

УДК 574.45

ШВИДЕНКО А.З.

*Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН и Междуна-
родный институт прикладного системного
анализа, Лаксенбург, Австрия*

ЩЕПАШЕНКО Д.Г.

*Московский государственный университет леса,
Мытищи Московской области*

НИЛЬСОН С.

*Международный институт прикладного системно-
го анализа, Лаксенбург, Австрия*

МАТЕРИАЛЫ К ПОЗНАНИЮ СОВРЕМЕННОЙ ПРОДУКТИВНОСТИ ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМ РОССИИ

1. Введение

Однозначного определения термина «продуктивность лесов» в отечественной науке не существует. С ресурсной точки зрения, интересующей в первую очередь практическое лесное хозяйство, это запас древостоя или некоторых его частей (например, запас деловой древесины), а также показатели изменения запаса – текущие и средние приросты, которые могут определяться как по наличному запасу, так и по общей продуктивности древостоев. Измеряются эти величины в объемной мере, отнесенной к стволовой древесине всех живых деревьев древостоя. В части экологических запросов, интерес представляют валовая продукция (общий фотосинтез, брутто-первичная продукция, Gross Primary Production) экосистем, чистая первичная (нетто-первичная, Net Primary Production), чистая экосистемная (ЧЭП, Net Ecosystem Production) и чистая биомная (ЧБП, Net Biome Production) продукции, измеряемые в единицах массы сухого вещества или углерода ($\text{г}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{год}^{-1}$ или $\text{Мг}\cdot\text{га}^{-1}\cdot\text{год}^{-1}$). Эти показатели играют основополагающую роль в оценке биосферной роли лесов, в частности, в оценке углеродного бюджета лесных экосистем. Третья группа показателей используется для оценки растительной биомассы, включая фитомассу (массу живых растений экосистемы) и детрит (мертвое вещество растительного происхождения). В большинстве исследований понятие «детрит» ограничивается крупными древесными остатками (coarse woody debris) – сухостой, валеж и сухие ветви растущих деревьев. Опад зеленых частей, генеративных органов, равно как и мелкие обломки ветвей (обычно <1 см в толстом конце) относят к лесной подстилке, которая рассматривается как почвенное тело. Учет биомассы, как и показателей биологической продукции, пока остается преимущественно научной задачей, хотя развитие пост-Киото международного переговорного процесса существенно сближает традиционные «практические» и «научные» проблемы количественного описания лесов и функций, выполняемых ими.

Разумеется, конкретные цели исследования определяют специфику требований к точности и детальности оценки показателей продуктивности леса. Здесь мы ограничиваем наше рассмотрение преимущественно проблемой оценивания на уровне крупных регионов и страны в целом. Получаемые результаты имеют смысл для обоснования стратегических управленческих решений на федеральном уровне и, главным образом, для познания биосферных функций лесов страны, в частности, в связи с обязательствами России по ряду международных конвенций и соглашений (таких как Рамочная конвенция ООН по климатическим изменениям, протокол Киото, национальные данные к очередному глобальному учету лесов мира – FRA-2010).

В настоящей работе мы рассматриваем два важнейших показателя продуктивности – фитомассу и чистую первичную продукцию (ЧПП) лесных экосистем России. За истекшие 15 лет было опубликовано несколько эмпирических («инвентаризационных») оценок фитомассы лесов страны в целом [1, 11, 12, 13, 14, 24, 26]. Все они были основаны на данных Государственных учетов лесного фонда (ГУЛФ) разных лет и реализовали, в том или ином виде, идею перехода от таксационных показателей древостоев (или их совокупностей) к фитомассе экосистем методами регрессионного анализа. Исследования различались существенно, как в части детальности подхода (в большинстве публикаций использовались агрегированные данные учета по субъектам Российской Федерации), так и в применяемых методических подходах и моделях. Вместе с тем, итоговые оценки, приводимые различными группами в последнее десятилетие, не различались больше, чем на $\pm 10\%$. Фундаментальные работы в изучении биологической продуктивности лесов страны были выполнены В.А. Усольцевым [17, 18], однако результаты инвентаризации фитомассы лесов были опубликованы им только для нескольких уральских субъектов Российской Федерации. Из опубликованных ранее оценок фитомас-

сы лесов для страны в целом, по-видимому, один из наиболее обоснованных результатов был получен группой Международного института прикладного системного анализа (ИИАСА) совместно с Институтом леса СО РАН и Московским государственным университетом леса [26], в силу (1) использования наиболее детальных исходных данных - по лесным предприятиям (общим числом около 2000 по стране), (2) использования одной из самых полных баз данных полевых измерений фитомассы на пробных площадях; и (3) применения нелинейных множественных регрессионных уравнений в качестве средства перехода от таксационных показателей, приводимых в данных ГУЛФ, к массе фракций фитомассы.

За последние годы произошли заметные изменения в лесном фонде страны и появились новые экспериментальные данные по измерениям фитомассы на пробных площадях, на основе которых прежние модели оценки фитомассы были уточнены. В настоящей работе мы приводим новую оценку запасов фитомассы, полученную на основании данных ГУЛФ 2003 года. В целях оценки динамики, аналогичным образом, но по обновленным моделям, была также произведена ревизия оценки фитомассы лесов России по состоянию на 1993 год. Эти данные и анализ результатов, опубликованных другими авторами, позволяют оценить уровень полноты и надежности современного знания в этой области.

Чистая первичная продукция (ЧПП) является важнейшим индикатором, отражающим особенности состояния и функционирования лесных экосистем. Она представляет, наряду с гетеротрофным дыханием, один из двух главнейших потоков обмена углерода между экосистемами и атмосферой, определяя степень влияния растительности на глобальный углеродный бюджет. С другой стороны, будучи климатически обусловленной, ЧПП является объективным количественным показателем реакции экосистем на климатические изменения. Леса бореальной зоны служат одним из основных стабилизирующих элементов устойчивости климатической системы планеты в высоких широтах, поэтому знание ЧПП лесов является исключительно важным для познания современного состояния и функционирования лесных экосистем. Однако существует немного работ на эту тему, а опубликованные средние оценки ЧПП для покрытых лесной растительностью земель России варьируют более чем в 2 раза (от 200 до 614 г С м⁻²·год⁻¹) [10, 15, 22, 25, 46], что предопределяет целесообразность системного анализа проблемы.

Общепринятое в экологии определение ЧПП как разницы между валовой продукцией и автотрофным дыханием обычно ассоциируется с количеством создаваемого экосистемой органического вещества за единицу времени [4]. Теоретически, если рассматривается непрерывный производственный процесс на «бесконечно малых» промежутках времени, эти два определения идентичны. Однако основные эмпирические результаты по оцениванию ЧПП в нашей стране были получены статистическими методами (почти исключительно использующими деструктивные измерения в экосистемах), которые базируются на последовательности измерений с интервалом в недели и месяцы. При этом некоторые компоненты ЧПП, приходящиеся, в частности, на корневые эксудаты или органические летучие вещества, не могут быть учтены. Величина этой недооценки для лесов бореальной зоны превышает, как правило, 20 % [39, 81, 82]. Второй источник систематического занижения первичной продукции лесов заключается в неполноте измерений ЧПП некоторых компонентов биоценозов, таких как тонкие корни деревьев или подземная часть нижних ярусов растительности. В конечном счете, это приводит к тому, что многочисленным полевым определениям ЧПП, в том числе собранным в широко известных базах данных (в частности, БД, инициированная Н.И. Базилевич [4] и составившая основу наиболее полных существующих БД, например, составленных В.А. Усольцевым [17, 18] и Д.Г. Щепаченко и др. [30]), свойственны значительные систематические погрешности, величина которых неизвестна. В то же время, необходимость эмпирической основы для верификации всех модельных и теоретических подходов к оценке ЧПП лесных экосистем очевидна.

Существует значительное количество «процессных» моделей разного пространственного и временного разрешения, призванных описывать механизмы функционирования экосистем, включая показатели продуктивности. Модели такого типа являются одним из очень немногих средств для выявления реакций экосистем на изменения состояния внешней среды, например, увеличение концентрации CO₂ или осадений азота. Однако практическое значение таких моделей ограничено. Они базируются на более или менее правдоподобных логических или экспериментально полученных предположениях, используют многие десятки, а иногда сотни параметров, объединенных в некоторую систему, но, как правило, явно не используют основополагающие экологические принципы и не рассматривают поведение моделируемой системы как единого целого. К тому же, моделям свойственны значительные упрощения как в части классификации (количество функциональных типов растительности, рассматриваемых в моделях такого типа, как правило, очень ограничено), описании процессов и отражении региональной специфики (большинство моделей не включает влияние нарушений или рассматривает «потенциальную растительность»). Ряд важных индикаторов определяется весьма

приближенно, а некоторые закономерности идеализированы и могут давать неучитываемые смещения в реальных условиях [84]. Это приводит к настолько большому разнообразию результатов, как в оценках важных промежуточных результатов, так и в предсказании реакций экосистем на возрастание концентраций CO_2 [77], или обогащение местообитаний азотом [53], что препятствует достижению некоторого общего понимания реакции лесных экосистем на глобальные изменения. Однако результаты процессных моделей являются одним из очень немногих средств познания поведения экосистем в условиях быстро меняющегося мира.

Данные лесоинвентаризации являются практически единственным источником информации для «эмпирического» определения ЧПП лесов на больших площадях. Однако задача эта осложняется тем, что данные учета лесов не были предназначены для такой цели (сложность такого рода существует, хотя и в меньшей степени при оценке фитомассы), и исследователи вынуждены разрабатывать методы и приемы, позволяющие обойти или хотя бы смягчить эту проблему. В настоящей работе применен новый, «полуэмпирический» метод оценки ЧПП лесных экосистем Северной Евразии [27, 76]. Метод был разработан, исходя из целесообразности (1) максимально использовать накопленные опытные данные о динамике, росте и продуктивности лесных экосистем, (2) необходимости получения несмещенных оценок ЧПП, и (3) использования такой аналитической формы оценивания, которая позволяла бы, до возможной степени, объединять различного рода результаты наблюдений с моделями, описывающими механизм продукционного процесса, что исключительно важно в условиях быстро меняющегося мира. Основная идея подхода заключалась в использовании в качестве основы не результатов непосредственных измерений ЧПП, а закономерностей динамики фитомассы лесов, как более надежно определяемого показателя. Фитомасса и ЧПП (как и ранее опубликованные оценки текущих приростов и отпада [29]) определяются по согласованной методике и на одной и той же исходной информации. Это представляет дополнительные возможности для оценки неопределенности результатов и их гармонизации.

Дополнительная сложность заключается в трудностях корректного сравнения результатов различных публикаций, следующих из разнообразия подходов, неодинаковых определений, временной и территориальной несопоставимости оценок. Некоторые опубликованные результаты получены по чрезмерно упрощенным методам и с использованием мало обоснованных предпосылок. Иногда встречается подмена понятий. Так, в некоторых работах текущий прирост по наличному запасу для больших территорий рассматривается как синоним разницы запасов по двум последовательным учетам, между лесными и покрытыми лесной растительностью землями не проводится разницы и т.д. Поэтому мы однозначно определяем здесь все показатели, толкование которых может быть отлично от «стандартного». Категории лесных земель, а также все лесотаксационные термины и показатели, использованные в работе, соответствуют действующей лесоустроительной инструкции. Расчеты и оценки даны для покрытых лесной растительностью земель России по состоянию на 1 января 2003 г. (ГУЛФ-2003), площадь которых составляла $776.1 \cdot 10^6$ га, и на 1 января 1993 г. (ГУЛФ-1993) – $763.5 \cdot 10^6$ га [16, 23].

2. Фитомасса лесов России и ее динамика в 1993 - 2003 гг.

2.1. Материал и метод оценки

В последние годы общепринятый метод перехода от запаса древостоев к фитомассе базируется на применении переводных (конверсионных) коэффициентов $R_F = M_F/GS$, где M_F – масса фракции фитомассы (F) и GS – запас древостоя или некоторого их объединения. Как было убедительно показано в ряде исследований [17, 18, 26], такой подход обеспечивает удовлетворительную точность оценки, если R_F установлены достаточно надежным образом. В настоящей оценке использована последняя версия динамических моделей фитомассы, разработанных на основе данных 3745 пробных площадей [63]. «Переводной коэффициент», R_F , определялся по уравнениям

$$R_F = c_0 \cdot SI^{C_1} \cdot A^{(C_2 + C_3 \cdot RS + C_4 \cdot RS^2)}, \quad (1)$$

$$R_F = c_0 \cdot A^{C_1} \cdot SI^{C_2} \cdot RS^{C_3} \cdot \exp(C_4 \cdot A + C_5 \cdot RS), \quad (2)$$

где A , SI и RS – возраст, индекс класса бонитета и относительная полнота, соответственно, и C_i – регрессионные коэффициенты.

Модели (1) и (2) были отобраны из 8 испытанных нелинейных многомерных уравнений как наиболее точные и адекватные. Они несколько отличаются от часто применяемых уравнений алло-

метрического типа. Одним из преимуществ моделей типа (1) и (2) является их немонотонность при некоторых значениях параметров, что важно для адекватного описания динамики ряда фракций фитомассы лесных экосистем (например, фитомассы ветвей древостоев бука и дуба). По указанным моделям вычислены фитомасса основных фракций: стволовой древесины в коре; коры стволов деревьев; древесины кроны; листвы и хвои; корней, с выделением фракции тонких корней (диаметром до 2 мм). Фитомасса нижних ярусов, включающих подрост, подлесок и живой напочвенный покров, определена также по уравнениям (1) и (2), но с заменой переводного коэффициента на непосредственные весовые значения фитомассы. Детали подхода, особенности методики, параметры, структура и точность разработанных моделей обсуждаются в [76].

На основе данных ГУЛФ 1993 и 2003 гг. были сформированы базы данных, в которых для каждого лесного предприятия приведено распределение запасов древостоев по древесным породам, группам возраста, полнотам и классам бонитета. Группы возраста трансформировались в конкретные возрасты на основе региональных правил разделения лесов на возрастные категории. Ранее эта база была использована нами для оценки текущих приростов и отпада для лесов России [29]. Данные, необходимые для использования в моделях, доступны только для лесов, управляемых органами Министерства природных ресурсов РФ (92.6 % всех покрытых лесной растительностью земель страны в 2003 году). Для остальных лесов поправки принимались на уровне субъектов Российской Федерации пропорционально запасу древостоев при оценке фитомассы и пропорционально площади лесов – при вычислении ЧПП. В необходимых случаях для лесов других фондодержателей вносились экспертные поправки с учетом качественного состояния лесов в сравнении с лесами, управляемыми государственными органами лесного хозяйства; однако эти поправки относились к небольшой части покрытых лесной растительностью земель и в подавляющем числе субъектов РФ заведомо находились в пределах точности оценивания.

2.2. Фитомасса лесов в 2003 и 1993 гг.

В табл. 1 и 2 приведены обобщенные данные по оценке фитомассы лесных экосистем России на основе ГУЛФ-2003.

Оставляя читателю возможность детального анализа данных табл. 1-2, обозначим основные результаты. Леса России содержали в 2003 году в фитомассе 34.45 Пг (1 Пг = 10^9 т) углерода со средней плотностью по стране 4.37 кг С м^{-2} . В пространственном распределении фитомассы отчетливо наблюдаются географический и высотный градиенты (рис. 1). Несколько менее трети (28.6 %) фитомассы содержится в лесах Европейской части. Средняя плотность фитомассы в Европейской части на 30 % выше, чем в Азиатской - 5.34 кг С м^{-2} против 4.13 кг С м^{-2} . В структуре фитомассы преобладает надземная древесина (66.4 % от общей, в том числе стволовая древесина в коре 56.3 % и 10.1 % приходится на ветви, рис.2). Масса коры составляет 8.5 % от общей фитомассы лесных экосистем. Обращает на себя внимание высокая доля фитомассы корней деревьев – около 40 % от массы стволов. Причина этому в больших территориях низкопродуктивных насаждений севера с повышенной долей корней. Запасы листвы и хвои деревьев составляют в среднем 3.9 %, а запасы всех зеленых частей экосистем, т.е. фотосинтетический аппарат лесных экосистем оценен в 6.5 % от общей фитомассы. Количество фитомассы в нижних ярусах растительности (вместе подземной и надземной) составляет 7.1 %, причем доля этой фракции в общем запасе фитомассы в масштабе страны в среднем возрастает с юга на север, а на региональном масштабе - от более продуктивных к менее продуктивным местообитаниям.

Почти три четверти (72.2 %) фитомассы сосредоточено в хвойных лесах, 21.0 % в мягколиственных и 3.8 % - в лесах с преобладанием твердолиственных пород. Кустарники, учитываемые как покрытые лесной растительностью земли на территориях, где «высокие» леса не растут по климатическим ограничениям, содержат 3.0 % общей фитомассы покрытых лесной растительностью земель страны.

Существенный интерес представляют также некоторые иные результаты. Средняя условная плотность древесины стволов деревьев (в коре), т.е. отношение массы стволов к их объему, составляет 0.421 т м^{-3} , несколько выше она в Азиатской (0.424 т м^{-3}), чем Европейской (0.411 т м^{-3}) частях страны. Самые высокие значения условной плотности приходятся на твердолиственные породы, особенно на дубовые древостои и дальневосточные твердые березы. Пространственная изменчивость условной плотности одних и тех же пород статистически значима и зависит от таксационных признаков древостоев [76], впрочем, еще в [20] было показано, например, что коэффициент варьирования средних значений плотности сосновой древесины сосны на территории СССР составляет 19.4 %. Однако это еще раз подтверждает нецелесообразность использования средних значений плотности для страны.

