

УДК 630\*182.5+574.4 (476)

## МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДЕПОНИРОВАНИЯ УГЛЕРОДА ФИТОМАССЫ И НЕТТО-ПРОДУКТИВНОСТИ ЛЕСОВ (НА ПРИМЕРЕ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ)\*

© 2003 г. А. И. Уткин<sup>1,2</sup>, Д. Г. Замолодчиков<sup>2</sup>, А. А. Пряжников<sup>2</sup><sup>1</sup> Институт лесоведения РАН

143030 Успенское, Одинцовский р-н, Московская обл.

<sup>2</sup> Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН

117810 Москва, ГСП-7, Профсоюзная ул., 84/32.

Поступила в редакцию 18.07.2002 г.

Используя данные породной и возрастной структуры лесов Республики Беларусь, информацию о площадях и запасах насаждений лесного фонда республики, были определены пулы углерода по конверсионным отношениям запас углерода/запас стволовой древесины, т.е. *C/M-ratio* (размерность  $\text{т м}^{-3}$ ). Определения пулов углерода выполнены в двух вариантах: а) при распределении площадей и запасов по классам возраста насаждений; б) при аналогичном распределении по группам возраста насаждений. Пулы углерода послужили базой для расчетов депонирования углерода по разности запасов древесины (фитомассы, углерода) насаждений, являющимися средними для классов возраста или возрастных групп. Сходные полученные ранее конверсионные коэффициенты для чистой годичной продукции (NPP) в зависимости от запасов насаждений ( $\text{т м}^{-3} \text{год}^{-1}$ ) были базовыми для определения NPP лесообразующих пород. Альтернативная оценка NPP дана способом, комбинирующим материалы таблиц хода роста по изменению запасов и отпаду (в сумме 40–45% от NPP) и экспериментальные данные по опад (55–60% от NPP) в насаждениях различных пород. Для этого по классам возраста и группам возраста предварительно рассчитывали относительные от запасов величины годичного текущего прироста (изменения запасов) и годичного отпада, а по базе данных “Фитомасса и продуктивность лесных экосистем” – величины годичного опада. Суммарно эти три слагаемых характеризовали NPP в расчете на 1 га. При небольшой возрастной амплитуде насаждений Беларуси (в основном до 120–140 лет) и преобладании в лесном фонде средневозрастных насаждений, по всем вариантам сравнения получены близкие результаты для пулов углерода, его депонирования и NPP.

*Лесной фонд Республики Беларусь, фитомасса, пулы углерода, NPP, депонирование, отпад, опад.*

Инвентаризация углерода в лесном фонде России не проводилась раньше и не проводится сейчас. Тем не менее публикуемая через каждые 5 лет статистическая информация о площадях и древесных запасах отдельных лесообразующих пород, дифференцированных по группам возраста насаждений, после совмещения с имеющимися определениями на пробных площадях запасов фитомассы всех фракций позволила оценить пулы углерода в лесном фонде России. Эти оценки при некоторых расхождениях в размерах площадей покрытых лесом земель варьируют у разных авторов от  $38.6 \times 10^9 \text{ т С}$  до  $31 \times 10^9 \text{ т С}$  [5, 8, 12, 13, 14] и имеют тенденцию к сближению. Вместе с тем сообщается о расхождении пулов углерода, полученным по инвентаризационным данным и дистанционными методами [17].

\* Исследования поддерживались ФЦНТПР № 16 “Глобальные изменения природной среды и климата” и РФФИ (00-04-48036).

Пулы углерода – важный, но недостаточный компонент углеродного цикла. Для лесного фонда России они требуют детализации прежде всего в отношении накопления разных групп мертвых растительных остатков, специфичных по видам и темпам разложения. Для бюджета и баланса углерода лесных биомов, пожалуй, более значимыми по сравнению с пулами надо считать углеродные потоки. Прежде всего макропотоки (магистральные потоки), связанные с продуцированием фитомассы при фотосинтезе, а также взаимодействием особей и органов растений, т.е. продуцированием детритного пула, деструкцией мертвых растительных остатков или “гетеротрофным дыханием”. Как и для пулов углерода, для расчетов отдельных макропотоков желательно ориентироваться на базовую информацию, представленную в материалах государственных учетов лесного фонда (например, [6]), как наиболее прозрачную и легко сравнимую. Оценки пулов углерода, ко-

торые базировались на созданных Н.И.Базилевич картах биопродуктивности по небольшому числу реперных участков, признаются завышенными не менее чем на 40% и характеризуют не реальную, а потенциальную продуктивность для восстановленного по зонам растительного покрова [13].

Ориентация на данные государственной статистической отчетности по лесному фонду открывает возможности широкого привлечения для решения экологических задач больших пакетов нормативной информации лесотаксационного и лесоустроительного содержания. Последнее особенно актуально, если иметь в виду ограниченность данных, касающихся экспериментальных определений чистой первичной продукции (NPP) в лесных экосистемах России. К тому же более половины из этих экспериментальных оценок NPP было получено методом среднего модельного дерева. Такая методика занижает оценки NPP, поскольку и фитомасса, и годовая продукция рассчитываются по одному и тому же среднему дереву. Тогда как мода среднего дерева по NPP в ряду распределения стволов бывает несколько сдвинута вправо от таксационного среднего дерева, т.е. приходится на моду более крупной ступени толщины. Требуется отдельного обсуждения и вопрос о возможном расхождении результатов определения пулов углерода в лесах при использовании двух критериев дифференциации возрастной структуры насаждений: по классам возраста и по используемым в государственных учетах лесов группам возраста.

