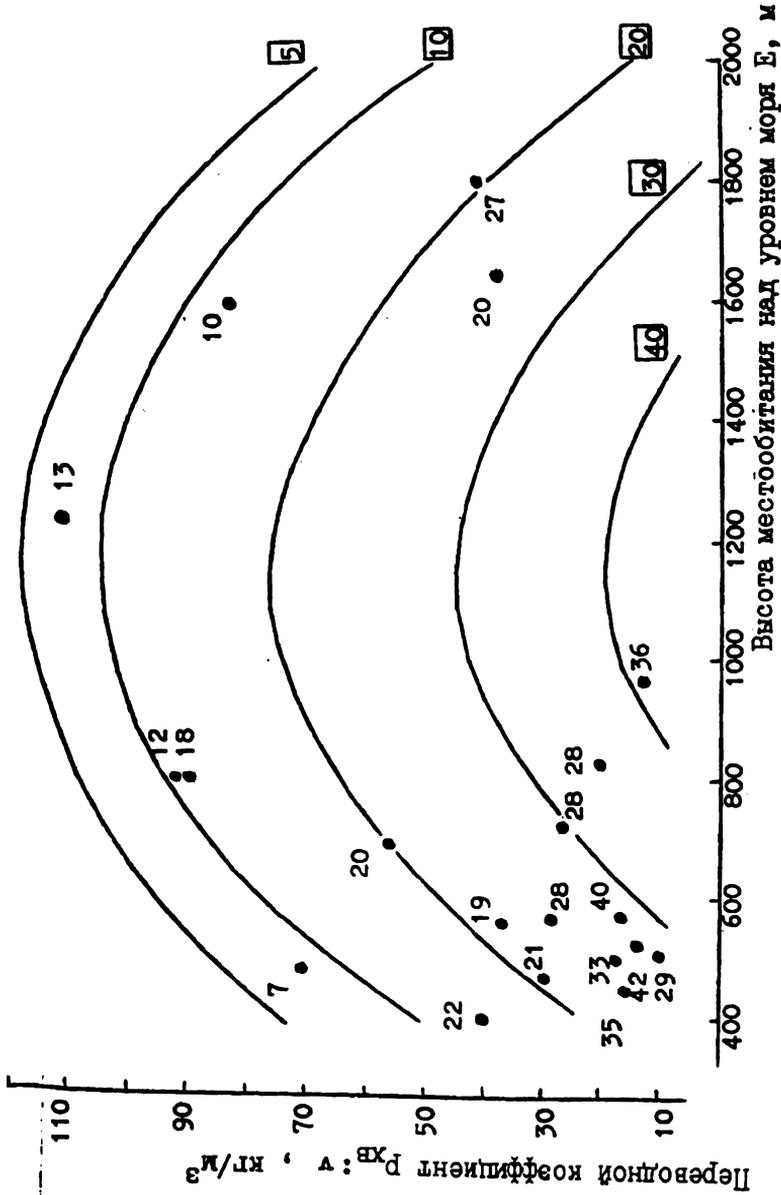


Рис. 7. Зависимость переходного коэффициента  $P_{tr}$  :  $v$ , среднего по совокупности модельных деревьев на пробной площади, от высоты местообитания над уровнем моря. Цифрами обозначена верхняя высота древостоя

Уравнения (10) и (12) образуют рекуррентную систему, в которой показатель  $N_{dom}$  является в одном случае зависимой переменной, а в другом – независимой. Наличие рядов распределения деревьев по ступеням толщины для каждой пробной площади (лесоустройство Швейцарии имеет в наличии около 1, 5 тыс. пробных площадей) дает возможность с помощью уравнений (10) и (12) сформировать базу данных по фитомассе еловых лесов Швейцарии.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для решения экологических проблем на различных уровнях лесного мониторинга необходима база данных по фитомассе лесов. Технология лесоустроительных работ ориентирована сегодня на оценку лишь запасов стволовой древесины, однако для создания баз данных фитомассы могут быть использованы лесоустроительные банки данных.