Таблица 1

**Распределение фитомассы лесных экосистем России
по основным лесообразующим породам и фракциям, Тг (млн тонн) сухого веса (2003 год)**

| Породы и группы пород | Компоненты фитомассы, абсолютно сухой вес, Тг (10^6 т) | | | | | | Всего | ЗЧ | |
|---------------------------------|---|---------------|---------------|-----------------|----------------|---------------|---------------|----------------|---------------|
| | ствол | в т.ч. кора | ветви | листья/ хвоя | корни | ПДР, ПДЛ | | | ЖНП |
| Европейская часть России | | | | | | | | | |
| Хвойные | 6142.4 | 728.2 | 1055.5 | 601.7 | 2282.2 | 210.3 | 481.4 | 10773.5 | 857.4 |
| в т.ч. сосна | 2918.6 | 296.9 | 388.5 | 200.7 | 776.3 | 51.7 | 282.9 | 4618.9 | 329.4 |
| ель | 3021.5 | 402.1 | 626.6 | 380.3 | 1446.0 | 154.4 | 192.5 | 5821.3 | 503.6 |
| пихта | 88.2 | 11.3 | 16.7 | 8.2 | 18.9 | 1.8 | 2.0 | 135.9 | 9.5 |
| лиственница | 28.7 | 5.1 | 4.3 | 1.0 | 12.4 | 0.7 | 1.6 | 48.6 | 1.9 |
| кедр | 85.3 | 12.8 | 19.3 | 11.5 | 28.7 | 1.7 | 2.3 | 148.7 | 12.9 |
| ТЛП | 515.5 | 71.8 | 133.0 | 24.9 | 326.8 | 14.0 | 23.5 | 1037.7 | 38.5 |
| в т.ч. дуб | 278.8 | 46.7 | 71.0 | 17.9 | 209.9 | 8.3 | 15.2 | 601.1 | 26.5 |
| МЛП | 4363.4 | 758.2 | 791.0 | 191.9 | 1437.2 | 94.6 | 189.5 | 7067.6 | 296.1 |
| в т.ч. береза | 3185.6 | 574.7 | 574.6 | 145.0 | 942.3 | 72.4 | 143.5 | 5063.5 | 224.1 |
| осина | 737.5 | 122.4 | 125.9 | 26.8 | 279.2 | 13.7 | 28.9 | 1212.1 | 42.5 |
| ПП | 12.3 | 1.6 | 2.8 | 0.6 | 6.5 | 0.2 | 0.4 | 22.7 | 0.8 |
| Кустарники | 0.0 | - | 2.7 | 1.2 | 2.1 | - | 2.4 | 8.3 | 2.2 |
| Всего | 11033.6 | 1559.9 | 1984.9 | 820.3 | 4054.9 | 319.0 | 697.1 | 18909.7 | 1194.8 |
| Азиатская часть России | | | | | | | | | |
| Хвойные | 22892.9 | 3517.7 | 3473.8 | 1234.4 | 8955.8 | 852.3 | 2079.0 | 39488.2 | 2321.7 |
| в т.ч. сосна | 4278.0 | 467.4 | 636.1 | 342.2 | 1290.2 | 116.7 | 624.5 | 7287.6 | 627.0 |
| ель | 1767.8 | 261.0 | 298.1 | 158.7 | 1016.6 | 96.7 | 116.0 | 3453.9 | 234.1 |
| пихта | 966.4 | 124.1 | 187.2 | 109.1 | 217.6 | 29.4 | 36.5 | 1546.2 | 132.5 |
| лиственница | 12407.0 | 2232.2 | 1764.7 | 373.8 | 5464.3 | 460.7 | 1128.3 | 21598.9 | 963.3 |
| кедр | 3473.6 | 433.1 | 587.8 | 250.7 | 967.2 | 148.8 | 173.7 | 5601.7 | 364.8 |
| ТЛП | 753.9 | 110.8 | 215.0 | 32.8 | 435.4 | 63.8 | 74.9 | 1575.8 | 81.9 |
| в т.ч. дуб | 185.3 | 28.1 | 52.4 | 9.4 | 119.7 | 12.0 | 17.0 | 395.8 | 19.8 |
| МЛП | 4330.1 | 736.7 | 931.5 | 194.5 | 1556.2 | 184.0 | 324.9 | 7521.2 | 379.7 |
| в т.ч. береза | 3302.7 | 567.7 | 703.3 | 152.8 | 1165.3 | 149.8 | 261.4 | 5735.4 | 302.3 |
| осина | 849.7 | 138.3 | 183.5 | 30.7 | 301.9 | 28.5 | 50.9 | 1445.3 | 59.6 |
| ПП | 0.5 | 0.1 | 3.3 | 1.1 | 8.5 | 0.0 | 4.1 | 17.6 | 2.7 |
| Кустарники | 174.6 | - | 453.9 | 415.0 | 741.0 | - | 367.9 | 2152.4 | 562.2 |
| Всего | 28152.0 | 4365.3 | 5077.6 | 1877.8 | 11696.9 | 1100.2 | 2850.7 | 50755.1 | 3348.1 |
| Россия в целом | | | | | | | | | |
| Хвойные | 29035.3 | 4245.9 | 4529.3 | 1836.1 | 11238.0 | 1062.6 | 2560.4 | 50261.7 | 3179.0 |
| в т.ч. сосна | 7196.6 | 764.3 | 1024.6 | 542.9 | 2066.5 | 168.4 | 907.4 | 11906.4 | 956.4 |
| ель | 4789.4 | 663.1 | 924.7 | 539.0 | 2462.6 | 251.1 | 308.5 | 9275.2 | 737.7 |
| пихта | 1054.6 | 135.3 | 204.0 | 117.3 | 236.4 | 31.2 | 38.5 | 1682.0 | 142.1 |
| лиственница | 12435.7 | 2237.3 | 1769.0 | 374.8 | 5476.7 | 461.4 | 1129.9 | 21647.5 | 965.2 |
| кедр | 3558.9 | 445.9 | 607.0 | 262.1 | 995.8 | 150.5 | 176.0 | 5750.4 | 377.7 |
| ТЛП | 1269.4 | 182.7 | 348.0 | 57.7 | 762.3 | 77.8 | 98.4 | 2613.5 | 120.4 |
| в т.ч. дуб | 464.1 | 74.8 | 123.4 | 27.3 | 329.6 | 20.3 | 32.2 | 996.9 | 46.3 |
| МЛП | 8693.5 | 1495.0 | 1722.5 | 386.4 | 2993.3 | 278.6 | 514.4 | 14588.8 | 675.7 |
| в т.ч. береза | 6488.3 | 1142.4 | 1277.9 | 297.9 | 2107.6 | 222.3 | 404.9 | 10798.9 | 526.6 |
| осина | 1587.3 | 260.6 | 309.4 | 57.5 | 581.1 | 42.2 | 79.9 | 2657.4 | 102.1 |
| ПП | 12.8 | 1.7 | 6.0 | 1.7 | 15.1 | 0.2 | 4.4 | 40.2 | 3.5 |
| Кустарники | 174.6 | - | 456.6 | 416.2 | 743.1 | - | 370.2 | 2160.7 | 564.3 |
| Всего | 39185.6 | 5925.2 | 7062.5 | 2698.0 | 15751.8 | 1419.2 | 3547.8 | 69664.9 | 4542.9 |
| Доля фракций | 56.3 | 8.5 | 10.1 | 3.9 | 22.6 | 2.0 | 5.1 | 100 | 6.5 |

Примечание. Сокращения в таблицах 1-4: ТЛП – твердолиственные породы; МЛП – мягколиственные породы; ПП – прочие породы; ПДР, ПДЛ – подрост и подлесок (суммарно), ЖНП – живой напочвенный покров; ЗЧ – зеленые части экосистем.

Таблица 2

**Распределение фитомассы и углерода лесных экосистем России
по преобладающим породам и группам возраста (2003)**

| Породы и группы пород | Фитомасса, абсолютно сухой вес, Тг, по группам возраста | | | | | | | Углерод | | |
|--------------------------|---|---------------|----------------|---------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------------------|------------------------|
| | мол1 | мол2 | ср-воз | присп | спелые | перест | всего | Всего, Тг | плотность кг/м ² | отн, кг/м ³ |
| Европейская часть России | | | | | | | | | | |
| Хвойные | 246.2 | 934.8 | 2557.0 | 1382.1 | 2884.9 | 2768.5 | 10773.5 | 5322.1 | 4.95 | 0.388 |
| в т.ч. сосна | 93.2 | 567.8 | 1832.6 | 697.2 | 824.7 | 603.4 | 4618.9 | 2282.7 | 4.66 | 0.364 |
| ель | 150.8 | 357.3 | 645.7 | 627.9 | 1953.9 | 2085.6 | 5821.3 | 2874.3 | 5.09 | 0.412 |
| пихта | 0.5 | 3.4 | 18.6 | 14.3 | 47.9 | 51.1 | 135.9 | 67.3 | 8.54 | 0.296 |
| лиственница | 0.7 | 5.1 | 6.5 | 3.3 | 9.9 | 23.1 | 48.6 | 24.2 | 6.10 | 0.442 |
| кедр | 1.0 | 1.2 | 53.5 | 39.3 | 48.4 | 5.3 | 148.7 | 73.6 | 7.81 | 0.380 |
| ТЛП | 11.2 | 54.3 | 480.1 | 151.1 | 226.1 | 114.8 | 1037.7 | 515.7 | 8.56 | 0.546 |
| в т.ч. дуб | 7.7 | 36.7 | 305.4 | 96.6 | 124.2 | 30.5 | 601.1 | 298.5 | 7.43 | 0.514 |
| МЛП | 79.2 | 274.9 | 2695.5 | 1289.1 | 1780.8 | 948.0 | 7067.6 | 3510.0 | 5.73 | 0.433 |
| в т.ч. береза | 52.0 | 185.8 | 2187.2 | 966.2 | 1217.7 | 454.6 | 5063.5 | 2513.7 | 5.43 | 0.446 |
| осина | 20.5 | 61.9 | 161.0 | 194.1 | 370.1 | 404.5 | 1212.1 | 602.6 | 6.04 | 0.356 |
| ПП | 0.5 | 3.0 | 2.3 | 1.2 | 7.2 | 8.6 | 22.7 | 11.3 | 9.69 | 0.546 |
| Кустарники | 0.3 | 0.5 | 1.9 | 0.5 | 2.2 | 2.9 | 8.3 | 4.0 | 0.81 | 1.285 |
| Всего | 337.4 | 1267.6 | 5736.7 | 2824.0 | 4901.2 | 3842.7 | 18909.7 | 9363.0 | 5.34 | 0.411 |
| Азиатская часть России | | | | | | | | | | |
| Хвойные | 460.7 | 1362.5 | 9162.5 | 5256.0 | 12518.8 | 10727.7 | 39488.2 | 19535.8 | 4.49 | 0.406 |
| в т.ч. сосна | 126.0 | 311.3 | 1566.3 | 856.7 | 2284.6 | 2142.6 | 7287.6 | 3589.6 | 4.47 | 0.350 |
| ель | 16.0 | 31.4 | 299.9 | 339.8 | 1464.3 | 1302.4 | 3453.9 | 1708.4 | 5.78 | 0.413 |
| пихта | 16.4 | 40.4 | 263.1 | 263.0 | 665.3 | 297.9 | 1546.2 | 764.3 | 5.04 | 0.307 |
| лиственница | 261.8 | 809.1 | 4362.6 | 2097.6 | 7141.7 | 6926.1 | 21598.9 | 10701.3 | 4.00 | 0.457 |
| кедр | 40.4 | 170.2 | 2670.7 | 1699.0 | 962.9 | 58.6 | 5601.7 | 2772.2 | 6.66 | 0.349 |
| ТЛП | 8.9 | 55.6 | 237.1 | 158.3 | 715.6 | 400.2 | 1575.8 | 779.3 | 6.01 | 0.640 |
| в т.ч. дуб | 3.5 | 26.8 | 139.7 | 68.9 | 123.7 | 33.3 | 395.8 | 196.0 | 5.87 | 0.609 |
| МЛП | 111.1 | 269.7 | 1726.2 | 835.3 | 2073.6 | 2505.3 | 7521.2 | 3725.4 | 4.45 | 0.456 |
| в т.ч. береза | 83.7 | 204.3 | 1452.2 | 667.9 | 1585.9 | 1741.5 | 5735.4 | 2839.5 | 4.25 | 0.481 |
| осина | 25.4 | 57.3 | 209.1 | 126.8 | 330.3 | 696.5 | 1445.3 | 717.1 | 5.13 | 0.372 |
| ПП | 0.1 | 0.7 | 15.8 | 0.5 | 0.2 | 0.1 | 17.6 | 8.5 | 0.82 | 0.332 |
| Кустарники | 16.9 | 199.9 | 1169.0 | 235.4 | 460.4 | 70.8 | 2152.4 | 1037.1 | 1.41 | 0.664 |
| Всего | 597.8 | 1888.3 | 12310.6 | 6485.6 | 15768.6 | 13704.2 | 50755.1 | 25086.1 | 4.13 | 0.424 |
| Россия в целом | | | | | | | | | | |
| Хвойные | 706.9 | 2297.3 | 11719.5 | 6638.1 | 15403.7 | 13496.2 | 50261.7 | 24857.9 | 4.57 | 0.403 |
| в т.ч. сосна | 219.2 | 879.1 | 3398.9 | 1553.9 | 3109.3 | 2746.1 | 11906.4 | 5872.3 | 4.53 | 0.355 |
| ель | 166.8 | 388.8 | 945.6 | 967.7 | 3418.2 | 3388.1 | 9275.2 | 4582.7 | 5.35 | 0.413 |
| пихта | 17.0 | 43.8 | 281.7 | 277.3 | 713.2 | 349.0 | 1682.0 | 831.7 | 5.21 | 0.306 |
| лиственница | 262.5 | 814.2 | 4369.1 | 2100.9 | 7151.6 | 6949.2 | 21647.5 | 10725.5 | 4.00 | 0.457 |
| кедр | 41.4 | 171.4 | 2724.2 | 1738.2 | 1011.3 | 63.9 | 5750.4 | 2845.8 | 6.68 | 0.350 |
| ТЛП | 20.2 | 109.9 | 717.2 | 309.4 | 941.7 | 515.0 | 2613.5 | 1295.0 | 6.77 | 0.601 |
| в т.ч. дуб | 11.2 | 63.5 | 445.1 | 165.5 | 247.9 | 63.8 | 996.9 | 494.5 | 6.69 | 0.550 |
| МЛП | 190.3 | 544.6 | 4421.7 | 2124.4 | 3854.4 | 3453.4 | 14588.8 | 7235.4 | 4.94 | 0.445 |
| в т.ч. береза | 135.7 | 390.1 | 3639.4 | 1634.0 | 2803.6 | 2196.1 | 10798.9 | 5353.2 | 4.69 | 0.465 |
| осина | 45.9 | 119.2 | 370.1 | 320.9 | 700.4 | 1101.0 | 2657.4 | 1319.7 | 5.47 | 0.365 |
| ПП | 0.6 | 3.7 | 18.1 | 1.7 | 7.4 | 8.7 | 40.2 | 19.8 | 1.67 | 0.424 |
| Кустарники | 17.2 | 200.4 | 1170.9 | 235.9 | 462.6 | 73.7 | 2160.7 | 1041.0 | 1.40 | 0.665 |
| Всего | 935.1 | 3156.0 | 18047.4 | 9309.6 | 20669.8 | 17547.0 | 69664.9 | 34449.2 | 4.37 | 0.421 |
| Доля, % | 1.3 | 4.5 | 25.9 | 13.4 | 29.7 | 25.2 | 100 | | | |

Примечания: группы возраста – мол1 и мол2 – молодняки первого и второго классов возраста; ср-воз – средневозрастные; присп – приспевающие; перест – перестойные, отн – отношение массы фитомассы к запасу древостоев.

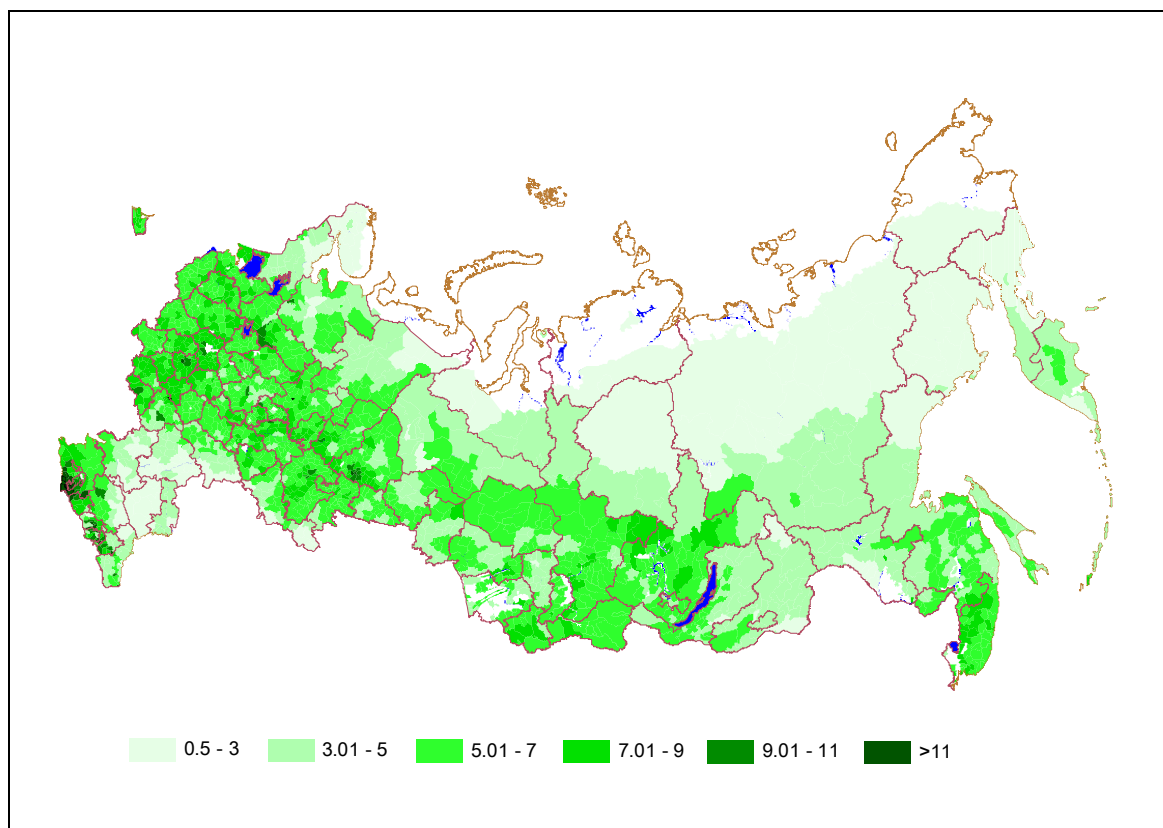


Рис. 1. Фитомасса лесов России, средние значения для покрытых лесом земель, кг С м⁻².

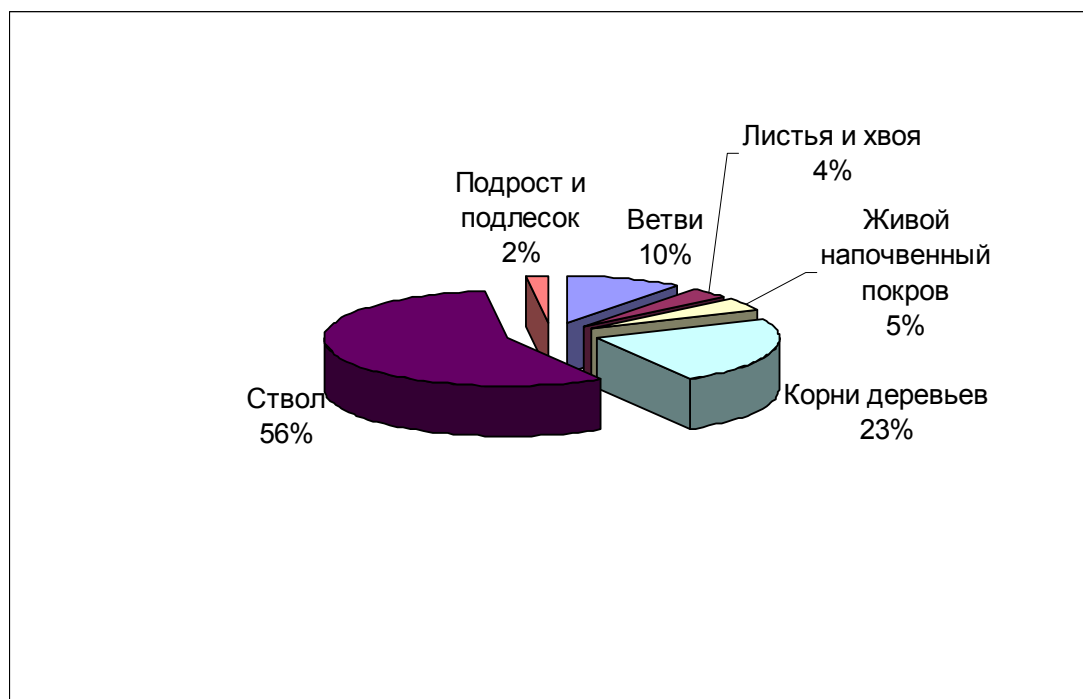


Рис. 2. Фракционная структура фитомассы лесов России.