Цель настоящей статьи заключается в ее методической направленности. Ставится задача оценить возможность количественного описания некоторых потоков углерода в лесном фонде природно-территориальных комплексов, опираясь на материалы государственных учетов лесов и привлекая лесотаксационную и ориентированную на проблему углеродного цикла экологическую информацию. Крайне желательно при этом, чтобы анализировались материалы для крупного по площади района, леса которого были бы достаточно подробно охарактеризованы по составу и возрастной структуре насаждений, но в то же время не различались существенно по природным условиям. Сходный анализ для относительно небольших районов не дал полного ответа на поставленные вопросы [11].

## ОБЪЕКТ

Для решения поставленных задач удобным тест-объектом мы посчитали леса Республики Беларусь. Они располагаются компактно в одной зоне широколиственно-хвойных лесов, но в то же время им свойственна значительная дифференциация почвенного покрова и типов леса. Лесной

фонд устроен по единому разряду лесоустройства и обеспечен разнообразной лесотаксационной информацией [7].

*Лесной фонд Республики Беларусь.* На 01.01.1983 г. лесной фонд республики по площади составлял  $8242.0 \times 10^3$  га (из них лесные и покрытые лесом земли соответственно  $7502.8 \times 10^3$  га и  $7167.6 \times 10^3$  га), по запасам древесины  $823.90 \times 10^6$  м<sup>3</sup> [7]. За прошедшие годы произошли изменения: площади лесов и передавались в лесной фонд, и изымались из него, уменьшились площади некоторых пород, в частности дубрав и т.д. В результате чего лесной фонд республики на 01.01.1992 г. составлял  $8.24 \times 10^6$  га, из которых  $7.0 \times 10^6$  га приходилось на покрытые лесом земли [1]. По сводке ФАО [16], покрытая лесом площадь Беларуси равна  $7865 \times 10^3$  га, а вместе с приравненными к лесам землями (главным образом из числа не покрытых лесом) –  $8936 \times 10^3$  га.

В ведении Министерства лесного хозяйства БССР в 1983 г. находилось  $6423.9 \times 10^3$  га площади лесного фонда, не считая  $83.5 \times 10^3$  га, переданных в долгосрочное пользование. Покрытая лесом площадь составляла  $5727.3 \times 10^3$  га, запасы древесины  $718.93 \times 10^6$  м<sup>3</sup> (соответственно 80 и 87% от общереспубликанских показателей). Леса, находящиеся в ведении Минлесхоза РБ, наиболее полно обеспечены информацией инвентаризационного плана. Именно они и привлекаются нами для обсуждения методических вопросов (табл. 1). По площади преобладают насаждения сосны (59.2%), березы (15.5%), ели (9.8%), ольхи черной (7.9%) и дуба (3.9%). Сходный характер имеет и распределение запасов по тем же породам (соответственно 56.2%, 14.4, 13.0, 8.3 и 4.0%). Для насаждений всех пород на долю среднеполнотных (полнота 0.6–0.8) приходится 76.7% покрытой лесом площади, на долю лесов I, II и III классов бонитета 87.1%. Низкобонитетные насаждения (V–Vб классы бонитета) свойственны болотным соснякам, березнякам и ельникам (соответственно 5.3%, 1.1 и 2.0% от общей площади насаждений этих пород).

Базовыми в обсуждаемой статье методике расчетов депонирования углерода показателями служили распределения площадей и запасов насаждений по классам возраста и группам возраста. На рис. 1 приведены суммарные для всех древесных пород показатели. Распределения для отдельных пород приведены в работе [7]. Наиболее старые по возрасту леса (хвойные и дуб – старше 140 лет, мягколиственные породы с 70 лет) в республике занимают площадь в  $45.7 \times 10^3$  га с запасами  $10.26 \times 10^6$  м<sup>3</sup>, из которых соответственно  $39.6 \times 10^3$  га и  $8.97 \times 10^6$  м<sup>3</sup> приходится на насаждения VII класса возраста (рис. 1, А). Из числа наиболее