Теоретическая основа разработки баз данных по фитомассе лесов обеспечивается, во-первых, использованием регрессионного анализа для описания многомерной изменчивости фитомассы древостоев; во-вторых, применением инвариантных биологически обусловленных взаимосвязей как способа снижения трудоемкости натурных работ и, в-третьих, использованием рекуррентного принципа как методологической основы стыковки данных по фитомассе с выделными банками данных государственного учета лесов.

Разработаны методы и средства для проведения автоматической подготовки лесоустроительной информации для анализа. Созданное математическое обеспечение ЭВМ является достаточно универсальным и может быть использовано в дальнейшем при проведении подобного рода исследований. Наиболее трудоемкая часть подготовки данных полностью выполняется ЭВМ с высокой скоростью и надежностью.

## ЛИТЕРАТУРА

Аткин А. С. Закономерности формирования органической массы в лесных сообществах / Автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук. Екатеринбург: УГЛТА, 1994. 40 с.

Белов С. В. Количественная оценка гигиенической роли леса и нормы лесов зеленых зон. Л.: ЛенНИИЛХ, 1964. 65 с.

Гортинский Г. Б. и др. Продуктивность лесов европейской части СССР // Ресурсы биосферы: Итоги советских исследований по Международной биологической программе. Л.: Наука. Ленингр. отд-ние, 1975. Вып. 1. С. 34–42.

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

Загреев В. В. Географические закономерности роста и продуктивности древостоев. М.: Лесн. пром-сть, 1978. 240 с.

Исаев А. С. и др. Оценка запасов и годичного депонирования углерода в фитомассе лесных экосистем России / Исаев А. С., Коровин Г. Н., Уткин А. И. и др. // Лесоведение. 1993. № 5. С. 3–10.

Кобак К. И. Биотические компоненты углеродного цикла. Л.: Гидрометеониздат, 1988. 248 с.

Козлов М. В., Соколова И. В. Методика определения площади и массы листвы берез // Лесоведение. 1984. № 6. С. 79–83.

Колесников Б. П., Зубарева Р. С., Смолоногов Е. П. Лесорастительные условия и типы лесов Свердловской области. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1973. 176 с.

Лесков Л. В. Еще о полтергейсте // Энергия. 1992. № 8. С. 54–57.

Молчанов А. А. Продуктивность органической массы в лесах различных зон. М.: Наука, 1971. 275 с.

Онучин А. А., Борисов А. Н. Опыт таксации фитомассы сосновых древостоев // Лесоведение. 1984. № 6. С. 66–71.

Палуметс Я. К. Распределение фракций фитомассы ели европейской в зависимости от возраста и климатических факторов // Лесоведение. 1988. № 2. С. 34–40.

Поздняков Л. К. Продуктивность лесов Сибири // Ресурсы биосферы: Итоги советских исследований по Международной биологической программе. Л.: Наука. Ленингр. отд-ние, 1975. Вып. 1. С. 43–55.

Поздняков Л. К., Протопопов В. В., Горбатенко В. М. Биологическая продуктивность лесов Средней Сибири и Якутии. Красноярск: Книжное изд-во. 1969. 120 с.

Продуктивность органической и биологической массы леса. / Под ред. А. А. Молчанова. М.: Наука, 1974. 192 с.

Родин Л. Е., Базилевич Н. И. Динамика органического вещества и биологический круговорот зольных элементов и азота в основных типах растительности земного шара. М.; Л.: Наука, 1965. 253 с.

Рождественский С. Г. и др. Инвариантные продукционно-морфологические характеристики крон деревьев мелколиственных пород / Рождественский С. Г., Гульбе Г. А., Уткин А. И. и др. // Лесоведение. 1991. № 1. С. 31–41.

Смирнов В. В. Органическая масса в некоторых лесных фитоценозах европейской части СССР. М.: Наука. 1971. 362 с.

Тябера А. П. Географические закономерности производительности сосновых древостоев // Лесная таксация и лесоустройство: Межвуз. сб. науч. тр. Каунас: ЛитСХА, 1988. С. 139–147.