Таблица 3

**Распределение фитомассы лесных экосистем России
по основным лесообразующим породам и фракциям, Тг (млн т) сухого веса (1993 г.)**

| Породы и группы пород | Компоненты фитомассы, абсолютно сухой вес, Тг (10 ⁶ т) | | | | | | Всего | ЗЧ | |
|-----------------------|---|---------------|---------------|-----------------|----------------|---------------|---------------|----------------|---------------|
| | ствол | в т.ч. кора | ветви | листья/ хвоя | корни | ПДР, ПДЛ | | | ЖНП |
| Европейская часть | | | | | | | | | |
| Хвойные | 5935.4 | 704.4 | 1016.6 | 576.1 | 2226.9 | 208.5 | 472.7 | 10436.1 | 875.0 |
| в т.ч. сосна | 2766.0 | 282.4 | 370.7 | 191.9 | 738.4 | 50.5 | 276.9 | 4394.3 | 345.5 |
| ель | 3001.9 | 397.2 | 612.1 | 366.4 | 1436.4 | 154.1 | 190.1 | 5761.0 | 507.7 |
| пихта | 61.2 | 7.9 | 12.1 | 6.3 | 13.6 | 1.7 | 2.0 | 96.9 | 7.8 |
| лиственница | 27.7 | 5.0 | 4.1 | 0.9 | 12.0 | 0.7 | 1.6 | 47.1 | 1.9 |
| кедр | 78.6 | 11.9 | 17.6 | 10.5 | 26.4 | 1.6 | 2.1 | 136.8 | 12.0 |
| ТЛП | 513.5 | 71.9 | 132.8 | 24.9 | 326.3 | 14.5 | 24.4 | 1036.3 | 41.5 |
| в т.ч. дуб | 293.4 | 48.6 | 74.8 | 18.6 | 218.3 | 9.1 | 16.6 | 630.8 | 29.6 |
| МЛП | 3646.3 | 642.1 | 668.0 | 166.4 | 1232.5 | 80.1 | 167.1 | 5960.5 | 274.0 |
| в т.ч. береза | 2646.4 | 483.1 | 480.1 | 124.4 | 799.6 | 61.3 | 125.7 | 4237.4 | 205.6 |
| осина | 635.3 | 107.8 | 109.7 | 24.5 | 245.1 | 12.0 | 26.9 | 1053.6 | 41.6 |
| ПП | 14.3 | 1.9 | 3.3 | 0.8 | 7.9 | 0.2 | 0.4 | 26.9 | 1.1 |
| Кустарники | 0.0 | 0.0 | 4.4 | 1.9 | 3.4 | 0.0 | 2.2 | 11.9 | 3.0 |
| Всего | 10109.5 | 1420.3 | 1825.1 | 770.1 | 3797.0 | 303.3 | 666.7 | 17471.7 | 1194.4 |
| Азиатская часть | | | | | | | | | |
| Хвойные | 23308.2 | 3575.9 | 3525.8 | 1266.5 | 9090.8 | 881.9 | 2076.8 | 40150.0 | 2569.5 |
| в т.ч. сосна | 4398.2 | 484.9 | 653.2 | 357.4 | 1319.2 | 119.7 | 643.1 | 7490.8 | 714.9 |
| ель | 1899.7 | 280.5 | 319.5 | 169.7 | 1093.8 | 100.6 | 120.1 | 3703.4 | 259.9 |
| пихта | 974.7 | 124.9 | 188.1 | 109.6 | 219.4 | 29.7 | 36.4 | 1557.9 | 136.7 |
| лиственница | 12492.1 | 2240.5 | 1766.6 | 373.6 | 5468.2 | 478.4 | 1099.6 | 21678.5 | 1066.9 |
| кедр | 3543.5 | 445.1 | 598.3 | 256.2 | 990.1 | 153.4 | 177.7 | 5719.4 | 391.1 |
| ТЛП | 717.7 | 105.6 | 205.6 | 31.3 | 415.1 | 62.1 | 72.5 | 1504.4 | 86.2 |
| в т.ч. дуб | 176.5 | 26.7 | 50.2 | 9.1 | 115.2 | 11.7 | 16.6 | 379.2 | 20.9 |
| МЛП | 4107.2 | 704.0 | 884.8 | 183.1 | 1490.9 | 175.5 | 309.3 | 7150.7 | 390.4 |
| в т.ч. береза | 3123.8 | 542.4 | 665.6 | 144.0 | 1119.0 | 142.6 | 248.8 | 5443.8 | 311.2 |
| осина | 816.2 | 132.5 | 177.2 | 28.8 | 289.5 | 27.5 | 48.8 | 1388.1 | 61.5 |
| ПП | 11.8 | 2.5 | 2.8 | 1.0 | 7.3 | 1.1 | 3.5 | 27.5 | 3.1 |
| Кустарники | 175.9 | 0.0 | 413.5 | 398.7 | 712.6 | 0.0 | 344.9 | 2045.7 | 571.2 |
| Всего | 28320.8 | 4388.0 | 5032.5 | 1880.5 | 11716.7 | 1120.6 | 2807.1 | 50878.3 | 3620.2 |
| Россия в целом | | | | | | | | | |
| Хвойные | 29243.6 | 4280.3 | 4542.4 | 1842.5 | 11317.7 | 1090.4 | 2549.5 | 50586.1 | 3444.4 |
| в т.ч. сосна | 7164.1 | 767.3 | 1023.9 | 549.3 | 2057.6 | 170.2 | 920.0 | 11885.1 | 1060.4 |
| ель | 4901.6 | 677.7 | 931.7 | 536.1 | 2530.2 | 254.6 | 310.2 | 9464.4 | 767.6 |
| пихта | 1035.9 | 132.9 | 200.2 | 115.9 | 233.1 | 31.4 | 38.3 | 1654.8 | 144.5 |
| лиственница | 12519.8 | 2245.5 | 1770.7 | 374.5 | 5480.2 | 479.1 | 1101.2 | 21725.6 | 1068.8 |
| кедр | 3622.2 | 456.9 | 615.9 | 266.7 | 1016.6 | 155.0 | 179.8 | 5856.2 | 403.1 |
| ТЛП | 1231.2 | 177.5 | 338.4 | 56.2 | 741.4 | 76.7 | 96.9 | 2540.7 | 127.7 |
| в т.ч. дуб | 469.9 | 75.4 | 125.0 | 27.7 | 333.5 | 20.8 | 33.1 | 1010.0 | 50.5 |
| МЛП | 7753.5 | 1346.0 | 1552.8 | 349.5 | 2723.4 | 255.6 | 476.4 | 13111.2 | 664.4 |
| в т.ч. береза | 5770.2 | 1025.5 | 1145.7 | 268.4 | 1918.6 | 203.9 | 374.4 | 9681.2 | 516.8 |
| осина | 1451.6 | 240.3 | 286.9 | 53.3 | 534.7 | 39.6 | 75.6 | 2441.6 | 103.0 |
| ПП | 26.1 | 4.4 | 6.2 | 1.7 | 15.2 | 1.3 | 3.9 | 54.4 | 4.0 |
| Кустарники | 175.9 | 0.0 | 417.9 | 400.7 | 716.0 | 0.0 | 347.1 | 2057.5 | 574.3 |
| Всего | 38430.3 | 5808.3 | 6857.6 | 2650.6 | 15513.7 | 1423.9 | 3473.8 | 68349.9 | 4814.7 |

Таблица 4

**Распределение фитомассы и углерода лесных экосистем России
 по преобладающим породам и группам возраста (1993 г.)**

| Породы и группы пород | Фитомасса, абсолютно сухой вес, Тг, по группам возраста | | | | | | | Углерод | | |
|-----------------------|---|---------------|----------------|---------------|----------------|----------------|----------------|----------------|------------------------------|------------------------|
| | мол.1 | мол.2 | ср-воз. | присп | спелые | перест | всего | Всего, Тг | плотность, кг/м ² | отн, кг/м ³ |
| Европейская часть | | | | | | | | | | |
| Хвойные | 265.5 | 793.0 | 2303.1 | 1311.9 | 3012.8 | 2749.9 | 10436.1 | 5155.2 | 4.86 | 0.391 |
| в т.ч. сосна | 124.1 | 563.5 | 1594.5 | 649.8 | 869.5 | 592.9 | 4394.3 | 2171.2 | 4.42 | 0.367 |
| ель | 138.2 | 221.5 | 634.2 | 610.1 | 2054.4 | 2102.6 | 5761.0 | 2845.0 | 5.18 | 0.413 |
| пихта | 0.7 | 3.2 | 18.0 | 13.0 | 37.4 | 24.7 | 96.9 | 48.0 | 6.06 | 0.306 |
| лиственница | 1.5 | 3.8 | 5.3 | 3.1 | 8.9 | 24.5 | 47.1 | 23.4 | 5.98 | 0.444 |
| кедр | 1.0 | 1.0 | 51.1 | 35.9 | 42.7 | 5.2 | 136.8 | 67.7 | 7.59 | 0.379 |
| ТЛП | 14.7 | 62.8 | 473.1 | 158.4 | 210.5 | 116.7 | 1036.3 | 514.9 | 7.94 | 0.548 |
| в т.ч. дуб | 10.8 | 47.5 | 302.1 | 109.7 | 118.6 | 42.0 | 630.8 | 313.2 | 6.93 | 0.518 |
| МЛП | 88.9 | 283.3 | 2474.4 | 1078.3 | 1283.2 | 752.5 | 5960.5 | 2959.6 | 5.30 | 0.436 |
| в т.ч. береза | 59.4 | 184.7 | 1949.3 | 821.6 | 839.5 | 382.9 | 4237.4 | 2103.1 | 5.03 | 0.448 |
| осина | 21.8 | 68.4 | 171.4 | 159.5 | 318.9 | 313.5 | 1053.6 | 523.6 | 5.46 | 0.358 |
| ПП | 1.8 | 1.4 | 3.7 | 2.8 | 15.2 | 1.9 | 26.9 | 13.4 | 8.98 | 0.568 |
| Кустарники | 0.1 | 0.4 | 5.2 | 0.4 | 1.4 | 4.3 | 11.9 | 5.7 | 1.25 | 1.130 |
| Всего | 371.0 | 1140.9 | 5259.5 | 2551.8 | 4523.1 | 3625.3 | 17471.7 | 8648.8 | 5.11 | 0.412 |
| Азиатская часть | | | | | | | | | | |
| Хвойные | 437.0 | 1340.4 | 9418.2 | 4961.0 | 13000.7 | 10992.7 | 40150.0 | 19863.7 | 4.51 | 0.405 |
| в т.ч. сосна | 118.0 | 283.0 | 1685.8 | 914.7 | 2287.0 | 2202.2 | 7490.8 | 3689.4 | 4.58 | 0.348 |
| ель | 11.6 | 29.6 | 326.5 | 363.9 | 1540.3 | 1431.5 | 3703.4 | 1832.2 | 5.99 | 0.412 |
| пихта | 10.6 | 37.6 | 266.6 | 246.7 | 701.5 | 294.8 | 1557.9 | 770.2 | 5.19 | 0.307 |
| лиственница | 258.6 | 783.7 | 4367.6 | 2035.7 | 7273.4 | 6959.5 | 21678.5 | 10741.7 | 3.97 | 0.456 |
| кедр | 38.1 | 206.5 | 2771.6 | 1400.0 | 1198.5 | 104.7 | 5719.4 | 2830.3 | 6.65 | 0.349 |
| ТЛП | 10.5 | 55.6 | 227.7 | 146.8 | 681.9 | 381.9 | 1504.4 | 743.9 | 5.92 | 0.641 |
| в т.ч. дуб | 5.5 | 27.8 | 140.2 | 60.6 | 113.6 | 31.5 | 379.2 | 187.8 | 5.80 | 0.613 |
| МЛП | 92.9 | 257.2 | 1670.2 | 827.6 | 1960.4 | 2342.4 | 7150.7 | 3542.0 | 4.45 | 0.454 |
| в т.ч. береза | 70.8 | 197.7 | 1410.2 | 673.9 | 1493.2 | 1598.2 | 5443.8 | 2695.1 | 4.24 | 0.480 |
| осина | 20.1 | 49.9 | 194.7 | 115.8 | 327.1 | 680.4 | 1388.1 | 688.8 | 5.24 | 0.372 |
| ПП | 0.2 | 1.0 | 25.5 | 0.6 | 0.2 | 0.0 | 27.5 | 13.5 | 1.50 | 0.610 |
| Кустарники | 16.7 | 128.3 | 1023.0 | 217.1 | 547.3 | 113.3 | 2045.7 | 985.7 | 1.43 | 0.686 |
| Всего | 557.2 | 1782.5 | 12364.6 | 6153.2 | 16190.5 | 13830.3 | 50878.3 | 25148.7 | 4.17 | 0.423 |
| Россия в целом | | | | | | | | | | |
| Хвойные | 702.5 | 2133.4 | 11721.3 | 6272.9 | 16013.5 | 13742.5 | 50586.1 | 25018.9 | 4.58 | 0.402 |
| в т.ч. сосна | 242.2 | 846.5 | 3280.4 | 1564.6 | 3156.5 | 2795.1 | 11885.1 | 5860.6 | 4.52 | 0.355 |
| ель | 149.8 | 251.1 | 960.7 | 974.0 | 3594.7 | 3534.2 | 9464.4 | 4677.1 | 5.49 | 0.412 |
| пихта | 11.3 | 40.8 | 284.6 | 259.7 | 738.9 | 319.5 | 1654.8 | 818.1 | 5.23 | 0.307 |
| лиственница | 260.1 | 787.5 | 4372.9 | 2038.8 | 7282.2 | 6983.9 | 21725.6 | 10765.1 | 3.97 | 0.456 |
| кедр | 39.1 | 207.5 | 2822.7 | 1435.8 | 1241.2 | 109.9 | 5856.2 | 2898.0 | 6.67 | 0.350 |
| ТЛП | 25.2 | 118.4 | 700.8 | 305.3 | 892.4 | 498.5 | 2540.7 | 1258.9 | 6.53 | 0.603 |
| в т.ч. дуб | 16.3 | 75.3 | 442.3 | 170.3 | 232.3 | 73.5 | 1010.0 | 500.9 | 6.41 | 0.554 |
| МЛП | 181.8 | 540.5 | 4144.6 | 1905.9 | 3243.6 | 3094.9 | 13111.2 | 6501.5 | 4.77 | 0.447 |
| в т.ч. береза | 130.2 | 382.3 | 3359.5 | 1495.5 | 2332.7 | 1981.1 | 9681.2 | 4798.3 | 4.52 | 0.467 |
| осина | 41.9 | 118.4 | 366.2 | 275.3 | 646.0 | 993.9 | 2441.6 | 1212.4 | 5.33 | 0.366 |
| ПП | 2.0 | 2.4 | 29.3 | 3.4 | 15.4 | 2.0 | 54.4 | 26.9 | 2.35 | 0.591 |
| Кустарники | 16.8 | 128.7 | 1028.2 | 217.5 | 548.7 | 117.6 | 2057.5 | 991.4 | 1.43 | 0.688 |
| Всего | 928.3 | 2923.4 | 17624.2 | 8704.9 | 20713.6 | 17455.6 | 68349.9 | 33797.6 | 4.35 | 0.420 |

Примечание. Сокращения в табл. 3 и 4 аналогичные табл. 1 и 2.

Уточненная оценка запасов фитомассы лесов по данным ГУЛФ-1993 (33.80 Пг С, табл. 3 и 4) отличается от прежней (определенной ранее в 32.86 Пг С [24]) на +0.94 Пг С, т.е. разница составляет всего +2.9 %. Однако, она хорошо иллюстрирует значимость последовательного улучшения моделей фитомассы, что в первую очередь зависит от количества, качества и территориального размещения экспериментальных данных.

В течение десятилетия 1993-2003 гг. фитомасса лесов России увеличилась почти на 0.7 миллиарда тонн. Это увеличение в основном объясняется увеличением включенной в расчет площади покрытых лесной растительностью земель (с 763.5 до 776.1 миллионов гектар) и, соответственно, запасов (с 80 676 до 82 130 миллионов м³), хотя также наблюдается небольшая тенденция увеличения плотности фитомассы в среднем по стране (с 4.35 до 4.37 кг С м⁻²). Однако характер этого изменения существенно различается между лесами Европейской части, где увеличение составляет 4.5 % (с 5.11 до 5.34 кг С м⁻²), и Азиатской, где плотность фитомассы несколько уменьшилась (с 4.17 до 4.13 кг С м⁻²). Вероятные причины этому – уменьшение объема рубок в Европейской и увеличение природных нарушений, особенно пожаров и вспышек размножения насекомых, в Азиатской части России.

3. Чистая первичная продукция

3.1. Метод расчета

Суть использованного метода оценки ЧПП заключается в следующем. Гигантский объем информации о росте древостоев накоплен лесной наукой в виде таблиц хода роста (ТХР) – численных моделей, разработанных на протяжении длительного периода времени. В настоящее время для территории Северной Евразии известно около 500 ТХР, из которых практически применяется примерно четвертая часть. Как правило, модельная основа этих таблиц очень слаба, часто они представлены в виде рядов механически выравненных данных измерений. Материал, положенный в основу при их составлении, ретроспективно отражает рост древостоев за последние 100-300 лет. Очевидно, что такие ТХР не могут отражать рост древостоев в условиях глобальных изменений, а целесообразное усовершенствование этих таблиц возможно лишь в случае, если они будут представлены в виде моделей, параметры которых допускают содержательную трактовку. С этой целью были отобраны и подвергнуты параметрическому, временному и пространственному анализу практически все ТХР, известные для лесов Северной Евразии. Отобранные ТХР были представлены в виде унифицированных моделей, используя ростовую функцию Ричардса-Чепмэна. Таким образом, была получена пространственно распределенная система моделей роста для древостоев основных лесообразующих пород России [27, 76], включающая возрастную динамику основных биометрических признаков древостоев.

Полученные модели роста были преобразованы в модели биологической продуктивности лесных экосистем Северной Евразии. С этой целью, к моделям роста, которые содержат динамику основных таксационных показателей древостоев были применены названные выше многомерные динамические модели фитомассы (живой биомассы) лесных экосистем (уравнения (1) и (2)). Такие модели позволили, во-первых, описать возрастную динамику фитомассы лесных экосистем по основным фракциям. Во-вторых, поскольку разница между двумя последовательными значениями полной продуктивности экосистемы по фитомассе представляет собой ЧПП, динамика последней была получена на основе специального алгоритма, моделирующего процесс изменения полной продуктивности по фракциям фитомассы с возрастом. Базируясь на названных выше моделях роста и фитомассы, алгоритм также использует ряд экологических параметров, определяемых относительно надежно (в частности, резидентное время углерода в тонких корнях и зеленых частях лесных экосистем). Детали подхода и формальное описание алгоритма обсуждаются в [76], а разработанные модели в аналитическом и табулированном виде приведены в [28]. Полученная таким образом система моделей была использована для оценки ЧПП лесов России на основе данных учета Государственного лесного фонда (ГУЛФ) 2003 года. Исходные данные были организованы аналогичным образом, как и при оценке фитомассы – расчеты производились по каждому лесному предприятию МПР России, а также по лесам других фондодержателей.

3.2. Результаты оценки

Агрегированные итоги оценки ЧПП лесов России приведены в табл. 5 и 6.