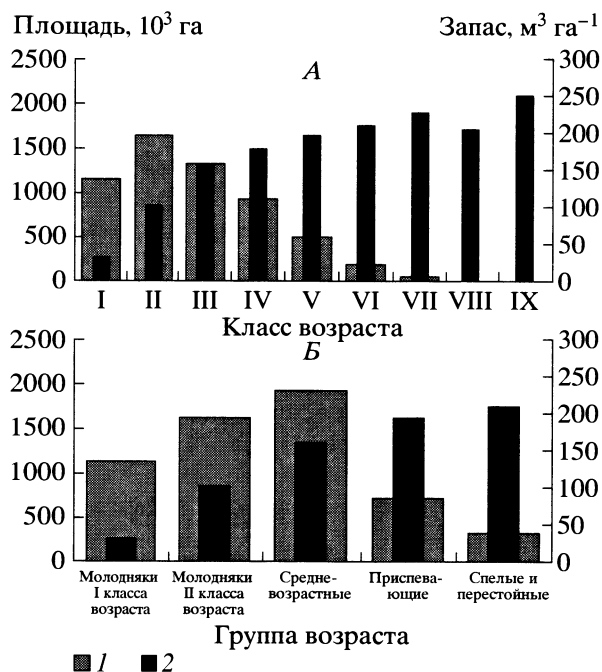


Рис. 1. Распределение площадей (1) и средних запасов древесины насаждений (2) по классам возраста (А) и группам возраста (Б).

старых (IX класс возраста) встречаются только насаждения дуба, березы и ольхи черной.

При принятых в Республике Беларусь возрастах главной рубки древостоев: хвойные 81–100 лет, дуб высокоствольный 101–120, береза 61–70, ольха

черная 51–60, осина 41–50 лет [7], группа перестойных насаждений начинает формироваться для указанных пород соответственно с возраста 101, 121, 81, 71 и 61 год. Небольшой возрастной спектр в группе перестойных насаждений обеспечивает последним сохранение темпов накопления запасов. К тому же перестойные насаждения более всего представлены на охраняемых территориях (заповедники и др.). Так, средний запас для спелых и перестойных насаждений всех пород равен 208 м<sup>3</sup> га<sup>-1</sup> против 195 м<sup>3</sup> га<sup>-1</sup> в возрастной группе приспевающих насаждений. Площадь молодых насаждений (возрастные группы молодняков двух классов и средневозрастных) в 4.5 раза превосходят площадь насаждений остальных возрастных групп (рис. 1, Б). Такая возрастная структура благоприятствует углерододепонирующей функции местных лесов, но негативно отражается на их сырьевой функции.

## МЕТОДИКА

Расчеты всех показателей, связанных с углеродным циклом, осуществлялись в двух вариантах распределения площадей и запасов насаждений каждой лесообразующей породы: по классам возраста и по группам возраста (рис. 1).

*Определение запасов углерода.* Включает две счетные операции: 1) конверсию общих объемных запасов насаждений из объемных единиц в единицы массы (фитомассы); 2) конверсию запасов фитомассы в запасы углерода, при этом принималось, что единице фитомассы древесных

Таблица 1. Площади, объемные запасы древесины и запасы углерода в фитомассе древостоев Республики Беларусь (расчет запасов углерода проведен для двух типов деления исходной информации: по классам возраста и по группам возраста)

Порода	Площадь, 10 <sup>3</sup> га	Запас древесины		Запас углерода			
		10 <sup>6</sup> м <sup>3</sup>	м <sup>3</sup> га <sup>-1</sup>	по классам возраста		по группам возраста	
				10 <sup>6</sup> т С	т С га <sup>-1</sup>	10 <sup>6</sup> т С	т С га <sup>-1</sup>
Сосна	3388.3	404.00	119.2	141.33	41.7	151.96	44.8
Ель	563.6	93.18	165.3	37.58	66.7	38.82	68.9
Прочие хвойные	0.5	0.02	40.0	0.01	17.6	0.01	15.6
Дуб	223.0	29.01	130.1	16.90	75.8	14.41	64.6
Прочие твердолиственные	23.7	2.50	105.5	1.20	50.4	1.29	54.2
Береза	887.5	103.80	117.0	39.78	44.8	40.66	45.8
Осина	133.9	21.05	157.2	8.52	63.6	7.43	55.5
Ольха черная	453.6	59.97	132.2	20.33	44.8	20.39	45.0
Прочие мягколиственные	53.2	5.40	101.5	1.82	34.2	1.82	34.2
Для всех пород вместе	5727.3	718.93	125.5	267.47	46.7	276.79	48.3

фракций соответствует 0.5, а листья 0.45 единицы массы углерода.

Наиболее ответственным этапом расчетов является, на наш взгляд, выбор конверсионных коэффициентов, представляющих собой либо отношение общей (или фракционной) фитомассы к запасу стволовой древесины ( $Ph/M$ -ratio), либо такое же отношение фитомассы, выраженной в единицах массы углерода ( $C/M$ -ratio). В обоих случаях размерность конверсионных коэффициентов  $t\ m^{-3}$ ,  $kg\ m^{-3}$ . Используемый в настоящей работе набор коэффициентов  $Ph/M$  и  $C/M$  рассчитан по материалам компьютерной базы данных "Биологическая продуктивность лесных экосистем" [9]. Применение  $Ph/M$  и  $C/M$  в конкретных расчетах для регионов может быть двояким: как среднеарифметическая величина, что предпочтительнее при распределении исходной информации о насаждениях по группам возраста; в форме уравнений регрессии, связывающих  $Ph/M$  и  $C/M$  с возрастом насаждений [4]; второй вариант более удобен при распределении площадей и запасов насаждений по классам возраста. Поскольку в материалах статистической отчетности лесонасаждения характеризуются только тремя показателями: древесная порода – возрастная группа – запас древесины, то нет смысла усложнять регрессии для  $C/M$  другими показателями (класс бонитета, полнота), обычно коррелирующими с запасами. На рис. 2 в качестве примера показаны величины  $C/M$  для насаждений с преобладанием сосны, различающихся двумя формами возрастного распределения площадей и запасов.