Усольцев В. А. Моделирование структуры и динамики фитомассы древостоев. Красноярск: Изд-во Красноярск. ун-та, 1985а. 191 с.

Усольцев В. А. Принципы полифакториальной оценки биопро-

дуктивности древостоев. Красноярск: Ин-т леса и древесины, 1985 б. 48 с.

Усольцев В. А. Рост и структура фитомассы древостоев. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1988. 253 с.

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

Усольцев В. А., Сальников А. А. Фитомасса крон березы Урало-Казахстанского региона: принципы составления нормативов // Лесные экосистемы Тургайской впадины: Тез. докл. Кустанай: Печатный двор, 1993. С. 18–20.

Уткин А. И. Исследования по первичной биологической продуктивности лесов в СССР // Лесоведение. 1970. № 3. С. 58–89.

Уткин А. И. Методика исследований первичной биологической продуктивности лесов // Биологическая продуктивность лесов Поволжья. М.: Наука. 1982. С. 59–72.

Уткин А. И. Теплота сгорания как экологическая мера // Чтения памяти академика В. Н. Сукачёва.: Вопросы биогеоценологии и географии. М.: Наука, 1986. Вып. III. С. 13–60.

Уткин А. И. Предисловие // Анализ продукционной структуры древостоев. М.: Наука, 1988. С. 3–5.

Adams P. W. Estimating biomass in northern lower Michigan forest stands // Forest Ecol. Manage. 1982. Vol. 4. P. 275–286.

Armentano T. V., Ralston C. W. The role of temperate zone forests in the global carbon cycle // Can. J. For. Res. 1980. Vol. 10. P. 53–60.

Birdsey R. A. Inventory of carbon storage and accumulation in U. S. forest ecosystems // Research in forest inventory, monitoring, growth and yield: Proceedings from IUFRO XIX World Congress. Montreal, Canada, 1990. P. 24–31.

Birdsey R. A. Changes in forest carbon storage from increasing forest area and timber growth. In: Sampson R. N. and Hair D. (eds.). Forests and Global Warming, Washington, DC.: Amer. For. Association, 1992.

Bonnor G. M. Inventory of forest biomass in Canada. – Can. Forest. Serv., Petawawa National Forestry Institute, 1985. 63 с.

Brown S., Gillespie A. J. R., Lugo A. Biomass estimation methods to tropical forests with applications to forest inventory data // Forest Sci. 1989. Vol. 35. P. 881–902.

Brown S., Lugo A., Chapman J. Biomass of tropical tree plantations and its implications for the global carbon budget // Can. J. For. Res. 1986. Vol. 16. N 2. P. 390–394.

Cannell M. G. R. World forest biomass and primary production data. Academic Press Inc. (London) LTD. 1982. 391 p.

Chiba Y. Plant model analysis based on the pipe model theory. I.A

statical model withih the crown // *Ecol. Res.* 1990. Vol. 5. P. 207–220.

Delcourt H. R., West D. C., Delcourt P. A. Forests of the south eastern United States : quantitative maps for aboveground woody biomass, carbon and dominance of major tree taxa // *Ecology*. 1981. Vol. 62. P. 879–887.

Flury Ph. Untersuchungen ueber das Verhaeltniss der Reisigmasse zur Derbholzmasse // *Mitt. Schweiz. Centralanstalt fuer das forstliche Versuchswesen*, 1892. Bd. 2. S. 25–32.

Global BIOME program. U. S. Environmental Protection Agency. Corvallis, 1991. 8 p.

Hitchcock H. C. III. Converting traditional CFI data into biomass values: a case study. In: Frayer W. D. (ed.). *Forest Resource Inventories*, Vol. II. Colorado State Univ., Fort Collins, CO, 1979. P. 596–614.

Horntvedt R. Crown density of spruce trees related to needle biomass // *Forest Ecol. Manage.*, 1993. Vol. 59. P. 225–235.

IUFRO International Guidelines for forest monitoring IUFRO World Series, 1994. Vol. 5. 102 p.