Как следует из приведенных данных, общая ЧПП всех российских лесов оценивается в 2308 Тг С год⁻¹, или 297 г С м⁻²·год⁻¹. Из этого общего количества, 20.4 % приходится на надземную древесину (из них 14.9 % - на древесину стволов). Больше половины ЧПП размещается в листьях/

Таблица 5

**Чистая первичная продукция лесов России
 по преобладающим породам и группам возраста (2003)**

| Породы и группы пород | ЧПП, Тг С по группам возраста | | | | | | ЧПП плотность, г С м ⁻² ·год ⁻¹ | |
|-----------------------|-------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---|------------|
| | мол1 | мол2 | ср-воз | присп | спелые | перест | | всего |
| Европейская часть | | | | | | | | |
| Хвойные | 10.8 | 44.5 | 75.7 | 32.9 | 74.7 | 76.3 | 314.9 | 303 |
| в т.ч. сосна | 6.1 | 25.4 | 49.1 | 15.2 | 20.8 | 19.4 | 136.1 | 288 |
| ель | 4.6 | 18.8 | 25.0 | 16.6 | 51.8 | 55.7 | 172.5 | 315 |
| пихта | 0.0 | 0.1 | 0.6 | 0.4 | 1.0 | 0.8 | 2.9 | 366 |
| лиственница | 0.1 | 0.2 | 0.2 | 0.1 | 0.3 | 0.3 | 1.1 | 279 |
| кедр | 0.0 | 0.0 | 0.7 | 0.6 | 0.8 | 0.1 | 2.3 | 255 |
| ТЛП | 0.7 | 2.9 | 23.8 | 7.0 | 8.7 | 4.6 | 47.6 | 751 |
| в т.ч. дуб | 0.5 | 2.0 | 17.5 | 5.4 | 6.1 | 1.7 | 33.2 | 786 |
| МЛП | 7.5 | 21.2 | 113.5 | 43.3 | 54.1 | 27.8 | 267.4 | 451 |
| в т.ч. береза | 5.1 | 14.3 | 90.8 | 31.1 | 36.5 | 15.0 | 192.9 | 435 |
| осина | 1.8 | 5.0 | 8.4 | 7.2 | 9.8 | 8.6 | 40.8 | 417 |
| ПП | 0.0 | 0.0 | 0.1 | 0.0 | 0.1 | 0.1 | 0.4 | 321 |
| Кустарники | 0.0 | 0.1 | 0.5 | 0.0 | 0.1 | 0.1 | 0.8 | 166 |
| Итого | 19.1 | 68.7 | 213.5 | 83.3 | 137.7 | 108.9 | 631.2 | 371 |
| Азиатская часть | | | | | | | | |
| Хвойные | 37.7 | 80.6 | 319.8 | 154.4 | 362.8 | 264.4 | 1219.8 | 281 |
| в т.ч. сосна | 7.8 | 14.1 | 52.5 | 23.7 | 63.1 | 41.8 | 203.0 | 252 |
| ель | 0.2 | 1.5 | 11.4 | 10.2 | 37.5 | 35.1 | 96.0 | 323 |
| пихта | 1.0 | 2.4 | 9.3 | 7.4 | 15.8 | 6.3 | 42.2 | 274 |
| лиственница | 26.5 | 55.6 | 171.9 | 64.9 | 220.4 | 179.5 | 718.9 | 269 |
| кедр | 2.2 | 6.9 | 74.8 | 48.2 | 26.0 | 1.7 | 159.8 | 383 |
| ТЛП | 0.4 | 2.3 | 9.8 | 4.9 | 15.4 | 6.8 | 39.6 | 303 |
| в т.ч. дуб | 0.3 | 1.9 | 7.4 | 3.0 | 4.8 | 1.2 | 18.6 | 549 |
| МЛП | 4.4 | 16.1 | 106.5 | 33.8 | 71.0 | 60.2 | 292.0 | 349 |
| в т.ч. береза | 2.2 | 10.3 | 92.3 | 27.3 | 54.1 | 43.4 | 229.5 | 345 |
| осина | 2.1 | 5.4 | 10.9 | 4.5 | 9.1 | 14.0 | 45.9 | 324 |
| ПП | 0.0 | 0.1 | 2.2 | 0.1 | 0.0 | 0.0 | 2.4 | 231 |
| Кустарники | 1.8 | 21.2 | 63.2 | 12.2 | 19.5 | 4.7 | 122.6 | 167 |
| Итого | 44.3 | 120.3 | 501.4 | 205.4 | 468.7 | 336.1 | 1676.4 | 277 |
| Россия в целом | | | | | | | | |
| Хвойные | 48.5 | 125.1 | 395.5 | 187.3 | 437.5 | 340.7 | 1534.6 | 285 |
| в т.ч. сосна | 13.8 | 39.6 | 101.6 | 38.9 | 83.9 | 61.2 | 339.0 | 266 |
| ель | 4.9 | 20.3 | 36.3 | 26.9 | 89.3 | 90.8 | 268.5 | 318 |
| пихта | 1.1 | 2.5 | 9.9 | 7.8 | 16.8 | 7.1 | 45.1 | 279 |
| лиственница | 26.6 | 55.8 | 172.1 | 65.0 | 220.7 | 179.8 | 720.0 | 269 |
| кедр | 2.2 | 6.9 | 75.5 | 48.7 | 26.8 | 1.9 | 162.1 | 380 |
| ТЛП | 1.1 | 5.2 | 33.6 | 11.9 | 24.1 | 11.4 | 87.3 | 450 |
| в т.ч. дуб | 0.8 | 3.9 | 24.9 | 8.3 | 10.9 | 2.9 | 51.8 | 680 |
| МЛП | 11.9 | 37.4 | 219.9 | 77.1 | 125.1 | 88.0 | 559.4 | 391 |
| в т.ч. береза | 7.3 | 24.6 | 183.2 | 58.4 | 90.6 | 58.4 | 422.4 | 381 |
| осина | 3.8 | 10.4 | 19.3 | 11.8 | 18.8 | 22.6 | 86.8 | 362 |
| ПП | 0.0 | 0.1 | 2.3 | 0.1 | 0.2 | 0.1 | 2.8 | 241 |
| Кустарники | 1.9 | 21.3 | 63.7 | 12.2 | 19.6 | 4.8 | 123.5 | 167 |
| Всего | 63.4 | 189.1 | 715.0 | 288.7 | 606.4 | 445.0 | 2307.6 | 297 |

Таблица 6

Чистая первичная продукция лесов России по фракциям фитомассы

| Древесные породы и группы пород | ЧПП по фракциям фитомассы, Тг С год ⁻¹ | | | | | | | в т.ч. зеленые части |
|---------------------------------|---|--------------|--------------|--------------|--------------------|--------------|---------------|----------------------|
| | Ствол | Ветви | Хвоя/листья | Корни | Подрост и подлесок | ЖНП | Итого | |
| Европейская часть | | | | | | | | |
| Хвойные | 54.3 | 16.4 | 70.5 | 98.2 | 20.3 | 55.2 | 314.9 | 104.2 |
| в т.ч. сосна | 30.2 | 6.7 | 22.3 | 33.6 | 5.2 | 38.0 | 136.1 | 42.9 |
| ель | 22.7 | 9.3 | 46.4 | 62.8 | 14.6 | 16.7 | 172.5 | 59.1 |
| пихта | 0.6 | 0.2 | 0.9 | 0.8 | 0.2 | 0.3 | 2.9 | 1.1 |
| лиственница | 0.2 | 0.0 | 0.4 | 0.3 | 0.0 | 0.1 | 1.1 | 0.5 |
| кедр | 0.7 | 0.1 | 0.5 | 0.6 | 0.2 | 0.1 | 2.3 | 0.6 |
| ТЛП | 8.3 | 2.9 | 12.4 | 17.6 | 2.1 | 4.3 | 47.6 | 15.2 |
| в т.ч. дуб | 5.8 | 2.0 | 8.9 | 12.4 | 1.3 | 2.9 | 33.2 | 10.7 |
| МЛП | 67.4 | 15.5 | 77.0 | 65.2 | 13.6 | 28.6 | 267.4 | 95.4 |
| в т.ч. береза | 50.2 | 11.3 | 58.9 | 41.6 | 10.4 | 20.5 | 192.9 | 72.3 |
| осина | 10.5 | 2.3 | 8.7 | 12.3 | 2.0 | 5.1 | 40.8 | 11.9 |
| ПП | 0.1 | 0.0 | 0.1 | 0.1 | 0.0 | 0.0 | 0.4 | 0.1 |
| Кустарники | 0.0 | 0.3 | 0.3 | 0.1 | 0.0 | 0.1 | 0.8 | 0.4 |
| Итого | 130.2 | 35.1 | 160.3 | 181.3 | 36.0 | 88.2 | 631.2 | 215.2 |
| Азиатская часть | | | | | | | | |
| Хвойные | 150.1 | 47.3 | 342.3 | 375.6 | 83.2 | 221.4 | 1219.8 | 478.0 |
| в т.ч. сосна | 35.2 | 6.9 | 43.7 | 40.7 | 9.4 | 67.0 | 203.0 | 80.0 |
| ель | 6.6 | 3.1 | 23.1 | 35.7 | 12.6 | 14.9 | 96.0 | 34.3 |
| пихта | 6.2 | 2.5 | 12.5 | 11.6 | 4.0 | 5.4 | 42.2 | 16.4 |
| лиственница | 89.0 | 28.4 | 221.0 | 234.2 | 36.9 | 109.5 | 718.9 | 286.8 |
| кедр | 13.0 | 6.4 | 42.0 | 53.5 | 20.4 | 24.5 | 159.8 | 60.4 |
| ТЛП | 3.2 | 1.6 | 9.3 | 13.4 | 4.8 | 7.4 | 39.6 | 14.4 |
| в т.ч. дуб | 2.0 | 0.9 | 4.3 | 6.3 | 1.9 | 3.3 | 18.6 | 6.5 |
| МЛП | 51.8 | 13.8 | 75.8 | 73.3 | 25.4 | 51.9 | 292.0 | 109.4 |
| в т.ч. береза | 40.2 | 10.6 | 61.4 | 54.4 | 20.7 | 42.2 | 229.5 | 88.7 |
| осина | 8.7 | 2.3 | 10.1 | 13.2 | 3.9 | 7.7 | 45.9 | 15.1 |
| ПП | 0.6 | 0.1 | 0.4 | 0.5 | 0.2 | 0.6 | 2.4 | 0.8 |
| Кустарники | 9.0 | 29.1 | 50.1 | 17.3 | 0.0 | 17.2 | 122.6 | 58.7 |
| Итого | 214.7 | 92.0 | 477.8 | 480.0 | 113.5 | 298.4 | 1676.4 | 661.1 |
| Россия в целом | | | | | | | | |
| Хвойные | 204.4 | 63.7 | 412.8 | 473.8 | 103.5 | 276.5 | 1534.6 | 582.1 |
| в т.ч. сосна | 65.5 | 13.6 | 66.1 | 74.2 | 14.6 | 105.0 | 339.0 | 123.0 |
| ель | 29.2 | 12.4 | 69.6 | 98.5 | 27.2 | 31.6 | 268.5 | 93.6 |
| пихта | 6.8 | 2.7 | 13.3 | 12.4 | 4.2 | 5.7 | 45.1 | 17.4 |
| лиственница | 89.2 | 28.4 | 221.3 | 234.5 | 36.9 | 109.6 | 720.0 | 287.2 |
| кедр | 13.7 | 6.5 | 42.5 | 54.1 | 20.6 | 24.7 | 162.1 | 61.0 |
| ТЛП | 11.5 | 4.6 | 21.7 | 31.0 | 6.8 | 11.6 | 87.3 | 29.5 |
| в т.ч. дуб | 7.8 | 3.0 | 13.2 | 18.6 | 3.2 | 6.1 | 51.8 | 17.2 |
| МЛП | 119.3 | 29.3 | 152.8 | 138.5 | 39.0 | 80.5 | 559.4 | 204.8 |
| в т.ч. береза | 90.5 | 21.9 | 120.3 | 95.9 | 31.1 | 62.6 | 422.4 | 160.9 |
| осина | 19.1 | 4.6 | 18.8 | 25.5 | 5.8 | 12.8 | 86.8 | 26.9 |
| ПП | 0.7 | 0.2 | 0.5 | 0.6 | 0.2 | 0.6 | 2.8 | 0.9 |
| Кустарники | 9.0 | 29.4 | 50.4 | 17.4 | 0.0 | 17.3 | 123.5 | 59.1 |
| Итого | 344.9 | 127.1 | 638.2 | 661.3 | 149.5 | 386.6 | 2307.6 | 876.4 |

Примечание. Сокращения в таблицах: МЛП – мягколиственные породы (береза, осина, тополя и т.д.); ТЛП – твердолиственные породы (дуб, бук, ясень и т.д.); ЖНП – напочвенный живой покров.

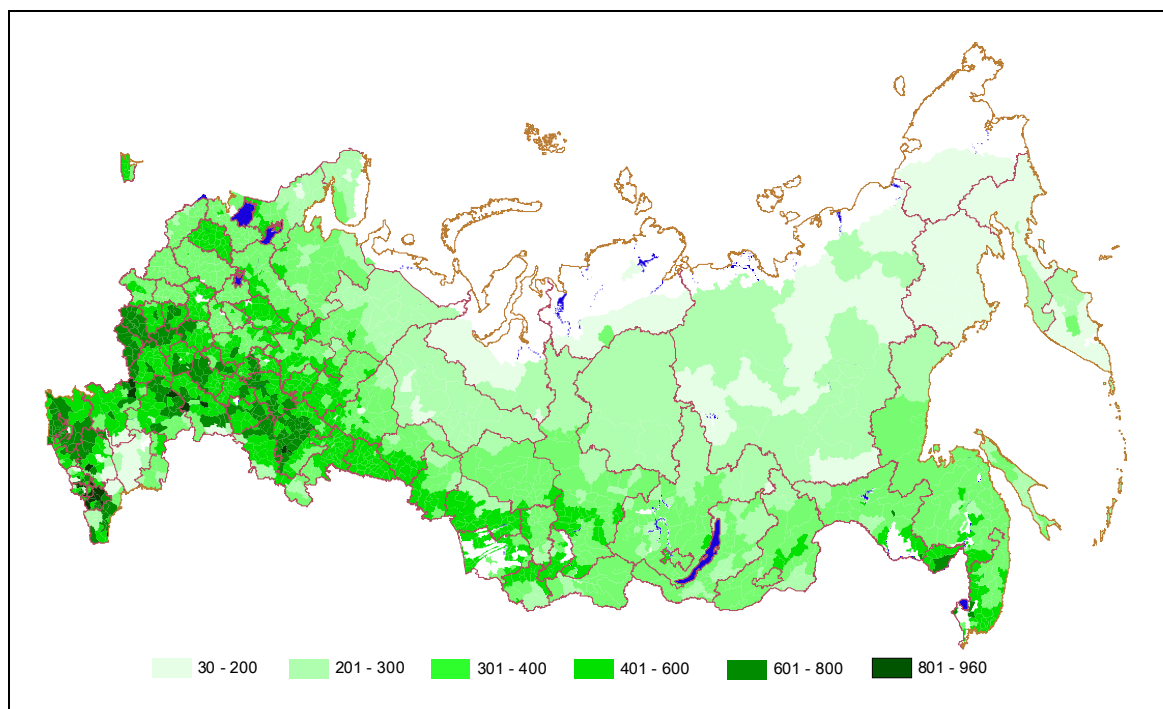


Рис. 3. Плотность чистой первичной продукции лесов России (г С м⁻² год⁻¹).

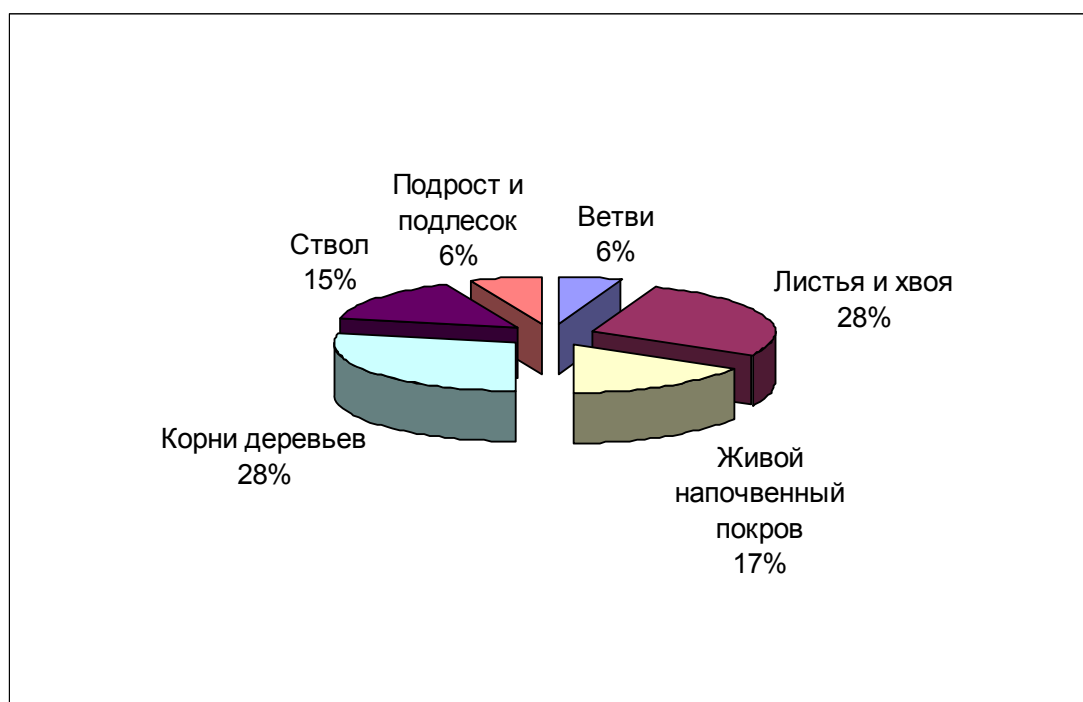


Рис. 4. Фракционная структура чистой первичной продукции лесов России.

хвое деревьев (27.7 %) и корнях (28.7 %), главным образом, тонких, диаметром до 2 мм. Существенная часть ЧПП приходится на нижние яруса – подрост и подлесок (6.5 %) и напочвенный живой покров (16.7 %) (рис. 3).

ЧПП лиственных пород заметно выше, чем хвойных (285 г С м⁻²·год⁻¹ в хвойных лесах, 391 г С м⁻²·год⁻¹ в мягколиственных и 450 г С м⁻²·год⁻¹ – в твердолиственных), что объясняется как географическим положением ареалов пород и следующим из этого различием в продуктивности, так и различиями в величине ЧПП листьев и хвои. ЧПП основных лесообразующих хвойных пород существенно

не различается, кроме кедра, отличающегося повышенными значениями ЧПП ($380 \text{ г С м}^{-2}\cdot\text{год}^{-1}$). Обращает внимание специфическое распределение ЧПП по возрасту: если в среднем по стране на молодняки приходится 10.9 % общей ЧПП, на средневозрастные 31.0 % и приспевающие 12.5 %, то на спелые 26.3 % и перестойные 19.3 %. Можно назвать три основные причины столь высоких значений ЧПП в спелых и перестойных лесах (площадь которых составляла по учету 2003 года 42.7 % от покрытых лесной растительностью земель): 1) установленные для основной массы лесов страны возрасты спелости далеки от возраста естественной спелости; 2) в стране существенна доля разновозрастных лесов, для которых определение среднего возраста является весьма условным и 3) доля ЧПП, обусловленная нижними ярусами экосистем, в среднем возрастает с увеличением возраста лесов.

Существуют очевидные закономерности географического и высотного распределения ЧПП. В среднем, леса Европейской части по этому показателю примерно на четверть более продуктивны, чем Азиатской (средняя ЧПП составляет, соответственно, 371 и 277 $\text{г С м}^{-2}\cdot\text{год}^{-1}$). Вместе с тем, помимо климатических, на пространственное распределение ЧПП влияют также и антропогенные факторы (рис. 4).

4. Обсуждение

Первостепенной важности – и далеко не тривиальный – вопрос заключается в оценке точности, или, что более отвечает сути вопроса, – неопределенности полученных результатов. Неопределенность понимается как некоторое обобщение недостаточности выхода (результата) системы оценивания, независимо от того, следует ли эта недостаточность из неполноты знаний, сложности и особенностей системы или иных причин [64]. По своей сути, неопределенность есть величина отклонения полученной оценки от истинного, существующего в природе, но неизвестного значения, и указание на это отклонение должно характеризоваться как его величиной, так и выбранной доверительной вероятностью.

Сложность проблемы заключается в том, что оценка обоих показателей, рассматриваемых в настоящей работе – запасы фитомассы и ЧПП лесов для больших территорий – относятся к типичным недостаточно организованным (нечетким, fuzzy) задачам. Последний термин понимается в том смысле, что функция принадлежности отдельных подсистем или элементов к системе является стохастической. Отсюда – в условиях недостаточности знания, территориальной и временной неполноты исходных данных – следует 1) принципиальное отсутствие возможности строгой (формальной) оценки структурных неопределенностей системно сложных задач, для которых прямая верификация невозможна; иными словами, средствами внутри системы оценивания нельзя установить, насколько структура расчетных схем и используемые модели отвечают структуре изучаемого явления; 2) неизбежное использование гипотез, допущений и показателей, неопределенности которых могут быть оценены только на экспертном уровне; 3) необходимость учета динамического характера оцениваемых показателей, многочисленности влияний и специфику реакций и обратных связей системы на эти влияния.

Лесная программа Международного института прикладного системного анализа (IIASA) предложил специальную методику оценки неопределенности подобных экологических задач [64, 75], которая включает 1) возможно полное следование принципам системного анализа в структуризации задачи, обязательность унифицированных определений и наличия однозначных формальных алгоритмов; 2) использование эвристических элементов расчета в строго формальном виде (например, представление экспертных оценок в численном виде с соответствующими (персональными) вероятностями); 3) оценку точности (погрешностей) расчетных схем методами статистического анализа (метод последовательного оценивания погрешностей, *error propagation theory*); 4) анализ чувствительности промежуточных и конечных результатов к варьированию параметров моделей и неопределенности исходных данных (методами Монте-Карло или последовательного дифференцирования); 5) экспертную оценку полноты учета и модификацию погрешностей, полученных формальными методами; и 6) системную увязку («гармонизацию») промежуточных и окончательных результатов с независимо полученными оценками, если таковые имеются. Полученные таким образом оценки неопределенности также содержат элементы неопределенности (здесь речь уже идет о «неопределенности неопределенностей»), но в экологических задачах они служат достаточным мерилем надежности заключений и с высокой вероятностью позволяют избегать значительных систематических ошибок, природа которых была бы известна.