Первоначально в расчетах нами использовались среднестатистические величины  $Ph/M$  и  $C/M$  на уровне отдельных лесообразующих пород и возрастных групп насаждений [5, 14]. В последнее время коэффициенты  $C/M$  для основных лесообразующих пород были дифференцированы для трех ландшафтных подзон России: северной, средней и южной [12]. Для лесов Республики Беларусь взяты отношения  $C/M$ , полученные для южной ландшафтной подзоны России. При введении данных о площадях и запасах насаждений отдельных пород в разрезе классов или групп возраста и значений  $C/M$  для тех же классов и групп обеспечивается расчет запасов углерода.

*Определение депонирования углерода по динамике изменения запасов насаждений.* Анализ изменения запасов в возрастных группах насаждений – основной подход в изучении динамики продукционного потенциала лесного фонда по материалам государственных учетов лесов. Методика пригодна и для исследований углеродного цикла лесов. Процедура расчетов годичного депонирования углерода (фитомассы) подробно рассмотрена в работе [5]. Сначала последовательным попарным сравнением насаждений со-

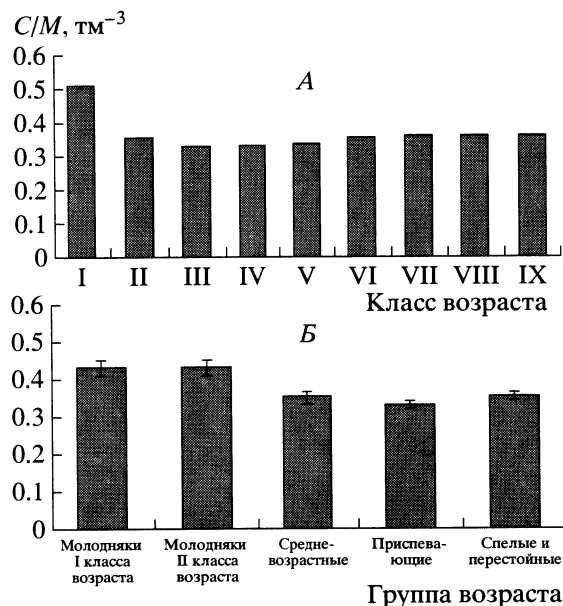
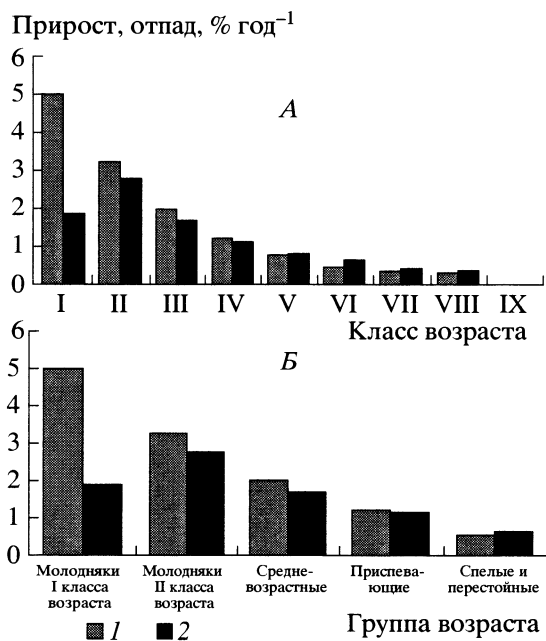


Рис. 2. Конверсионные коэффициенты  $C/M$  для насаждений с преобладанием сосны по классам возраста (А) и по группам возраста (Б). Для  $C/M$  по группам возраста приведены средние значения и показаны их стандартные ошибки.

седних классов или групп возраста определяется разность средних запасов насаждений. Делением полученной разности на временной интервал возрастной группы или продолжительность класса возраста получают величины годичного изменения средних запасов насаждений. Произведение полученных величин на площадь конкретных возрастных групп или классов возраста дает оценку годичного изменения запаса насаждения данной группы или класса. Далее проводится конверсия полученных значений в фитомассу или углерод по тем же отношениям  $C/M$ , которые используются и при расчетах пула углерода.

Величина годичного депонирования углерода характеризует за межпериодизационный период исключительно динамику наличных запасов углерода (фитомассы) и включение в лесной фонд за тот же период покрытых лесом земель других лесфондодержателей. Запасы и площади изъятых из лесного фонда земель, как и перешедшие в другую категорию земель (вырубки, гари и т.д.), к расчетам изменений запасов не привлекаются.