Johnson W. C., Sharpe D. M. The ratio of total to merchantable forest biomass and its application to the global carbon budget. // *Can. J. For. Res.* 1983. Vol. 13. P. 372–383.

Keller W. Einfacher ertragskundlicher Bonitaetschluessel fuer Waldbestaende in der Schweiz // *Mitt. Eidgen. Anstalt Forstl. Versuchswesen*, 1978. Bd. 54, H. 1. 98 p.

Kolchugina T. P., Vinson T. S. Equilibrium analysis of carbon pools and fluxes of forest biomes in the former Soviet Union // *Can. J. For. Res.* 1993a. Vol. 23. N 1. P. 81–88.

Kolchugina T. P., Vinson T. S. Comparison of two methods to assess the carbon budget of forest biomes in the former Soviet Union // *Water, Air and Soil Pollution*. 1993b. Vol. 70. P. 207–221.

Kraeuchi N. Climate change and forest ecosystems – an overview. In: Schlaepfer R. (ed.). *Long-term implication of climate change and air pollution on forest ecosystems. Progress report of the IUFRO Task Force «Forest, Climate and Air Pollution»*. 1993. Vienna, IUFRO; Birmensdorf, WSL. IUFRO World Series, Vol. 4. P. 53–76.

Nadkarni N. M., Parker G. Creation of the canopy research network // *Ecological Modelling*. 1994. Vol. 71. P. 289.

Olson J. S., Watts T. A., Allison L. J. Carbon in live vegetation of major world ecosystems // *Oak Ridge Nat. Lab., ORNL-5862*. 1983. 164 p.

Palumets J. Analysis of phytomass partitioning in Norway spruce. Tartu: Tartu Univer., VIII Scripta Botanica, 1991. 95 p.

Penner M. Canada's biomass inventory: deriving biomass from volume // *Water, Air and Soil Pollution*, 1995. Proc. Int. Meeting «Boreal Forests and Global Change». Canada, Saskatoon, 25–28 September 1994 (in press).

Sampson R. N. Forestry opportunities in the United States to mitigate the effects of global warming // *Water, Air and Soil Pollution*. 1992. Vol. 64. P. 157–180.

Schlaepfer R. (ed.). Long-term implications of climate change and air pollution on forest ecosystems. Progress report of the IUFRO Task Force «Forest, Climate Change and Air Pollution». 1993. Vienna, IUFRO; Birmensdorf, WSL. IUFRO World Series, Vol. 4. 133 p.

Schweizerisches Landesforstinventar. Ergebnisse der Erstaufnahme 1982–1986. Eidgen. Anstalt fuer das forstliche Versuchswesen, Berichte, Nr. 305. 1988. 375 p.

Sharp D. D., Lieth H., Whigham D. Assessment of regional productivity in North Carolina. In: *Primary productivity of the biosphere*. Ecol. Studies, Vol. 14. Lieth H. and Whittaker R. H. (eds.), 1975. Springer-Verlag, New York. P. 131–146.

Shinozaki K., Yoda K., Hozumi K., Kira T. A quantitative analysis of plant form – the pipe model theory // *Jap. J. Ecol.* 1964. Vol. 14, N 3. 1: Basic analysis. P. 97–105; N 4. 2: Further evidence of the theory and its application in forest ecology. P. 133–139.

Shvidenko A., Nilsson S., Rozhkov V. Status and possibilities for increased influences of the terrestrial biota on the carbon budget in the territories of the former USSR. *Proceedings of Air. D. West. Assn. Int. Conf., USA, 1994* (in press).

Smith J. H. G. Methods for use of timber inventory data to estimate averages and upper limits to growth and yield of biomass. In: *Working Party on the Mensuration of the Forest Biomass S4.01: Mensuration, Growth and Yield, June 22, 1976*. Oslo, Norway., Univ. Maine, Orono. P. 163–174.

Takahashi K. (ed.). *Interim Report of Joint Research Project «Carbon Storage and Carbon Dioxide Budget in Forest Ecosystems» between Japan and Russia, 1994*. Forestry and Forest Products Research Institute, Sapporo; Yakutsk Institute of Biology, Russia. 105 p.