4.1. Оценка фитомассы и ее неопределенности

Используя метод Монте-Карло, мы определили расчетную погрешность оценивания фитомассы лесов по фракциям на различных пространственных уровнях – для обобщенных полигонов, экорегионов (общим числом 143 для страны) и России в целом. Однородность полигонов по основным таксационным показателям соответствовала картам лесов на уровне таежных лесных предприятий (т.е. лесным картам масштаба порядка 1 : 200 000). Поэтому были использованы следующие предположения о точности входов в модели: оценки запаса $\pm 15\text{--}20\%$, класса бонитета ± 0.5 , возраста $\pm 10\text{--}40$ лет, в зависимости от среднего возраста древостоя и преобладающей породы, и относительной полноты $\pm 15\text{--}20\%$. Статистические показатели регрессионных уравнений были взяты из [76]. Полученные погрешности для типичных таежных регионов Средней Сибири варьировали: для оценки общей фитомассы полигонов между ± 6 и $\pm 14\%$ (среднее 12 %) и для древесных фракций фитомассы деревьев $\pm 13\text{--}20\%$. Погрешность определения фитомассы листьев (хвои) оказалась выше ($\pm 20\text{--}25\%$). Несколько неожиданно расчетные погрешности оценки запасов фитомассы нижних ярусов (подрост, подлесок и живой напочвенный покров) оказались невысокими. Погрешности на уровне экорегиона зависели от числа полигонов в пределах преобладающих пород и наличия региональных моделей фитомассы (некоторые детали приведены в [64]). Применение метода последовательного дифференцирования дало результаты близкие к таковым, полученным по методу Монте-Карло.

В целом, расчетная погрешность оценки фитомассы земель, покрытых лесной растительностью, в целом для страны составила около $\pm 4.0\%$, доверительная вероятность (здесь и ниже) 0.9. Очевидно, что это существенная часть неопределенностей, однако она не исчерпывает их полностью, поскольку формальный расчет дает погрешности только «внутри» системы оценивания и не учитывает ряд «внесистемных», факторов, т.е. тех, которые не были включены в алгоритм расчета, хотя они могут существенно влиять на неопределенность результата. Не останавливаясь на деталях, охарактеризуем основные источники неопределенностей такого рода и особенности перехода от «погрешностей» к «неопределенностям».

Первая группа «слабо формализуемых погрешностей» связана с данными учета лесов, используемых в моделях. В первую очередь это относится к запасу, погрешности которого пропорционально переходят на фитомассу (поскольку R_F из уравнений (1) и (2) умножается на запас). Неопределенности данных ГУЛФ следуют из 1) погрешностей методов таксации и лесотаксационной нормативно-справочной информации, используемых при лесоинвентаризационных работах; 2) наличия устаревших материалов учета для значительных районов страны; 3) иными погрешностями различной природы в сводных данных материалов ГУЛФ.

Наиболее существенными в этом перечне являются неопределенности, связанные со спецификой и погрешностями применяемых методов таксации лесов и их технико-технологического сопровождения. Начиная с первого учета, включившего данные для всех лесов России (1961 год), и до настоящего времени сводные данные по учету лесов в стране представляют комбинацию трех основных методов лесоинвентаризации: 1) наземной таксации лесов при лесоустройстве; 2) данных различных дистанционных технологий; и 3) данных аэротаксационных обследований середины прошлого столетия. Детальное рассмотрение вопроса содержится в [74]. Здесь мы перечислим только основные (несколько уточненные) выводы, которые сводятся к следующему. 1. Очевидно, что при примерно 50 миллионах таксационных выделов в лесах России среднеквадратические ошибки оценки запаса в каждом таксационном выделе не влияют на погрешности сводных данных и средних величин для больших районов. Определяющее значение имеют систематические ошибки. 2. Наземное лесоустройство занижало и занижает запас средневозрастных, приспевающих и спелых древостоев на величину 10-15 %, иногда больше, причем в среднем более значительные систематические ошибки наблюдаются в густонаселенных районах Европейской части страны. Причина этому заключается в глазном методе таксации, социально-административных проблемах прошлого (и настоящего), заинтересованности органов лесного хозяйства и арендаторов в заниженных показателях древесного запаса. Существенную роль в этом сыграла также применяемая ранее (особенно в 1950-70х гг.) нормативно-справочная информация, особенно стандартные таблицы сумм площадей сечений и запасов, а после перехода к электронной обработке данных – «корректирующие» процедуры СОЛИ – систем обработки лесоустроительных данных. Остальные таксационные показатели, приводимые в материалах ГУЛФ, однозначных систематических погрешностей не имеют. 3. Методы таксации, базирующиеся на применении дистанционных методов, начиная со середины 1970х гг., в применении их к обширным северным территориям, не обнаружили значимых систематических ошибок [9], хотя некоторого занижения запаса (последовательно уменьшающегося во времени) следует ожидать, учитывая, что здесь также применялась нормативно-справочная база, способствующая занижению запаса древостоев. 4. Аэротаксация, в ее различных модификациях, охватила около 900 миллионов га в

1948-1956 гг. Независимые данные проверки точности аэротаксации не публиковались. Сравнение площадей и средних показателей запаса с последующими учетами, позволило прийти к выводу, что аэротаксация существенно завысила запасы древостоев, и это завышение (до 20-25 %, по некоторым лесхозам больше) увеличивалось с уменьшением продуктивности лесов обширных северных территорий. Разумеется, надежность численных заключений о точности аэротаксации, основанных на повторных инвентаризациях более состоятельными методами через 15-30 лет, весьма невелика, хотя – при существенной разности в оценках запасов при повторных инвентаризациях – значительных систематических ошибок в оценке площадей обнаружено не было.

Мы не разделяем ряд базовых выводов интересного, но не бесспорного анализа динамики лесов России и их продуктивности в 1961-1998 гг., приведенного в [3] (анализу подвергались только данные по лесам, управляемым государственными органами лесного хозяйства). По нашему мнению, вне рассмотрения осталась оценка влияния определяющих технических факторов, в частности изменение методов учета лесов и их нормативной базы. В части влияния на данные по отдельным регионам, эти изменения проявлялись при очередных ревизиях лесоустройства. Именно этим можно объяснить «нерегулярность» динамики средних запасов древостоев и иные (иногда действительные, нередко кажущиеся) несуразности, чему в обсуждаемом анализе уделено значительное место. Например, для Челябинской области [3, стр. 86] отмечены большие и различные изменения процента площадей и запасов в периодах 1973-1978 и 1988-1993 гг., которые трактуются как прямые (и преднамеренные) ошибки данных учета. Однако, простое объяснение этому может заключаться в том, что на эти два периода пришлось два очередных лесоустройства, которые установили более-менее реальную картину состояния лесного фонда. Подтверждением этому служит и то, что в периоды, следующими за рассматриваемыми, никаких существенных изменений в площадях и запасах в лесах области – которые должны бы проявиться, если бы предыдущие данные были существенно неверны – не наблюдается (помимо спелых насаждений, что связано с интенсивными рубками главного пользования).

Принципиально неприемлемым в рассматриваемом анализе представляется утверждение о наличии значительных положительных систематических ошибок в сводных данных ГУЛФ, особенно в Европейской части. Так, утверждается, что «...статистические справочники содержат систематические ошибки (приписки), завышающие сведения о запасах древесины», причем «размер завышения за 37 лет (анализировалась динамика лесного фонда за 1961-1998 гг. – А.Ш.) составляет в лесах Европейско-Уральской территории России 20-40 %» [2, стр. 248; 3]. Причину «завышения» авторы цитируемых работ видят в процессе актуализации данных при проведении ГУЛФ. Думается, что это связано с очевидным недоразумением, поскольку между повторными лесоустройствами никакой актуализации данных на естественный рост насаждений органы лесного хозяйства практически не проводили. «Актуализация» ограничивалась внесением механических поправок на изменение площадей и запасов в связи с вырубками, пожарами и созданием лесных культур. В густо населенных районах центра и юга Европейской части площади изменений учитывались достаточно надежно, так что основы для существенного завышения запаса не просматриваются. Что же касается таежных районов, то более существенным явилось влияние процедуры внесения изменений в связи с динамикой категорий лесных земель. И если влияние рубок и пожаров работниками лесхозов в какой-то мере при подготовке данных ГУЛФ учитывалось, то естественные возобновительные процессы на непокрытых лесом землях в таежной зоне могли быть учтены только при следующем лесоустройстве. Это приводило к значительной недооценке площадей покрытых лесом земель и запасов в межревизионный период, что показано, например, в детальном анализе динамики лесных пространств по лесхозам Иркутской области [5]. Не вызывает также сомнения, что здесь не было никаких возможностей для приписок, даже если на это нацеливали «лозунги ЦК КПСС» [3, стр. 86]: уж очень сложно представить, какие именно данные могли быть фальсифицированы на уровне лесхоза при подготовке материалов ГУЛФ в Европейской части – разве приписаны площади лесных культур в «удовлетворительном состоянии», которых не существовало в действительности. Понятно, это не могло существенно исказить средние результаты для больших территорий. Вторая возможность значительной фальсификации данных – недоучет площадей, погибших от пожаров и других неблагоприятных воздействий – существовала и широко практиковалась, но не в данных ГУЛФ, а в данных статистической отчетности по охране и защите лесов. Тем более, что в анализируемый период пожары в Европейской части не являлись существенным фактором динамики лесного фонда.

«Полная» актуализация данных ГУЛФ, т.е. внесение изменений в таксационные показатели с учетом естественного роста древостоев, проводилась только в материалах ГУЛФ 1966 года на небольшую часть лесов II группы и в материалах учета 1972 года – только для Европейской части России с добавлением 3 областей Западной Сибири. Использование такой процедуры увеличило общий

запас лесов страны на 0.9 млрд. м³ (или на 1.2 %) [8]. Последующие учеты нивелировали это изменение.

Впрочем, и простые логические рассуждения не позволяют принять предположение авторов анализа о значительном завышении запасов лесов Европейской части России, поскольку из него следует, что средний запас лесов Европейской части (2003 года) в 135 м³ га⁻¹ должен быть уменьшен примерно до 95 м³ га⁻¹ – это на треть меньше, чем в Тюменской области и не намного больше, чем на Камчатке. Добавим, что такая предпосылка не позволяет построить более-менее логичный баланс производства и потребления древесины в Европейской части страны за последние 40 лет, базируясь на оценках текущего прироста с одной стороны и рубок и иных потерь древесины – с другой.

Базируясь на данных рассматриваемого анализа, можно привести ряд других примеров, когда существуют иные, чем приведенные авторами, объяснения, и не всегда они вызваны пороками учетных данных. Одна из причин – незначительные площади и запасы насаждений определенных возрастных категорий в ряде центральных областей России. Так, отчетливо «выпадающее» изменение запаса спелых хвойных древостоев в 1983 г. в Саратовской области вычислено для площади 0.5 тыс. га. «Перепады» со средними запасами предшествующего и последующего учетов достаточно очевидно объясняются высокой динамикой площадей спелых лесов в малолесной области в условиях жесткого дефицита спелых древостоев и переходом в эту категорию приспевающих насаждений. Заметим, что даже в подобных условиях динамика иных возрастных категорий намного более «закономерна». Изменение данных для Красноярского края в 1970-1990 гг. объясняется большими площадями, пройденными дистанционными методами в эти годы. (Заметим в скобках, что инвентаризация лесов Туруханского лесхоза с использованием дистанционных методов в 1980е годы на площади порядка 40 млн га дала запасы, более, чем на треть ниже запасов аэротаксации). Перечень подобных примеров может быть продолжен.

Заканчивая этот комментарий, заметим, что рассматриваемая работа содержит много полезно и профессионально ценного материала. Вместе с тем, представляется, что общее заключение, по сути сводящееся к тому, что данные ГУЛФ настолько неопределенны, что ставят под сомнение возможность их использования в крупномасштабных экологических оценках, явно чрезмерно. Заметим также, что статистический анализ и отбраковка «выпадающих» значений и «устранение» таким путем предполагаемых ошибок различного рода, как это сделано в рассматриваемом анализе, в условиях недостаточно организованных информационных систем часто вызывает опасность не улучшения, а дополнительного искажения данных. Проиллюстрируем это следующим, несколько отвлеченным примером. Два последовательных учета лесов на Украине (1988 и 2002 гг.), где преимущества и недостатки существовавшей в СССР системы учета лесов выражены в концентрированном виде более отчетливо, чем в Европейской части России, дали следующие итоги: покрытая лесом площадь увеличилась на 9.7 % (с 8630.9 тыс. га до 9490.9 тыс. га), а запас – на 33.7 % (с 1319.9 млн м³ до 1765.3 млн м³). При этом надо учесть, что увеличение площадей произошло в основном за счет включения полезащитных лесных насаждений с пониженными запасами. Следуя подходу, реализованному в [3], результаты этих двух инвентаризаций должны быть отброшены как ошибочные.

В принципе, в условиях неполного знания всех основных факторов, которые влияли на качество учета лесов в каждом регионе - сложно сказать, какие данные лучше для анализа – «загрязненные» или «очищенные». Впрочем, этот вопрос остается пока без ответа и во всех других анализах динамики лесов России за длительные периоды времени, включая и настоящие рассуждения.

Временные тренды в изменении структуры фитомассы лесных экосистем также могут служить дополнительными источниками погрешностей. Измерения, использование при разработке моделей фитомассы, проводились в течение порядка 50 лет. Разнонаправленные тренды в изменении доли отдельных фракций фитомассы в 1960-2000х гг. были отмечены для надземной древесины и корней с одной стороны и зеленых частей экосистем – с другой [52]. Тренды эти статистически значимы, и включение их в процедуру расчета приводит к ощутимому снижению запасов фитомассы лесов, например к концу периода 1961-2003 гг. – около 7-10 % по сравнению с оценкой, полученной без учета трендов. Однако для различных районов страны тренды имеют различный характер, и их статистическая значимость невысока. Поэтому правомерность численных поправок на наличие трендов требует дальнейшего накопления экспериментальных данных и детального оценивания с учетом региональных изменений внешней среды.

Существуют и другие источники «не учитываемых» погрешностей. Так, все данные ГУЛФ приведены по преобладающим породам. Сводных данных по составляющим породам не существует. Если в одних случаях (например, для лиственничников высоких широт) это не имеет практического значения, то для обширных территорий к югу от зоны средней тайги, это может порождать заметные ошибки. Здесь приходится лишь предполагать, что участие тех или иных сопутствующих пород в определенном смысле «симметрично» (например, в сосново-березовых и березово-сосновых лесах).

Отметим также влияние стволовых гнилей на количество фитомассы, главным образом, в спелых и перестойных насаждениях. Объем гнилей в старовозрастных естественных лесах таежной зоны значителен, часто достигает 10-15 % от общего запаса древостоев, а в поврежденных древостоях значительно больше.

Базируясь на регионально распределенной экспертной системы, в которой сделана попытка учесть совместное воздействие перечисленных факторов, мы пришли к заключению, что *в среднем для страны* данные ГУЛФ в период 1960х -1980х гг. систематически завышали общий запас лесов страны; величина этого завышения последовательно уменьшалась примерно от +7 % до 0 %, в основном за счет уменьшения площадей, протаксированных аэротаксацией, и упорядочения нормативно-справочной базы лесоинвентаризации [74]. Общему запасу по учетам 1983-2003 гг. свойственна относительно небольшая отрицательная систематическая ошибка порядка 2-3 %, причем в Азиатской части страны она несколько меньше (1-3 %) и достигает 3-5 % в Европейской России. Неопределенности региональных данных выше и плохо поддаются надежной количественной оценке без тщательного анализа истории лесоучетных работ в данном конкретном районе.

«Гармонизация» названных разнонаправленных влияний приводит к заключению, что с высокой вероятностью «неформализуемые» неопределенности при оценке фитомассы находятся в пределах $\pm 2-4$ % к общему ее запасу, причем установить знак этого отклонения не представляется возможным. Это значит, что окончательная неопределенность оценки фитомассы *в целом для страны* на фиксируемую дату составляет величину порядка $\pm 5-6$ %, причем здесь используется «суммарная» ошибка, т.е. некоторая комбинация случайных и систематических ошибок, предполагая при этом, что систематическая составляющая «суммарной» ошибки относительно невелика. Вероятность более высокой неопределенности мала (меньше 0.05), хотя в двух последних утверждениях высока доля экспертных суждений. Как итог, мы приходим к выводу, что заключение о том, что запасы углерода «древостоев России» [3, стр. 112] существенно завышены, действительности не соответствует.

Вторая большая группа неопределенностей в оценке фитомассы связана с применяемым модельным аппаратом перехода от таксационных показателей к фракциям фитомассы, т.е. моделированием переводных коэффициентов (ПК, обозначенный выше как R_F). Анализ ПК и его приложений к изучению биологической продуктивности лесов достаточно полно представлен в [18]; здесь мы остановимся только на дискуссионных вопросах и особенностях оценки и применения ПК в настоящей работе. Неоднократно были подтверждены региональные зависимости ПК от ряда таксационных показателей древостоев. Поэтому упрощенные подходы, использующие усредненные ПК по породам или в зависимости от одного-двух показателей, выбранных на основе тех или иных предпосылок, заведомо являются теоретически несостоятельными. На это, например, справедливо указывается в [18] в части вычисления ПК как функции высоты и диаметра древостоев в работе [10]; добавим, что в этой работе также нарушен основной системный принцип моделирования. Целесообразность выбора моделей может быть оценена только в рамках триады – цель, исходные данные, содержательное описание процесса, и можно показать, что подход [10] не является оптимальным с точки зрения ни одного из названных выше трех компонентов. Методы, аналогичные используемым в цитируемой работе, видимо, могут представить приемлемые результаты в среднем для больших территорий (например, страны в целом), но не применимы в региональных оценках и, тем более, при определении фитомассы индивидуальных древостоев.

Два многомерных модельных подхода оценки фитомассы лесов с использованием данных учета лесов, которые мы оцениваем как наиболее содержательные из опубликованных до настоящего времени, заслуживают сравнительного анализа. В.А. Усольцев в ряде работ [17, 18, 19] последовательно проводит идею оценивания фракционного состава фитомассы путем вычисления ПК (в пределах породы и географического района), в общем виде представленного как функция возраста, среднего диаметра и высоты древостоя, числа стволов и уровня производительности древостоев, используя для этого высоту в 100 летнем возрасте. Последняя, с точностью до масштаба, может быть заменена индексами классов бонитета. В качестве аналитической формы используются уравнения аллометрического типа, т.е. входами в модели служат логарифмы некоторого подмножества показателей из приведенного выше перечня. Это позволяет использовать линейный (по параметрам) метод наименьших квадратов. Заметим, что оптимальность строгого следования аллометрическим зависимостям при оценке фракций фитомассы древостоев (в отличие от применения таковых для отдельных деревьев) не имеет строгого теоретического обоснования, а модели такого типа являются монотонными по всем переменным. Было показано, что это не так для некоторых фракций и древесных пород.

В рамках второго метода [27] расчет ПК проводился по уравнениям (1) и (2), т.е. использовались только показатели, приведенные в сводных по лесным предприятиям данных ГУЛФ – возраст, индекс класса бонитета и относительная полнота.