*Определение годичного депонирования по таблицам хода роста.* Таблицы хода роста нормальных насаждений можно считать главным информационным звеном динамической лесной таксации. Их можно гораздо шире, чем сейчас, привлекать для решения многих лесоэкологических задач, в частности, для расчетов потоков углерода и создания углеродного бюджета. Текущее изменение запаса в принципе то же самое,



**Рис. 3.** Отношение годовичного прироста (1) и годовичного отпада (2) к запасу древесины в насаждениях с преобладанием сосны с распределением запасов по классам возраста (А) и группам возраста (Б).

что и депонирование, но лишь выраженное в единицах объема стволовой древесины.

На первом этапе по таблицам хода роста вычисляется в абсолютных единицах текущее изменение запаса для отдельных классов возраста, а после соответствующего их суммирования, определяемого возрастом главной рубки, и для возрастных групп. После этого абсолютные величины изменения запасов преобразуются в относительные единицы – коэффициенты долевого представительства ( $q$  в долях от 1.0). Характер изменения зависимых от возраста величин коэффициентов  $q$  для изменения запаса и аналогичных величин отпада для сосновых насаждений показан на рис. 3. В варианте распределения запасов по классам возраста величина  $q$  отпада начинает превышать  $q$  изменения запаса в возрасте спелости (с V класса возраста), как и в варианте распределения запасов по группам возраста – возрастная группа спелых и перестойных насаждений.

После умножения древесных запасов отдельных классов или групп возраста на произведение  $q(C/M)$  и отнесения полученного результата к числу лет между двумя сроками, определяется величина годовичного депонирования углерода по материалам таблиц хода роста. В случае симметричного распределения площадей насаждений по классам бонитета можно пользоваться величинами  $q$  для срединного класса. В противном случае требуется использование коэффициентов  $q$  для таблиц хода роста насаждений нескольких клас-

сов бонитета. Наши расчеты депонирования проведены по местным таблицам хода роста для всех лесообразующих пород [7].

*Определение по таблицам хода роста потока углерода, выражаемого отпадом.* Процедура расчетов и получения результатов полностью соответствует только что описанному определению депонирования. Исключение касается лишь выражения отпада как потока углерода с отрицательным знаком.

*Определение потока углерода, выражаемого отпадом.* Отпад в лесных экосистемах более масштабный поток по сравнению с отпадом, если не считать чрезвычайных в природе ситуаций (ветровалы, пожары, нападение насекомых-вредителей и др.). Вместе с тем отпад в меньшей мере поддается нормированию и количественному описанию из-за разнообразной динамики, сезонных флуктуаций и т.д. Результаты стационарных исследований обмена органического вещества в системе растительность–почва в литературе немногочисленны. Трудности связаны не только с отпадом корней, но и фракций крон: а) отмершие ветви часть времени сохраняются в кронах живых деревьев, разрушаясь там у различных пород с разной скоростью, и задерживаются с опадением на поверхность почвы; б) у вечнозеленых хвойных пород каждый год отмирает лишь часть хвои, продолжительность жизни которой имеет географическую изменчивость.

По имеющейся в базе данных [9] информации, были рассчитаны отношения опада главных фракций к запасам фитомассы тех же фракций (табл. 2). Для лиственных пород принималось равенство фитомассы листьев и их опада. Фактически же величина опада должна быть больше, так как фитомасса определяется обычно в конце вегетационного периода, когда часть листвы уже опала или съедена филофагами. Кроме того, бывает не учтен отпад некоторых, пусть и маломасштабных, фракций (генеративные органы и др.). Количественное определение опада корней по массе остается во всем мире дискуссионным из-за неопределенности размеров прироста тонких корней. Приводимые в табл. 2 нормативы опада корней имеют предварительный характер. Целесообразно пополнение всей информации, содержащейся в табл. 2. Возможно, что удастся создать специальную базу данных.

*Определение чистой первичной продукции (NPP).* Выполнено в двух вариантах: а) комбинированным способом, с использованием сведений изменения запасов и отпада из таблиц хода роста и данных табл. 2; б) с использованием системы конверсионных коэффициентов, выражающих величину надземной годичной продукции (ANPP) фракций в зависимости от запасов древостоев [3]. Система отношений ANPP/M создана в результате

**Таблица 2.** Отношение годовичного опада фракций фитомассы к запасу данной фракции

Порода	Ветви		Хвоя, листва		Корни	
	среднее ± SE	n	среднее ± SE	n	среднее ± SE	n
Сосна	0.0692 ± 0.0112	49	0.3559 ± 0.0375	62	0.0530 ± 0.0116	13
Ель	0.0532 ± 0.0049	73	0.1944 ± 0.0106	80	0.0275 ± 0.0027	30
Прочие хвойные	0.0424 ± 0.0073	7	0.1829 ± 0.0295	11	0.0309	1
Твердолиственные	0.0220 ± 0.0032	12	1		0.0156 ± 0.0036	3
Береза	0.0418 ± 0.0103	24	1		0.0741 ± 0.0201	10
Осина	0.0223 ± 0.0170	7	1		0.0059	1
Прочие мягколиственные	0.0882 ± 0.0492	4	1		0.0184 ± 0.0004	2

Примечание. Пределы вариации средних значений оцениваются стандартными ошибками (SE).

**Таблица 3.** Годичное депонирование углерода в фитомассе древостоев Республики Беларусь для двух способов расчета и для двух типов возрастного распределения запасов

Порода	Годичное депонирование углерода, 10 <sup>3</sup> т С год <sup>-1</sup>			
	расчет по изменению запасов		расчет по таблицам хода роста	
	для классов возраста	для групп возраста	для классов возраста	для групп возраста
Сосна	2966.8	3008.5	3427.7	3774.6
Ель	899.3	940.0	1017.2	1134.4
Прочие хвойные	0.8	0.4	0.4	0.4
Дуб	269.5	299.5	293.9	484.7
Прочие твердолиственные	17.7	40.6	14.6	51.9
Береза	1190.7	1017.3	1190.0	1080.2
Осина	272.5	155.0	288.8	188.1
Ольха черная	696.0	669.8	366.7	366.4
Прочие мягколиственные	45.3	39.8	30.4	33.2
Для всех пород вместе	6358.5	6170.9	6629.7	7113.8

аппроксимации по материалам базы данных “Биологическая продуктивность лесных экосистем” [9].

В комбинированном варианте NPP выражается суммой трех показателей: 1) годовичным депонированием по изменению запасов всех фракций (включает и подземные), 2) годовичным отпадом, 3) годовичным опадом. Расчеты ведутся для отдельных древесных пород в вариантах распределения запасов по классам возраста и по группам возраста. В альтернативном варианте сначала рассчитываются значения ANPP, т.е. суммы продукции стволов, ветвей и листвы (листья, хвоя). Затем расчетно определяется подземная NPP по отношениям NPP подземной к NPP надземной. В сумме обе полученные величины дают полную NPP.

## ОБСУЖДЕНИЕ И РЕЗУЛЬТАТЫ

*Депонирование углерода.* В работе, выполненной для отдельных регионов России [11], где лесной фонд был представлен, как правило, хвойными насаждениями с большой возрастной амплитудой, депонирование при распределении запасов по классам возраста чаще превосходило депонирование в варианте распределения по группам возраста. Для Республики Беларусь прямой расчет изменения запасов углерода подтвердил выявленную ранее тенденцию, хотя общая для всех пород оценка депонирования по группам возраста была ниже только на 3% (табл. 3). Характерно, что занижение оценки имеет место в основном в

**Таблица 4.** Потоки углерода в годичном отпаде и годичном опаде насаждений Республики Беларусь при распределении запасов по классам возраста и по группам возраста,  $10^3$  т С год<sup>-1</sup>

Порода	Углерод годичного отпада при расчете		Углерод годичного опада при расчете	
	по классам возраста	по группам возраста	по классам возраста	по группам возраста
Сосна	2585.3	2925.5	5887.6	7067.1
Ель	414.4	464.1	1357.6	1295.4
Прочие хвойные	0.1	0.1	0.2	0.2
Дуб	148.4	126.7	421.0	426.7
Прочие твердолиственные	11.9	11.4	29.9	39.6
Береза	582.2	548.5	1688.6	1918.3
Осина	139.4	101.0	612.4	192.8
Ольха черная	201.8	206.1	573.9	551.7
Прочие мягколиственные	19.2	19.9	54.0	47.6
Для всех пород вместе	4102.8	4403.4	10625.2	11539.6

насаждениях мягколиственных пород, для сосны и ели обнаруживаются близкие значения, у дуба – завышение на 11%.

Привлечение материалов таблиц хода роста и двух типов возрастного распределения запасов дают оценки с обратным соотношением: депонирование по группам возраста насаждений в целом на 7% больше, чем по классам возраста, и обьязано наиболее распространенным в республике сосне (+ 10%) и ели (+ 11.5%), а также дубу (+ 65%). Тогда как при распределении запасов насаждений по классам возраста береза депонирует углерод на 10% больше, а осина даже в полтора раза больше.

При использовании распределения запасов по классам возраста итоговые оценки депонирования по методике с привлечением информации из таблиц хода роста получились лишь на 4% больше по сравнению с традиционным способом расчета по изменению наличных запасов. В случае же распределения запасов по группам возраста насаждений вариант расчетов по таблицам хода роста завьшает результаты на 15%.

В целом можно считать, что для условий Республики Беларусь при обоих способах расчетов и двух разных типов выражения возрастной структуры насаждений оценки депонирования получаются довольно близкими. Следовательно, в пределах более или менее однородных по природным условиям лесорастительных областей информационную для расчетов депонирования базу, содержащуюся в справочниках лесного фонда, можно считать вполне корректной и согласующейся с таблицами хода роста насаждений. Мы считаем, что эту информацию, за неимением другой целесообразно использовать не только для

определения пулов углерода, но и его депонирования, а также оценки некоторых других потоков.