Оба модельных подхода базируются на многомерных регрессиях, и в обоих случаях оптимальность выбора аналитической формы моделей не может быть доказана формальными методами; оценка же их статистической точности и адекватности в структурном, временном и пространственном аспектах может быть проведена прямо или косвенно. В названных подходах есть несколько существенных различий, из которых мы назовем два важнейших. Подход, реализованный В.А. Усольцевым, достаточно универсален по отношению к объекту моделирования, но требует знания таксационных показателей, определяемых для отдельного древостоя, таких как средний диаметр и число деревьев. Очевидно (и это было подтверждено экспериментально [18]), что в части точности оценки фитомассы отдельного древостоя, при прочих равных предпосылках, пара показателей *средний диаметр - число деревьев* более информативна, чем полнота. Однако это не так для совокупности древостоев, что обычно в оценке фитомассы лесов для больших территорий, поскольку понятие «среднего диаметра» неоднородной совокупности древостоев и, тем более, среднего числа деревьев, содержательного смысла не имеет и ведет к значительным потерям информации. Еще менее надежным представляется этот метод в случаях, когда исходная информация представлена агрегированными данными ГУЛФ и в моделях обсуждаемого типа средний диаметр и число деревьев приходится «восстанавливать» по относительной полноте на основе косвенной информации, используя те или иные лесотаксационные нормативы.

Второе различие заключается в идеологии моделирования. Подход, реализованный в [27, 76], построен на «прямом» использовании нелинейного многомерного анализа, и точность и адекватность его результатов могут быть верифицированы стандартными методами статистического анализа. Очевидно, что такой метод ставит определенные требования к наличию данных, их пространственному и параметрическому распределению. Проблема «произвольности» выбора модели остается и здесь, хотя она жестко ограничивается чисто математическими свойствами выбранной аналитической формы. В.А. Усольцев [17, 18] применяет метод «рекурсивного» моделирования, в котором конечные результаты являются результатам пошагового оценивания промежуточных результатов на ограниченном числе переменных, и вычисленные промежуточные модельные значения используются как входы в последующих уравнениях рекурсивной цепи. С чисто практической точки зрения такой подход может обеспечить определенные преимущества. В принципе, использование взаимных зависимостей между количеством массы различных фракций фитомассы в пределах однородных совокупностей древостоев может быть полезным, например, для усиления информационной обеспеченности оценки подземной фитомассы. Так, в [35] на материалах из различных климатических зон показано, что надземная фитомасса объясняет 83 % изменчивости общей биомассы корней. В ряде исследований [38, 64, 79] установлена достаточно тесная связь массы тонких корней с массой листвы и т.д., а также зависимость массы тонких корней от общей подземной фитомассы [54]. Однако, учитывая многофакторность подобных зависимостей, их использование за пределами опытного материала требует большой осторожности.

Параметрическая и пространственная неполнота экспериментальных данных создает серьезные проблемы при любом подходе к моделированию. Как утверждает в [18, стр. 252], «проблема неполных данных частично была снята в результате применения рекурсивно-блочного метода», который «...дал возможность разработать систему регрессионных ... моделей фитомассы при явно недостаточных фактических данных (1-3 наблюдения) по отдельным регионам, а также по некоторым фракциям фитомассы (обычно по корням и нижним ярусам)». Однако, это не меняет того печального для естествоиспытателей факта, что никакие математические ухищрения не могут добавить количества информации к той, которая содержится в опытных данных, а часто создают лишь впечатление организованного мира там, где его нет. Поэтому использование крайне малочисленных данных даже только для внесения региональных поправок в некоторую более общую эмпирическую зависимость требует большой осторожности и всегда оставляет опасность ошибочных решений. Совершенно справедливым представляется также утверждение автора, что «...важна не только практическая реализуемость точности оценки, но и логическая обоснованность модели, фундаментальность основополагающей парадигмы и, наконец, корректность методов расчета» [17, стр. 140]. Увы, доказательство «логической обоснованности» и «фундаментальности» в биологических задачах подобного типа в своей основе остаются уделом экспертных суждений. Сказанное не ставит под сомнение возможность применения обсуждаемой методологии, однако следует иметь в виду, что по своей сути этот метод существеннейшим образом усиливает экспертную компоненту моделирования на каждом звене рекурсивной последовательности, и в конечном итоге надежность результата в значительной мере определяется уровнем знаний, квалификацией модельера и обоснованностью используемых им предпосылок. Особенно опасно это на фоне рекомендаций автора «отсева» - очень часто произвольного - выпадающих значений. Формальная оценка неопределенностей при таком подходе невозможна, а

приводимые статистические показатели точности (как правило, очень высокие) имеют мало общего с фактическим положением дел.

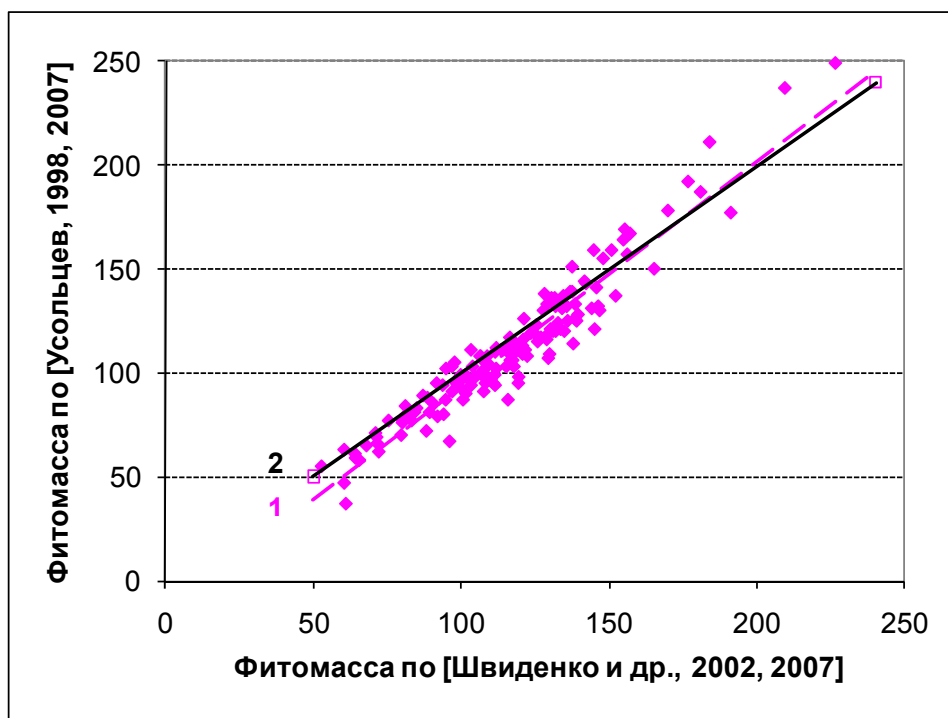


Рис. 5. Сравнение оценок запасов общей фитомассы насаждения, полученной разными методами, т·га⁻¹ абс. сух. вещества (объяснения в тексте).

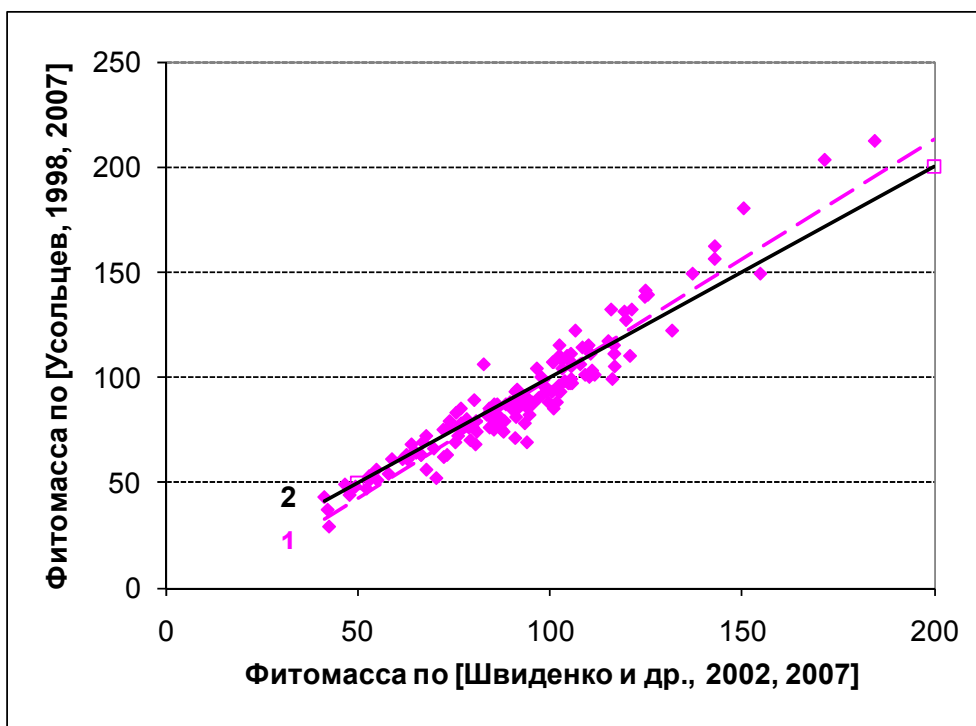


Рис. 6. Сравнение оценки запасов надземной фитомассы насаждения, полученной разными методами, т·га⁻¹ абс. сух. вещества.

Мы сравнили результаты оценки фитомассы, независимо полученные двумя обсуждаемыми методами, для 150 лесхозов 6 административных регионов Уральского региона (Ямало-Ненецкий и Ханты-Мансийский автономные округа, Тюменская, Свердловская, Курганская и Челябинская области). Оценки по методу В.А. Усольцева заимствованы из [18]. Исходно оба метода использовали одни и те же данные ГУЛФ. На рис. 5 и 6 приведено сравнение общей и надземной фитомассы лесов. Очевидный вывод из этого сравнения заключается в том, что оба метода инвентаризации фитомассы лесов на больших территориях дали достаточно близкие результаты, хотя и наблюдаются небольшие систематические расхождения. В целом, для сравниваемой территории общая фитомасса по В.А. Усольцеву меньше нашей на 3 %, а надземная – на 5 %. Расхождения эти сопоставимы с точностью оценивания, и еще раз подтверждают ту точку зрения, что существует заметный прогресс в познании закономерностей формирования и оценки фитомассы лесов.

Интересно сравнить результаты нашего анализа с данными, представляемые в документах по международным обязательствам России. В [42, стр. 166] приводятся средние коэффициенты пересчета запаса лесов в фитомассу древесины (тонн сухого вещества на 1 м³ запаса) – надземная древесина 0.54 и 0.51, соответственно для хвойных и лиственных лесов, и 0.21 для корней всех пород (рассматривалась только фитомасса древостоя). Результаты настоящей оценки дают соответственно, 0.56, 0.65 и 0.19. Очевидно, что представленный в [42] коэффициент для лиственных пород ошибочен; впрочем, это следует из общеизвестного факта, что рассматриваемый коэффициент для лиственных лесов умеренной и бореальной зон всегда выше, чем для хвойных.

4.2. Чистая первичная продукция

Измерение ЧПП в любой экосистеме является трудно разрешаемой задачей со многими неизвестными [18, 39, 45, 79], и оценка реальной неопределенности результатов требует внимательного анализа.

Как и в случае с оценкой фитомассы, мы использовали метод Монте-Карло для оценки неопределенности ЧПП на различных пространственных масштабах. На уровне генерализованных выделов рассматривалось три обобщенные фракции (надземная древесина, зеленые части и подземная фитомасса деревьев). Уровень неопределенности оказался достаточно близким для всех фракций, колеблясь от ± 2 -3 % до ± 12 -14 % в зависимости от таксационной характеристики древостоев. Среднее значение неопределенности составило ± 12 % для древесных фракций и ± 8 -9 % для подрост+подлеска и живого напочвенного покрова. Граничные 5 % и 95 % перцентили для разных фракций были близки и в среднем равны 0.92 и 1.08 соответствующих средних значений.

Чувствительность примененного нами метода к оценке массы фракций определяется их «вкладом» в ЧПП лесной экосистемы за средний период существования древостоя. Так, используя «всеобщие» модели биологической продуктивности экосистем хвойных лесов «вклад» отдельных фракций за период от 10 до 220 лет в среднем составляет [28]: ствол - 25 %, ветки - 7 %; хвоя - 36 %; корни - 24 %, подрост и подлесок - 1 %, напочвенный живой покров - 7 %. Если при таких предпосылках в качестве средней продолжительности тонких корней взять, например, 3 года, то при его изменении до 1, 2, 3 и 4 года изменения в ЧПП составляют +46, +11, 0 и -6 % соответственно; вариация доли тонких корней в разумных пределах меняет ЧПП на ± 2 %. Если мы примем потери хвои в течение сезона в размере 4 %, то увеличение этой величины на 1 % меняет ЧПП на 0.4 %.

В конечном итоге, используя описанный выше метод ИААА, неопределенность общей ЧПП лесных экосистем России была оценена в ± 7 %, ее части, размещенной в надземной древесине ± 9 %, листовом аппарате ± 10 %, подземной фитомассе ± 13 % и в нижних ярусах - порядка ± 20 % (доверительная вероятность везде 0.9). Имитация по методу Монте-Карло дала величину неопределенности примерно на четверть ниже, поскольку он не учитывает некоторые неформализуемые процедуры оценивания [64]. Результаты эти получены в предположении, что используемые модели не имеют систематических ошибок. Строго говоря, эта предпосылка выполняется только частично. Модели роста древостоев разработаны на материале, характеризующем рост древостоев на временах от десятилетий до 2-3 столетий, а модели фитомассы – на результатах измерений 1960-2000 гг. И в первом и во втором случае существуют значимые, хотя и относительно небольшие тренды [52].

Существует много результатов, полученных различными методами, которые свидетельствуют, что в последние два десятилетия ЧПП наземной растительности увеличилась. Так, в [66] утверждается, что глобальная ЧПП растительности в 1982-1999 гг. увеличилась на 6 % с примерно таким же увеличением в районах, где рост и продуктивность растительности лимитируется температурно-радиационным и температурно-водным режимами, в том числе в северном полушарии. Положительный фотосинтетический тренд за этот же период был подтвержден в ряде публикаций, например, увеличение нормализованного индекса «зелёности» (NDVI) от 0.0015 до 0.0045 NDVI единиц год⁻¹

[78]. Учет этого тренда (вне зависимости, какие именно факторы стоят за этим увеличением) ведет к заключению, что полученные нами оценки должны занижать ЧПП лесных экосистем России на величину порядка 5-7 %. Однако, выше мы показали, что отказ от учета временных трендов в изменении структуры фитомассы в 1960-2000 гг. порождает вероятную ошибку близкой величины, но противоположного знака (и ошибка эта линейно переходит на ЧПП). Поэтому, учитывая, что мы не нашли значительных систематических ошибок в общем запасе древостоев и в оценке фитомассы, у нас нет оснований предполагать наличие значимых систематических ошибок в оценке ЧПП. Конечно, подобные рассуждения не имеют строгого численного подтверждения и должны рассматриваться, как экспертная оценка.

Следует подчеркнуть, что использованная в расчетах «плотность» ЧПП является усредненной величиной за период в несколько десятилетий. Как было показано для больших районов Сибири, межсезонная изменчивость ЧПП лесов составляет 10-20 % вокруг линейного тренда, увеличиваясь с уменьшением площади района, для которого проводится оценка. Поэтому для возможно точного распространения полученных данных на отдельно взятые годы или короткие периоды необходима разработка вспомогательных моделей корректировки усредненных данных на региональные климатические условия отдельно взятого вегетационного периода.

Оценка ЧПП лесных экосистем, полученная в настоящей работе, примерно на треть выше, чем таковые, последовательно базирующиеся на ГИС-усреднении полевых измерений. Типичный пример [24], полученный путем непосредственного распространения усредненных данных несколько дополненной базы данных Н.И. Базилевич на классы лесной растительности, составил $225 \text{ г С м}^{-2}\cdot\text{год}^{-1}$. Это еще раз подтверждает как нашу предпосылку, так и вывод ряда фундаментальных работ [18, 39] о том, что практически всем применявшимся и большей части ныне применяющихся эмпирических методов определения ЧПП лесных экосистем свойственны значительные отрицательные систематические ошибки.

При работе с недостаточно организованными системами сравнение независимо полученных результатов является одним из наиболее объективных приемов оценки тех или иных методических решений. В целях эмпирической проверки моделей оценки ЧПП, в работе [18] использованы два вида моделей чистой первичной продукции. Один из методов, предложенный ранее другими авторами [10, 21], базируется на нелинейной зависимости $NPP_i/GS = f(1/A)$, где NPP_i – чистая первичная продукция, размещенная в i – фракции, GS и A – соответственно, запас и возраст древостоя. Следует согласиться с критической оценкой этого метода В.А. Усольцевым [18]. Теоретическая недостаточность метода очевидна по ряду соображений, наиболее существенным из которых является общая методическая предпосылка, что размещение ЧПП во всех фракциях коррелирует с запасом древостоев. Здесь авторы используют аналогию с определением процента текущего прироста древостоев по запасу (что обычно в лесной таксации для отдельных древостоев или их однородных совокупностей). Очевидно, что такой подход может быть использован для оценки ЧПП древесных стволов (и то при наличии ряда ограничений), однако нет оснований предполагать, что он приемлем для тонких корней или ассимиляционного аппарата лесных экосистем, т.-е. структурных частей, на которые приходится основная масса ЧПП.

Модели, рекомендуемые В.А. Усольцевым [18, стр. 282], представляют собой вариации общей аналитической формы $\ln NPP_i = f(\ln Ph_F, \ln NPP_s, \ln A, \ln D, \ln H, \ln N, \ln GS)$, где NPP – чистая первичная продукция по пяти фракциям (f -хвоя/листья, s -ствол, а также ветви, корни, нижние яруса в целом), Ph – фитомасса, GS – запас, A , D и H – средние возраст, диаметр и высота древостоя, соответственно, и N – число стволов на 1 га. Суть подхода и идеология моделирования ЧПП сходны с таковыми, использованными автором для оценки фитомассы, и наш комментарий по этому поводу может быть в полной мере перенесен и на оценку ЧПП.

Однако, принципиальное отличие метода моделирования В.А. Усольцева от использованного в нашей работе заключается в том, что исходной информацией для расчета явились данные прямых измерений ЧПП на пробных площадях. Мы же, как отмечалось выше, использовали базу данных прямых измерений фитомассы и систему моделей динамики фитомассы. Поскольку непосредственным измерениям ЧПП, как правило, свойственны отрицательные систематические ошибки, особенно для живого напочвенного покрова и подземной части экосистем, было бы логично предположить несколько более низкие оценки ЧПП при применении метода В.А. Усольцева.

Мы провели сравнение результатов определения ЧПП по методу В.А. Усольцева и полученным им же [18] данными по методу Д.Г. Замолотчикова и А.И. Уткина с методом, предложенным нами, для покрытых лесной растительностью земель тех же 150 лесхозов Урала, для которых проводилось сравнение запасов фитомассы. На рис. 7 и 8 представлено сравнение общей и надземной ЧПП. Как следует из приведенных данных, оба метода – В.А. Усольцева и наш – дают достаточно близкие результаты, хотя и наблюдается некоторое трендовое различие. Общая ЧПП, определенная

по методу В.А. Усольцева, ниже нашей на 8 %. Примерно такая же картина наблюдается при сравнении ЧПП, размещенной в надземных частях экосистемы. Общая ЧПП, полученная по методу Д.Г. Замолотчикова и А.И. Уткина (результаты заимствованы нами из [18]), отличается от наших результатов более чем вдвое (на +118 %). Примерно такое же различие с результатом В.А. Усольцева. Мы не нашли логического объяснения столь большого различия. Возможно, это связано со спецификой упрощенных методов: для значительных по площади районов, в частности для страны в целом, такие методы могут давать относительно надежные результаты, но они неприменимы в региональных инвентаризациях.

Приведем некоторые иные оценки ЧПП, опубликованные в последние годы В [10] ЧПП лесов основных лесообразующих пород России оценена в 275 ± 80 г С м⁻²·год⁻¹, в том числе 175 ± 40 г С м⁻²·год⁻¹ в древостое и 100 ± 35 г С м⁻²·год⁻¹ в подчиненных ярусах. Если общая величина ЧПП достаточно близка к нашей оценке (-7.4 %), то ее составляющие отклоняются на -23 % и +45 %. Средневзвешенная по площади хвойных и лиственных пород лесов циркумполярной бореальной зоны величина плотности ЧПП из 12 оценок составила 267 ± 89 г С м⁻²·год⁻¹ [25], или на 10 % ниже результата, представленного в настоящей работе. Сравнение результатов, полученных для лесов России, с другими, преимущественно бореальными странами, дает достаточно близкие результаты. ЧПП, определенная для лесов трех провинций Канады (Альберта, Саскачеван и Манитоба) по национальной модели СВМ-CFS2 [54], составила 296 г С м⁻² (в т.ч. субарктические леса 152, бореальные 300, травяные леса 293, леса в Кордильерах 394 г С м⁻²) – удивительно близкое значение к среднему для лесов России.