*Потоки углерода, связанные с отпадом и опадом.* Отмечены те же тенденции, что и для депонирования углерода. Разделение общих запасов насаждений на меньшее число групп возраста по сравнению с делением на классы возраста дает завьшение на 7% для отпада и на 9% для опада (табл. 4). Другими словами, получаются вполне приемлемые конечные результаты для такого рода исследований. Для вариантов распределения запасов по классам возраста и по группам возраста депонирование в сумме с отпадом характеризуется одинаковыми величинами – около  $10.5 \times 10^6$  т С год<sup>-1</sup>, которые в свою очередь близки к оценкам опада ( $10.6 \times 10^6$  и  $11.5 \times 10^6$  т С год<sup>-1</sup>). Превышение на 10% опада над отпадом вместе с депонированием связано, скорее всего, с методическими причинами, проявляющимися при большом типологическом разнообразии господствующих лесных формаций республики – сосняков и березняков. Суммарное для насаждений всех пород Беларуси депонирование в 1.55 раза превосходит отпад при расчетах по классам возраста и в 1.39 раза при использовании распределений запасов по группам возраста. Другими словами, сохраняется одинаковый характер отношений между приростом и отпадом. Абсолютное значение обоих потоков в большей мере обусловлены распределением насаждений по классам и группам возраста.

*Потоки углерода в NPP.* Расчеты с использованием материалов таблиц хода роста и конверсионных коэффициентов для продукции [3], дают хорошо сходимые результаты (табл. 5). В варианте с классами возраста базирующаяся на табли-

**Таблица 5.** Содержание углерода в чистой первичной продукции (NPP) древостоев Белоруссии для двух способов расчета (как сумма депонирования, опада и отпада и по конверсионным коэффициентам продукции) и двух типов деления исходной информации (по классам возраста и по группам возраста),  $10^3$  т С год<sup>-1</sup>

Порода	Углерод чистой первичной продукции, при двух способах расчета			
	по сумме депонирования, отпада и опада		по конверсионным коэффициентам для продукции	
	по классам возраста	по группам возраста	по классам возраста	по группам возраста
Сосна	11901	13767	12212	12556
Ель	2789	2894	2196	2303
Прочие хвойные	1	1	1	1
Дуб	863	1038	813	910
Прочие твердолиственные	56	103	68	76
Береза	3461	3547	4412	4165
Осина	1041	482	659	521
Ольха черная	1142	1124	1533	1576
Прочие мягколиственные	104	101	102	107
Для всех пород вместе	21358	23057	21997	22214

цах хода роста методика занижает результаты на 3% против методики конверсионных коэффициентов. При распределении же запасов по группам возраста, напротив, получается завышение оценок на 4%. Для двух способов расчетов NPP и двух вариантов распределения запасов наибольшие различия выявлены для комбинированной методики (т.е. по таблицам хода роста): оценка при распределении запасов по группам возраста на 8% больше, чем в случае привлечения запасов по классам возраста насаждений. Конверсионные коэффициенты из работы [3] дают одинаковые в обоих случаях конечные результаты: расхождения на уровне 1%. По сравнению же с комбинированным подходом полученные по конверсионным коэффициентам оценки оказываются на 3–4% ниже.

Таким образом, в пределах компактного однородного по естественно-историческим условиям лесного фонда имеющаяся статистическая информация и лесотаксационные нормативы могут с успехом использоваться для оценки не только пулов углерода, но и некоторых его потоков. Хотелось бы надеяться, что выявленные для Республики Беларусь закономерности и тенденции будут проявляться и в лесном фонде России. Пусть и с меньшей точностью оценок из-за накопления больших запасов спелых и перестойных насаждений, на долю которых в России приходится  $43.8 \times 10^9$  м<sup>3</sup> или 54% от общего запаса в  $81.3 \times 10^9$  м<sup>3</sup> [6]. Желательно повторить выполненную для Бе-

ларуси работу в нескольких районах России, выделенных в качестве эталонных.

*Пул углерода в фитомассе лесов Республики Беларусь.* Хотя оценки запасов углерода и не являлись целью настоящей статьи, имеет смысл справочно привести имеющуюся в литературе информацию для Республики Беларусь. Сотрудниками Международного института прикладного системного анализа (IIASA) по местным белорусским конверсионным коэффициентам для покрытой лесом площади республики в размере  $7027.7 \times 10^3$  га запас углерода рассчитан в  $374.70 \times 10^6$  т С [13]. Эти оценки больше приводимых нами запасов углерода (табл. 1) на 38% при превышении площади лесов лишь на 23%. В материалах ФАО [16] для лесов и приравненных к ним земель (площадь  $8936 \times 10^3$  га) Республики Беларусь запас углерода в древесных фракциях, включая мертвую древесину, но без ливы и растений нижних ярусов, определен в размере  $380.01 \times 10^6$  т С, в том числе  $316.47 \times 10^6$  т С в надземной части – “выше пня” (above stump woody biomass). К собственно лесам отнесена площадь, равная  $7865 \times 10^3$  га, с пулом углерода древесины в надземной части  $315.86 \times 10^6$  т С. Наконец, в работе Т.Н. Белоусовой с соавт. [2], по опубликованным нами конверсионным коэффициентам для отдельных пород [10], для лесного фонда Минлесхоза РБ (площадь не приводится) определена фитомасса в размере  $542.61 \times 10^6$  т, что эквивалентно  $\approx 271 \times 10^6$  т С, т.е. соответствует нашей оценке (табл. 1).