Некоторые оценки ЧПП представляют небольшой интерес в силу применения специфических методических приемов и предпосылок. Надежность результатов этих работ – в смысле оценки среднего значения ЧПП лесов России - не может быть оценена даже предположительно. Мы ограничимся двумя примерами. В [46] использованы только «наиболее надежные» (с точки зрения авторов) экспериментальные данные. Это предопределило ограниченное количество наблюдений и их приуроченность к немногим, более продуктивным, регионам страны, что дало среднюю величину ЧПП в 614 г С м⁻² для России (по сути это просто средняя величина измерений на пробных площадях, включенных в анализ) и 424 г С м⁻² для всей бореальной зоны В работе [22] ЧПП для 882 млн. га лесных земель оценена в 1800 Тг С со средним 204 г С м⁻². Работа этой же группы авторов [15] для «лесных биомов» (не очень ясно, что этот термин обозначает; судя по площади в 883.1 млн.га, это лесные земли России в 2003 году) ЧПП оценена в 1927 Тг С, т.е. средняя величина ЧПП составляет 218 г С м⁻²·год⁻¹. Очевидно, что это очень низкая оценка, тем более, если учесть, что не покрытые лесной растительностью земли (как вторая составляющая лесных земель), как правило, имеют ЧПП выше, чем покрытые лесом земли.

Существенный интерес представляют результаты, полученные методами иной природы [6, 7 и др.]. Оценка на основе хлорофиллового индекса (и скорректированная нами на долю лесных земель по биоклиматическим зонам) составляет 2.18 Пг С год⁻¹ [6], т.е. -8.4 % к нашему результату. Заметим, что в [14] результат для лесов России по этому методу представлен в 2.57 Пг С год⁻¹ (+10.9 %), однако мы полагаем, что площади лесов, используемые в цитируемой работе, были завышены. В любом случае, разница в ± 10 % для методов существенно различной природы и столь высоко изменчивого показателя, как ЧПП, представляется вполне приемлемой.

Модели «процессного» типа (в частности, динамические глобальные модели растительности – DGVM) пытаются объяснить механизмы, определяющие продуктивность наземных экосистем. Приходящая радиация и климатические условия (главным образом, осадки и температура) признаются главнейшими факторами, которые определяют интенсивность фотосинтеза и распределение его продуктов в ткани растений. Существует значительное количество моделей такого типа. Они различаются по используемой информации, перечню и детальности рассмотрения процессов. Основные процессы, обычно рассматриваемые в моделях, включают фотосинтез, дыхание (затрачиваемое на ростовые процессы и поддержку жизнедеятельности существующих живых тканей), эвапотранспирацию, поглощение и выделение азота, распределение продуктов фотосинтеза в различные части растений, отпад и разложение мертвого растительного вещества, фенологию.

В работе Cramer et al. [40], посвященной сравнительному анализу ЧПП, оцененной по 17 различным DGVM, последние были разделены на 3 группы по вводимой информации: 1) модели, базирующиеся на данных дистанционных наблюдений; 2) модели, базирующиеся на имитации сезонных биогеохимических потоков; и 3) модели, имитирующие функции экосистем (биогеохимические потоки) и структурные особенности растительности (тип растительности и его структура).

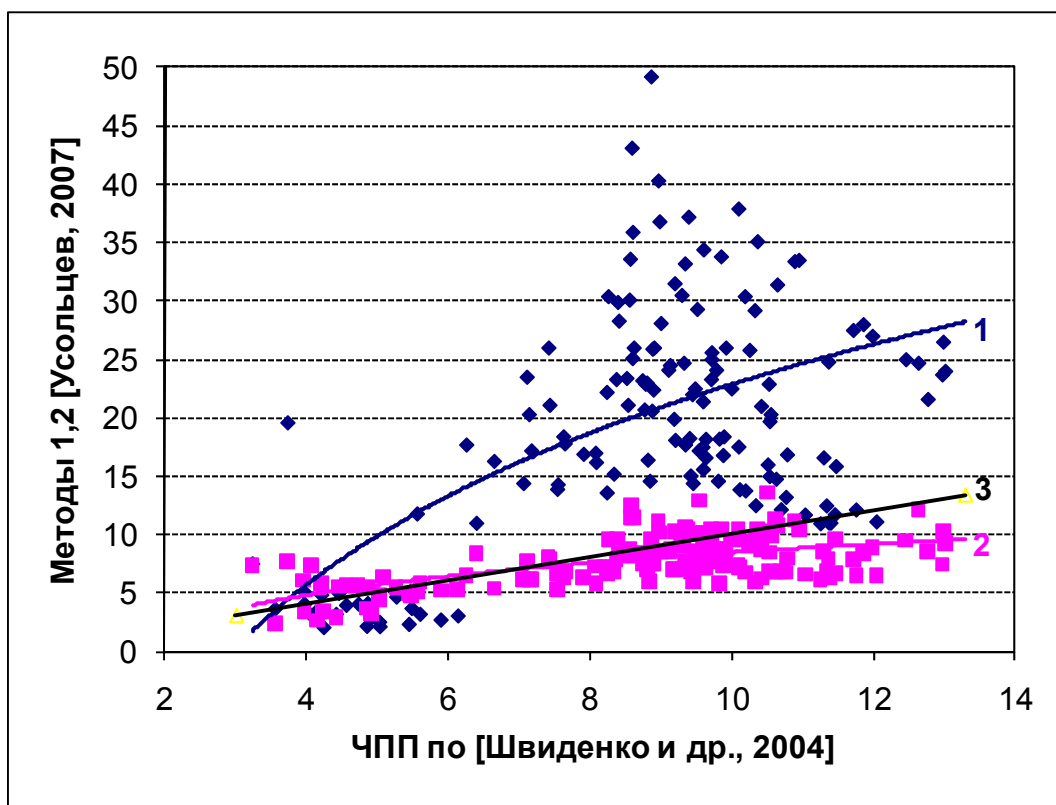


Рис. 7. Сравнение оценок общей ЧПП лесов по лесхозам Урала, полученной разными методами, $t \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$ абс. сух. вещества. Цифрами обозначено: 1 – оценка по методу Д.Г. Замолодчикова, А.И. Уткина, выполнена В.А. Усольцевым [10]; 2 – по методу В.А. Усольцева [18], 3- средние величины по методу А.З. Швиденко и др. (2004) [27].

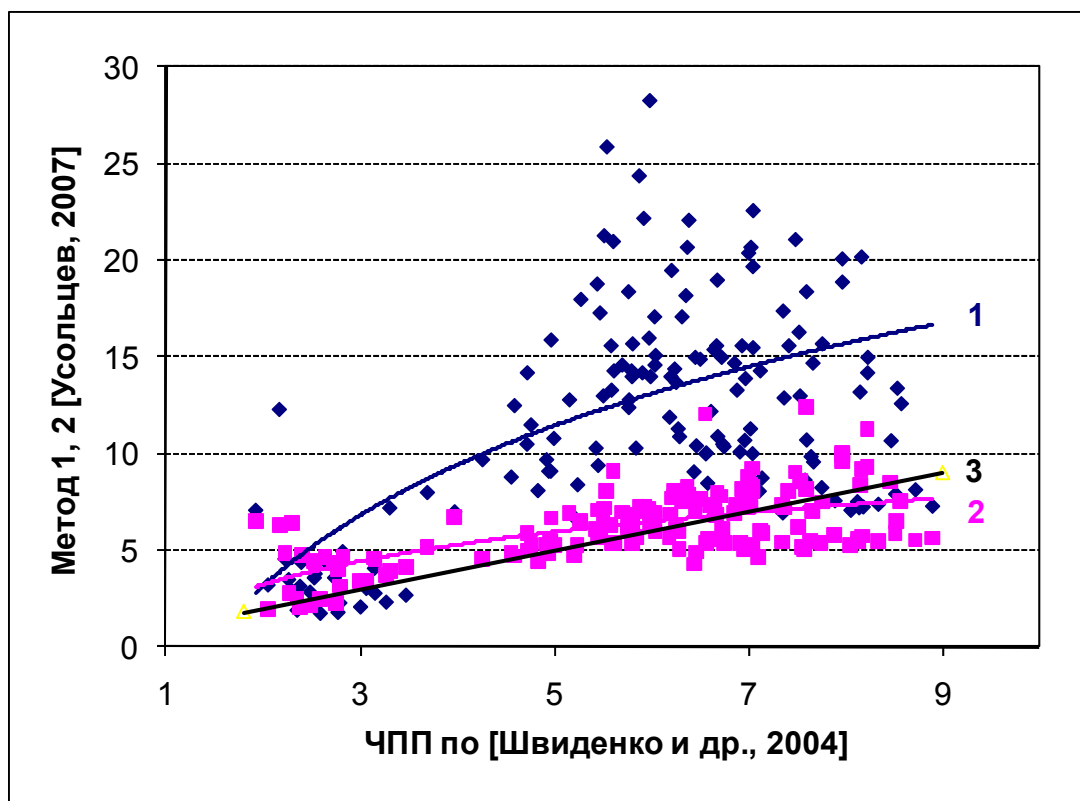


Рис. 8. Сравнение оценки надземной ЧПП насаждения, полученной разными методами, $t \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$ абс. сух. вещества. Обозначения как на рис.7.

Первая группа моделей (CASA, GLO-PEM, SDBM, TURC, SIB2) основывается на концепции эффективности использования света (light use efficiency, *LUE*) для преобразования поглощаемой части фотосинтетически активной радиации (ФАР) в фитомассу (*fAPAR*), поскольку еще в классических работах [50, 60] было показано, что при идеальных условиях уровень первичной продукции линейно зависит от уровня поглощения фотосинтетически активной радиации, т.е. $GPP = (fAPAR) \cdot (PAR) \cdot (e \cdot S_{Tmin} \cdot S_{VPD})$, где *GPP* – валовая первичная продукция ($г С м^{-2}$), *e* – максимальная эффективность использования света ($г С МДж^{-1}$), *fAPAR* – проникающая в полог часть ФАР (безразмерная величина), *PAR* – приходящая ФАР ($МДж м^{-1}$), *S_{Tmin}* – скаляр минимальной температуры (0-1) и *S_{VPD}* – дефицит влажности [79]. Чистая первичная продукция определяется как $NPP = GPP - Ra$, $Ra = Rm + Rg$, где *Ra*, *Rm* и *Rg* – автотрофное дыхание, дыхание существующих тканей и дыхание, затрачиваемое на образование новых тканей, соответственно; обычно измеряются в $г С м^{-2} день^{-1}$. Эти модели используют данные дистанционного зондирования для оценки *fAPAR* и фенологии (периода, в течение которого возможен процесс фотосинтеза). Модели второй группы (HRBM, CENTURY, TEM, CARAIB, FBM, PLAI, SILVAN, BIOME-BGC, KGBM) моделируют сезонные биогеохимические потоки, используя климат, почву и распределение растительности в качестве основных предпосылок для параметризации моделей. Наконец, модели третьей группы включают BIOME3, DOLY и HYBRID. Все названные модели определяют ЧПП, хотя и по-разному – или непосредственно по характеристикам растительности и показателям внешней среды (температура, осадки, доступный азот и другие), либо как разницу между двумя независимо моделируемыми процессами – валовой первичной продукцией и автотрофным дыханием экосистем.

В целом, среднее значение ЧПП, вычисленное для лесов России по названным 17 DGVM, оказалось равным $338 г С м^{-2} \cdot год^{-1}$, что отличается от нашего результата на +13.8%. Учитывая глобальный характер моделей, нивелирующий региональные особенности и их специфику, следует признать практическую идентичность результата. Однако, изменчивость результатов по отдельным моделям оказалась высокой – $\pm 22\%$ к среднему значению по всем моделям, причем изменчивость эта заметно уменьшалась с севера – от тундровых и лесотундровых лесов к югу.

Одним из перспективных путей использования DGVM является их «районирование». Так, «районированная» версия LPJ DGVM, где была использована детальная классификация реального земельного покрова на основе спутниковых данных и разработан специальный гидрологический блок с учетом влияния вечной мерзлоты, примененная к большому (~300 млн га) району Сибири, дала среднюю величину ЧПП, близкую к оценке, полученной для этого региона нашим методом [32].

Оценки ЧПП, полученные методом *eddy covariance*, ограничены немногими экспериментальными площадями и составляют $212 г С м^{-2} \cdot год^{-1}$ в сосновых [55] и $\sim 250 г С м^{-2} \cdot год^{-1}$ в темнохвойных [71] лесах Сибири. Однако, 1) этот метод не измеряет ЧПП непосредственно, а рассчитывает его по разнице между валовой первичной продукцией и автотрофным дыханием экосистем; 2) дает только оценку углеродного обмена экосистем с атмосферой, и 3) пространственная и параметрическая ограниченность измерений (из 17 станций наблюдений, существующих на территории России, измерения в лесу проводят 14) не позволяет произвести надежное обобщение полученных результатов на большие территории. Существуют также большие неясности с точностью измерений этим методом, особенно в ночное время и в условиях пересеченного рельефа [37].

5. Заключение

Как следует из приведенных выше материалов, доступная на сегодня информация и модельный аппарат позволяют оценить фитомассу и ЧПП достаточно надежно, удовлетворяя в основном требованиям полного углеродного бюджета на уровне страны и ее крупных регионов [64]. Однако следует подчеркнуть, что приведенные выше результаты, хотя и вычислены для лесов по состоянию на некоторую фиксированную дату (с точностью до специфики данных ГУЛФ), 1) используют модельный аппарат, разработанный на измерениях, выполненных почти в течение столетия, и не включают трендов различной природы, и 2) не отражают межсезонную изменчивость климатических условий [59].

Северная Евразия, как и вся планета, испытывает значительные изменения внешней среды, включая климатические изменения, возрастание атмосферной концентрации CO_2 , увеличение осадений азота, и на этом фоне – возрастающее антропогенное давление. Климатические изменения в высоких широтах Азиатского континента являются наиболее интенсивными в глобальном масштабе. Два последние десятилетия (1980е и 1990е) были наиболее теплыми за весь период документированной истории климатических измерений, причем потепление было наиболее интенсивным в Северной Евразии. Пока трендовые изменения температуры и осадков далеки от физиологических пределов

устойчивого функционирования лесов, однако особо опасными становятся учащающиеся интенсивные региональные аномалии циркуляции атмосферы.

Возрастание атмосферной концентрации CO_2 за период с 1980 по 2000 годы составило с 337 до 369 частей на миллион или 9 %; в 1995-2005 гг. средняя глобальная концентрация CO_2 продолжала возрастать со скоростью 1.9 частей на миллион в год [43]. Влияние возрастающей концентрации на ЧПП обычно отражают «формулой Киллинга» $\text{NPP}(C_a) = \text{NPP}_0 [1 + \beta \ln(C_a/C_{a=0})]$, где C_a – фактическая концентрация CO_2 , β – фактор роста, $C_{a=0}$ – некоторая базовая концентрация CO_2 (например, до индустриальная), $\text{NPP}_0 = \text{NPP}(C_{a=0})$ [36]. В целом, формула эта содержит подтверждающую идею, однако многие аспекты процесса остаются неизвестными.

Уровень осаджений азота в индустриально развитых странах в середине 1990х достиг $15 \text{ кг N га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$ [48, 56]; хотя в целом по России этот уровень значительно ниже, в основных промышленных районах страны величина осаджений становится ощутимым фактором внешней среды.

По достаточно согласованному мнению многих публикаций, изменения климата и внешней среды в условиях достаточного количества влаги положительно влияют на продуктивность лесов [34]. По мнению В.А. Алексева и М.В. Маркова [3] среднее годовое повышение прироста лесов России (речь идет о приросте по наличному запасу) может быть принято 0.5 % в год, т.е. порядка 20 % за последние 40 лет предыдущего столетия, однако эти числа должны быть использованы с предосторожностью, поскольку вычислены на основе косвенных данных по изменению запаса и ряда предположений.

Изменение запасов фитомассы и ЧПП интегрируют эти и другие климатические, экологические, геохимические и иные воздействия человека на биосферу. Идет перестройка многих важных составляющих продукционного процесса: распределение углерода в подземную и надземные части, меняются уровни разложения растительной органики, идет акселерация режимов природных нарушений, заметны изменения других процессов функционирования экосистем.

Научные результаты последнего десятилетия во многом проясняют характер влияния глобальных изменений на растительные экосистемы и, в частности, на лес. Предполагается, что увеличение температуры на территории России в среднем способствует повышению продуктивности лесов, поскольку обычные устойчивые температуры вегетационного периода ниже, чем температурный оптимум для деревьев умеренных ($25\text{-}30^\circ\text{C}$) и высоких ($15\text{-}20^\circ\text{C}$) широт. В опытах по увеличению температуры почвы и/или воздуха возрастание продуктивности составило 19 ± 3 %. За период с 1958 года начало вегетационного периода в северном полушарии сдвинулось на 7 дней [58], что способствует увеличению ЧПП. Однако, чтобы это произошло, требуется соответствующее увеличение осадков, этого не наблюдалось в обширных континентальных районах Азиатской России в течение последних десятилетий. Имеются примеры для высоких широт, когда увеличение температуры вело к уменьшению радиального прироста деревьев в связи со спровоцированным этим увеличением недостатком влаги [31]. Увеличение вегетационного периода может входить в противоречие с фотопериодизмом растений, а недостаточное охлаждение в зимний период отрицательно влиять на ЧПП [65]. Помимо прямых короткопериодных воздействий и реакций экосистем на увеличение температуры, существуют многочисленные не прямые, в частности, температурно-обусловленные изменения водного режима, направленности сукцессий, обеспеченности растений питательными веществами, состава древесных пород, размножения насекомых и патогенов.

Хотя в целом стимулирующее влияние удобряющего эффекта CO_2 на функционирование лесных экосистем и их продуктивность признается, существуют разные результаты и мнения относительно базовых параметров этого процесса. Повышенные концентрации углекислоты способствуют более раннему созреванию лесных деревьев (при меньших размерах в возрасте спелости) и непропорциональное перераспределение углерода в генеративные органы [41]. В ряде экспериментов на уровне лесной экосистемы было показано, что недостаток азота уменьшает влияние повышенных концентраций CO_2 на прирост фитомассы [41, 66], а внесение дополнительных количеств азота усиливало реакцию растений [69, 72]. На региональном уровне, Magnani et al. [56] показали, что чистое накопление углерода в умеренных и бореальных лесах, осредненное на все время существования древостоев высоко коррелирует с региональным уровнем мокрого осаджения азота. Существенные результаты получены также в понимании воздействия климатических факторов на функционирование и продуктивность лесных систем северного полушария [50, 63, 73 и др.]. Этот перечень может быть продолжен.

Однако, пока нет еще фундаментального понимания, как древесные растения и экосистемы функционируют в динамических условиях множественных ограничений на жизненные ресурсы, и ответы на важнейшие вопросы этого плана – (1) насколько устойчивой является прямая стимуляция фотосинтеза и ЧПП этими изменениями внешней среды? (2) в какой степени ограничения (например на элементы питания) ограничивают CO_2 удобряющий эффект на прирост биомассы и как долго

влияние таких ограничений остается существенными? (3) в какой мере осаждения азота могут смягчать влияние обычного для высоких широт недостатка доступного азота на рост растений? (4) как эти изменения взаимодействуют с гидрологическим циклом, в частности, с водным стрессом? (5) как скажется влияние криогенной деструкции многолетнее мерзлотных лесных ландшафтов на экосистемы высоких широт – в полной мере пока не даны.

Многие вопросы также остаются и в части эмпирического определения показателей продуктивности. Часть из них обозначена выше. Думается, что утверждение В.А. Усольцева и др. о том, что «корректные количественные и, главное, воспроизводимые оценки могут быть выполнены сегодня только по приходной части углеродного цикла, а именно – по фитомассе и ЧПП лесов» [19, стр. 185] несколько преувеличивает достижения в рассматриваемой области. Однако, оно представляется справедливым в той части, что эти два показателя (в частности, фитомасса) уже сегодня может быть оценены более надежно, чем ряд других компонентов полного углеродного бюджета на всем многообразии территорий российских лесов, по крайней мере в той части, где имеются относительно надежные данные лесоустройства и достаточное количество измерений *in situ*.

Тем не менее, оставшихся проблем много и здесь. Мы ограничимся двумя примерами. В одной из недавних работ, используя дополнительные экспериментальные данные, были уточнены модели для оценки подземной фитомассы лесов (общей и тонких корней) в Канаде, и новые модели изменили величину ЧПП для лесов трех провинций страны на четверть - с 372 до 296 г С м⁻²·год⁻¹ [54]. Многочисленные неясности остаются с продуктивностью тонких корней, начиная с отсутствия единой рациональной классификации (напр. [33]) и включая широкий круг вопросов теоретического плана. Есть проблемы с пониманием нерегулярности цикла тонких корней и их старением [33] на фоне большой внутригодовой и межгодовой изменчивости фитомассы тонких корней [57, 67, 68]. Нет однозначных представлений о характере влияния географической зональности, видового состава древесных пород, влажности и плодородия почв на размещение углерода в тонких корнях и их массовый оборот [61, 83 и др], хотя более теплые и богатые местообитания ассоциируются с ускоренным массовым оборотом тонких корней [40, 44], а в ряде публикаций предполагается, что время жизни тонких корней лиственных пород короче, чем хвойных [32, 44].

Представляется важным, что работы по изучению ЧПП в качестве обязательной составляющей начинают рассматривать неопределенность получаемых результатов, хотя в ряде случаев до более корректного рассмотрения этого вопроса еще далеко. Однако принципиальная важность этого заключается в том, что сама постановка вопроса неизбежно способствует повышению методической и информационной обоснованности исследований. Фитомасса и ЧПП являются важнейшими показателями углеродного бюджета лесных экосистем, поэтому последовательное улучшение знания этих показателей существенно для технического обоснования международного пост-Киото переговорного процесса. В этом смысле, думается, полезным является главный методический вывод настоящей работы, что совершенствование знания продукционного процесса лесов России лежит в области системной интеграции теоретико-модельных и эмпирических методов. Видимо, это единственный путь в условиях быстро меняющегося мира.

Благодарности. Авторы благодарят д-ра М. Густа за помощь в вычислении ЧПП для территории лесов России на основе динамических глобальных моделей растительности.

Библиографический список

1. **Алексеев В.А., Бердси Р.А.** Углерод в экосистемах лесов и болот России. - Красноярск: Институт леса СО РАН, 1994. – 225 с.
2. **Алексеев В.А., Марков М.В.** Глобальное изменение климата и динамика продуктивности лесов России // Всемирная конференция по изменению климата, Москва, 29 сентября-3 октября 2003 г. Тезисы докладов. – 2003. – С. 248.
3. **Алексеев В.А., Марков М.В.** Статистические данные о лесном фонде и изменении продуктивности лесов России во второй половине XX века. – СПб: СПб лесной экологический центр, 2003. – 272 с.
4. **Базилевич Н.И.** Биологическая продуктивность экосистем Северной Евразии – Москва: Наука, 1993. – 293 с.
5. **Вашук Л.Н., Швиденко А.З.** Динамика лесных пространств Иркутской области. – Иркутск: ОАО «Иркутская областная типография № 1», 2006. – 392 с.
6. **Воронин П.Ю., Ефимцев Е.И., Васильев А.А. и др.** Проектное содержание хлорофилла и биоразнообразия растительности основных ботанико-географических зон России // Физиология растений. – 1995. – Т.42. – С. 295-302.

7. **Воронин П.Ю., Коновалов П.В., Блондинский В.К., Кайбияйнен Л.К.** Хлорофильный индекс и фотосинтетический сток углерода в леса Северной Евразии // Физиология растений. – 2004. – № 51. – С. 390-395.
8. **ГКЛХ СМ СССР.** Лесной фонд СССР (по учету на 1 января 1973 года), книга 2 – М.: Лесная промышленность, 1976. – 560 с.
9. **Данюлис Е.П., Жиринов В.М., Сухих В.И., Эльман Р.И.** Дистанционное зондирование в лесном хозяйстве. – М.: Агропромиздат, 1989. – 223 с.
10. **Замолодчиков Д.Г., Уткин А.И.** Система конверсионных отношений для расчета чистой первичной продукции лесных экосистем по запасам насаждений // Лесоведение. – 2000. – № 6. – С. 54-63.
11. **Замолодчиков Д.Г., Уткин А.И., Коровин Г.Н.** Конверсионные коэффициенты фитомасса/запас в связи с дендрометрическими показателями и составом древостоев // Лесоведение. – 2005а. – №6. – С. 73-81.
12. **Замолодчиков Д.Г., Коровин Г.Н., Уткин А.И. и др.** Углерод в лесном фонде и сельскохозяйственных угодьях России. – М.: Товарищество научных изданий КМК, 2005б. – 200 с.
13. **Исаев А.С., Коровин Г.Н.** Углерод в лесах Северной Евразии // Кружоворот углерода на территории России /Под ред. Н.П. Лаверова и Г.А. Заварзина. М., 1999. – С. 63-95.
14. **Кудеяров В.Н., Заварзин С.А., Благодатский С.А. и др.** Пулы и потоки углерода в наземных экосистемах России. – М.: Наука, 2007. – 315с.
15. **Моисеев Б.Н., Алябина И.О.** Оценка и картографирование составляющих углеродного и азотного балансов в основных биотомах России // Известия РАН. Серия географическая. – 2007. – № 5. – С. 1-12.
16. **МПРРФ.** Лесной фонд России (по данным Государственного учета лесного фонда по состоянию на 1 января 2003 г.). М.: Министерство природных ресурсов Российской Федерации, 2003. – 637 с.
17. **Усольцев В.А.** Формирование банков данных о фитомассе лесов. Екатеринбург: УрО РАН, 1998. – 541 с.
18. **Усольцев В.А.** Биологическая продуктивность лесов Северной Евразии: методы, база данных и её приложения. Екатеринбург: УрО РАН, 2007. – 636 с.
19. **Усольцев В.А., Часовских В.П., Воронов М.П. и др.** Оценка углерододепонирующей способности лесов: от пробной площади к автоматизированной системе пространственного анализа // Лесная таксация и лесоустройство. - 2008. - №1 (39). – С. 183-190.
20. **Успенский В.В.** Изменчивость плотности древесины сосны и ее использование в весовой таксации // ИВУЗ Лесной журнал, 1980. - №6. – С. 9-12.
21. **Уткин, А.И., Замолодчиков, Д.Г., Пряжников, А.А.** Методы определения депонирования углерода фитомассы и нетто-продуктивности лесов (на примере Республики Бкларусь) // Лесоведение, 2003. - № 1. – С. 48-57.
22. **Филиппчук А.Н., Моисеев Б.Н.** Оценка стока атмосферного углерода в растительный покров России // Всемирная конференция по изменению климата, Москва, 29 сентября - 3 октября 2003 г. Тезисы докладов. – 2003. – С.543.
23. **ФЛС.** Лесной фонд России (по учету на 1 января 1993 г.). М: Федеральная служба лесного хозяйства России, 1995. – 281 с.
24. **Швиденко А.З., Нильссон С., Столбовой В.С. и др.** Опыт агрегированной оценки основных показателей биопродукционного процесса и углеродного бюджета наземных экосистем России. 1. Запасы растительной органической массы // Экология. – 2000. – №6. – С. 403-410.
25. **Швиденко А.З., Нильссон С., Столбовой В.С. и др.** Опыт агрегированной оценки основных показателей биопродукционного процесса и углеродного бюджета наземных экосистем России. 2. Нетто-первичная продукция экосистем // Экология. – 2001. – №2. – С.83-90.
26. **Швиденко А.З., Щепашенко Д.Г., Нильссон С.** Агрегированные модели фитомассы основных лесобразующих пород России // Лесная таксация и лесоустройство. – 2002. – № 1. – С. 50-57.
27. **Швиденко А.З.** Система моделей роста и динамики продуктивности лесов России. 2. Таблицы и модели биопродуктивности / А.З. Швиденко, Д.Г. Щепашенко, С. Нильссон, Ю.И. Будуй // Лесное хозяйство. – 2004. – № 2 – С. 40-44.
28. **Швиденко А., Щепашенко Д., Нильссон С. и др.** Таблицы и модели роста и биологической продуктивности насаждений основных лесобразующих пород Северной Евразии (нормативно-справочные материалы) – М.: Федеральная служба лесного хозяйства и Международный институт прикладного системного анализа, 2007. - 803 с.

29. **Швиденко А., Щепашенко Д., Нильссон С.** Текущий прирост лесов России: базовая оценка на начало 3-го тысячелетия // Лесная таксация и лесоустройство. – 2008. – № 1(39). – С. 83-100.
30. **Щепашенко Д.Г., Швиденко А.З., Лакида П.И.** База данных по структуре фитомассы лесов России // ИВУЗ Лесной журнал. – 2005. - № 4. – С. 80-86.
31. **Barber, V.A., Juday, G.P., Finney, B.P.** Reduced growth of Alaskan white spruce in the 20th century from temperature-induced drought stress // Nature, 2000. - V. 405, - P. 668-673.
32. **Beer C., Lucht W., Schmullius C., Shvidenko A.** 2006. Small net carbon dioxide uptake by Russian forests during 1981-1999 // Geophysical Research Letter. – V.33, L15403, doi: 10.1029/2006GL026919.
33. **Bloomfield J., Vogt K., Wargo P.M.** Tree root turnover and senescence // Plant roots: the hidden half, ed. by Y. Waisel, A. Eshel and U. Kafkafi, Marcel Dekker, New York, 1996. – P. 363-381.
34. **Boisvenue C., Running S.W.** Impact of climate change on natural forest productivity –evidence since the middle of the 20th century // Global Change Biology. – 2006. – V. 12. – P. 1-21.
35. **Cairns M.A., Brown S., Helemer E.N., Baumgardner G.A.** Root biomass allocation in the world's upland forests // Oekologia. – 1997. – V. 111. – P. 1-11.
36. **Bacastov R., Keeling C.D.** Atmospheric carbon dioxide and radiocarbon in the natural carbon cycle: II. Changes from A.D. 1700-2070 as deduced from a geochemical model / Carbon and the biosphere (eds. G.M. Woodwell and E.V. Pecan, Springfield, 1973. – P.86-135
37. **Buchman, N.** Plant ecophysiology and forest response to global change. Tree Physiology, 2002. – V. 22. – P. 1177-1184.
38. **Cannell M.G.R., Dewar R.C.** Carbon allocation in trees: a review of concepts for modeling // Adv. Ecol. Res. – V. 25. – P. 59-104.
39. **Clark D.A., Brown S., Kicklighter D.W. et al.** Measuring net primary production in forests: concepts and field methods. Ecological Applications, 2001. – V.11. – P. 356-370.
40. **Cramer W., Kicklighter D.W., Bondeau A. et al.** Comparing global models of terrestrial net primary productivity (NPP): Overview and key results // Global Change Biology, 1999. – № 5 (Suppl.). – P. 1-15.
41. **De Graaff M.A. et al.** Interactions between plant growth and soil nutrient cycling under elevated CO₂: a meta-analysis // Global Change Biology. – 2006. – V.12. P 2077-2091.
42. **FAO 2000.** Forest resources of Europe, CIS, North America, Australia, Japan and New Zealand (industrialized temperate/ boreal countries. Main Report – FAO of the United Nations, Geneva Timber and Forest Study Papers, № 17, 2000. – 445 pp.
43. **Forster P. et al.** Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing // Climate Change 2007: The Physical Science Basis, edited by S.Solomon et al. Contribution of WG I to the Fourth Assessment Report of the IPCC, Cambridge, Cambridge Univ. Press. -2007. – P. 16-32.
44. **Gill R.F., Jackson R.B.** Global pattern of root turnover for terrestrial ecosystems // New Phytologist, 200. – V. 147. – P. 13-31.
45. **Gower S.T., Kurcharik C.J., Norman J.M.** Direct and indirect estimation of leaf area index, fAPAR and net primary production of terrestrial ecosystems. Remote Sensing of Environment, 1999. – V.70. – P. 29-51.
46. **Gower S.T., Krankina O., Olson et al.** Net primary production and carbon allocation patterns of boreal forest ecosystems // Ecological Applications. -2001. -V. 11(5). - P. 1395-1411.
47. **Hendrick R.L., Pregitzer K.S.** The dynamics of fine root length, biomass, and nitrogen content in two northern hardwood ecosystems // Can. J. For. Res. – 1993. – V. 23. – P.2507-2520.
48. **Holland E.A. et al.** Nitrogen deposition onto United States and Western Europe: synthesis of observations and models // Ecological Applications. – 2005. – V.15. – P. 38-57.
49. **LaDeau J.S., Clark J.S.** Rising CO₂ levels and the fecundity of forest trees // Science. – 2001. – V. 292. – P.95-98.
50. **Landsberg J.** Physiological ecology of forest production. – London: Academic Press, 1986 . – 198 pp.
51. **Kajimoto T., Matsuura Y., Sofronov M.A. et al.** Above- and belowground biomass and net primary productivity of a Larix gmelinii stand near Tura, central Siberia. Tree Physiology, 1999. – V.19. – P.815-822.
52. **Lapenis A., Shvidenko A., Shepaschenko D. et al.** Acclimation of Russian forests to recent changes in climate // Global Change Biology. – 2005. – V 11. – P. 2090-2102.
53. **Levy, P.E. et al.** The effects of nitrogen enrichment on the carbon sink in coniferous forests: uncertainty and sensitivity analyses of three ecosystem models // Water, Air and Soil Pollution: Focus. – 2004. – V. 4. – P.67-74.

54. **Li Z., Kurz W.A., Apps M.J., Beukema S.J.** Belowground biomass dynamics in the Carbon Budget Model of the Canadian Forest Sector: recent improvements and implications for the estimation of NPP and NEP // *Canadian Journal of Forest Research*. – 2003. – V.33. – P. 126-136.
55. **Lloyd J., Shibistova O., Zolotoukhine D. et al.** *Tellus*. – 2002. – V. 54B. – P.590-610.
56. **Magnani F. et al.** The human footprint in the carbon cycle of temperate and boreal forests / *Nature*. – 2007. – V. 447. – P. 849-851.
57. **Makkonen K., Helmisaari H.S.** Assessing fine-root biomass and production in a Scots pine stand – comparison of soil core and root in growth core methods // *Plant and Soil*. – 1999. – V. 210. – P. 43-50.
58. **Mayneni R.B., Keeling C.D., Tucker C.J. et al.** Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981-1991 // *Nature*. – V.386. – P. 98-102.
59. **Mohamed M.A.A., Babiker I.S., Chen Z.M. et al.** The role of climate variability in the inter-annual variation of terrestrial net primary production (NPP) // *Science of the Total Environment*, 2004. – V. 332. – P. 123-137.
60. **Monteith J.L.** Climate and the efficiency of crop production in Britain // *Philosophical Transactions, Royal Society of London*, 1977. – V. 281. – P. 277-294.
61. **Nadelhoffer K.J. Aber J.D., Melillo J.M.** Fine roots, net primary production, and soil nitrogen availability: A new hypothesis // *Ecology*. – V. 66(4). – P. 1377-1390.
62. **Nemani R.R., Keeling C.D., Hashimoto H., et al.** Climate-driven increases in global terrestrial Net Primary Production from 1982 to 1999 // *Science*. – 2003. – Vol.300. – P. 1560-1563.
63. **Nikinmaa E.** Analyses of growth of Scots pine: matching structure with functions // *Acta Forestalia Fennica*. – 1992. – V. 235. – P. 1-68.
64. **Nilsson S., Shvidenko A., Jonas M. et al.** Uncertainties of a Regional Terrestrial Biota Full Carbon Account: A systems analysis // *Water, Air, & Soil Pollution: Focus*. – 2007. – V.7. – P. 425-441.
65. **Norby R.L., Long J.T.M., Hartz-Rubin J.S.** Nitrogen resorption in senescing tree leaves in a warmer, carbon-enriched atmosphere // *Plant and Soil*, 200. – V.224. – P. 15-29.
66. **Novak R.S. et al.** Functional responses of plants to elevated atmospheric CO₂ – do photosynthetic and productivity data from FACE experiments support early predictions? // *New Phytologist*. – 2004. – V. 163. – P. 253-280.
67. **Persson H.** Spatial distribution of fine root growth, mortality and decomposition in a young Scots pine stand in central Sweden // *Oikos*. – 1980a. – V.34. – P. 77-87
68. **Persson H.** Death and replacement of fine roots in a mature Scots pine stands // *Structure and function of northern coniferous forests – an ecosystem study*, ed. by T.Persson, 1980b. – *Ecol. Bull.* – V. 32. – P. 251-260.
69. **Raich J.W., Nadelhoffer K.J.** Belowground carbon allocation in forest ecosystems: global trends // *Ecology*. – 1989. – V.70. – P. 1346-1354.
70. **Rech P.B. et al.** Nitrogen limitation constrains sustainability of ecosystem response to CO₂ // *Nature*. – V. 440. – P. 922-925.
71. **Röser C., Montagnani L., Schulze E. et al.** Net CO₂ exchange rates in three different successional stages of „Dark Taiga“ of Central Siberia // *Tellus*. – 2002. – V.54B. – P. 642-654.
72. **Schneider M.K. et al.** The year of free-air CO₂ enrichment altered the mobilization of N from soil in *Lolium perenne* L. swards // *Global Change Biology*. – 2004. – V.10. – P. 1377-1388.
73. **Schulze E.D., Lloyd J., Kelliher E.V. et al.** Productivity of forests in the Euro Siberian boreal region and their potential to act as a carbon sink: A synthesis // *Global Change Biology*, 1999. – No 3. – P.703-722.
74. **Shvidenko A., Nilsson S.** Dynamics of Russian forests and the carbon budget and the carbon budget in 1961-1998: an assessment based on long-term forest inventory data. *Climatic Change*. – V. 50. – P. 5-37.
75. **Shvidenko A., Nilsson S.** A synthesis of the impact of Russian forests on the global carbon budget for 1961-1998 // *Tellus*. – 2003. – V. 55B. – P. 391-415.
76. **Shvidenko A., Schepschenko D., Nilsson S. et al.** Semi-empirical models for assessing biological productivity of Northern Eurasian forests // *Ecological Modelling*. – 2007. – Vol. 204. – P. 163-179.
77. **Sitch S. et al.** Evaluation of the terrestrial carbon cycle, future plant geography and climate-carbon cycle feedbacks using 5 DGVMs. *Global Change Biology* (in press).
78. **Slayback D.A., Pinzon J.E., Los S.O., Tucker C.J.** Northern hemisphere photosynthetic trends 1982-1999 // *Global Change Biology*. – 2003. – V.9. – P. 1-15.
79. **Turner D.P., Ritts W.D., Cohen W.B. et al.** Site-level evaluation of satellite-based global terrestrial gross primary production and net primary production monitoring // *Global Change Biology*, 2005. – V.11. – P. 666-684

80. **Vanninen P., Mäkelä A.** Fine roots biomass of Scots pine stands differing in age and soil fertility in southern Finland // *Tree Physiology*. – 1999. – V. 19. – P. 823-830.
81. **Vogt K.A., Crier C.C., Vogt D.J.** Production, turnover, and nutrient dynamics of above- and belowground detritus of world forests. *Advanced Ecological Research*. – 1986. –V.15. – P. 303-377.
82. **Vogt K.A., Vogt D.J., Palmiotto et al.** Review of root dynamics in forest ecosystems grouped by climate, climatic forest type and species // *Plant and Soil*. – 1996. – V. 187. –P. 159-219.
83. **Vogt K.A., Vogt D.J., Bloomfield J.** Analysis of some direct and indirect methods for estimating root biomass and production of forests at an ecosystem level // *Plant and soil*. – 1998. – V. 200. – P. 71-89.
84. **Xiao X.M. et al.** Modeling gross primary production of an evergreen needleleaf forest using MODIS and climate data // *Ecological Applications*. – 2005. – V. 15. – P. 954-969.