**Выводы. 1.** Опыт использования на примере лесов Республики Беларусь материалов учета лесного фонда, таблиц хода роста и конверсионных коэффициентов для перевода запаса стволовой древесины в углерод и углеродный эквивалент годичной чистой первичной продукции позволяет считать рассмотренную в статье методику вполне удовлетворительной и пригодной для изучения некоторых принципиально важных статей углеродного бюджета.

**2.** Методику следует рекомендовать и для аналогичных исследований в лесах Российской Федерации, опираясь на материалы государственных учетов лесного фонда. Это позволит в дополнение к имеющимся оценкам пулов углерода получить величины углеродных потоков, важные для функциональной характеристики лесов России в глобальной системе бореальных лесов как в пределах крупных природно-территориальных комплексов [12], так и для более мелких экорегионов. Одновременно открываются возможности и для получения первых оценок секвестра атмосферного углерода лесами в пределах территории российской Евразии.

**3.** Желательно на нескольких региональных полигонах России определить пулы и потоки углерода, во-первых, по предлагаемой методике, используя возрастные распределения площадей и запасов насаждений по материалам лесоустройства и государственных учетов лесов, во-вторых, получить часть таких оценок дистанционными методами.

**4.** Тормозящим фактором определения потоков углерода в лесном фонде России по-прежнему остается слабая изученность биопродуктивности лесов некоторых регионов. В частности, это касается северо-востока России, где совсем отсутствуют сведения о вкладе в углеродный цикл лесов из каменной березы, а также недостаток сведений о биологической продуктивности пихтовых и кедровых лесов Сибири.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Багинский В.Ф. Состояние лесных экосистем Беларуси // Ботаника. Сб. науч. тр. Минск: Технология, 1997. Вып. 32. С. 127–136.
2. Белоусова Т.Н., Демидова О.А., Равино А.В. Методические подходы к экономической оценке ассимиляционного потенциала лесных насаждений // Сб. науч. тр. / Ин-та леса Нац. акад. Беларусь. Гомель: Ин-т леса НАНБ, 2001. Вып. 52. С. 230–241.
3. 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.

4. Замолодчиков Д.Г., Уткин А.И., Коровин Г.Н. Определение запасов углерода по зависимым от возраста насаждений конверсионно-объемным коэффициентам // Лесоведение. 1998. № 3. С. 84–93.
5. Исаев А.С., Коровин Г.Н., Сухих В.И., Титов С.П., Уткин А.И., Голуб А.А., Замолодчиков Д.Г., Прыжников А.А. Экологические проблемы поглощения углекислого газа посредством лесовосстановления и лесоразведения в России. М.: Центр экологической политики, 1995. 156 с.
6. Лесной фонд России (по состоянию на 01.01.1998 г.). Справочник. М.: Рослесхоз, ВНИИЦлесресурс, 1999. 505 с.
7. Нормативные материалы для таксации лесов Белорусской ССР / Подготовлены Багинским В.Ф. и др. М.: Госкомлес СССР, Центр. бюро научн.-техн. информации, 1984. 308 с.
8. Углерод в экосистемах лесов и болот России / Под ред. Алексеева В.А., Берлиси Р.А. Красноярск: Ин-т леса СО РАН, Северо-Вост. лесн. эксперимент. станция Лесной службы США, 1994. 170 с.
9. Уткин А.И., Гульбе Я.И., Гульбе Т.А., Ермолова Л.С. Биологическая продуктивность лесных экосистем. Компьютерная база данных. М.: Ин-т лесоведения РАН, ЦЭПЛ РАН, 1994.
10. Уткин А.И., Ермолова Л.С., Замолодчиков Д.Г. Конверсионные коэффициенты для определения площади листовой поверхности насаждений основных лесообразующих пород России // Лесоведение. 1997. № 3. С. 36–46.
11. Уткин А.И., Замолодчиков Д.Г., Сухих В.И. Влияние возрастного критерия лесных насаждений на точность региональных оценок запасов и депонирования углерода в фитомассе лесов // Экология. 1999. № 4. С. 243–250.
12. Уткин А.И., Замолодчиков Д.Г., Честных О.В., Коровин Г.Н., Зукерт Н.В. Леса России как резервуар органического углерода биосферы // Лесоведение. 2001. № 5. С. 8–23.
13. Швиденко А.З., Нильссон С., Столбовой В.С., Глюк М., Шенащенко Д.Г., Рожков В.А. Опыт агрегированной оценки основных показателей биопродукционного процесса и углеродного бюджета наземных экосистем России. 1. Запасы растительной органической массы // Экология. 2000. № 6. С. 403–410.
14. Isaev A., Korovin G., Zamolodchikov D., Utkin A., Pryaznikov A. Carbon stock and deposition in phytomass of the Russian forests // Water, Air and Soil Pollution. 1995. V. 82. № 1–2. P. 247–256.
15. Lakida P., Nilsson S., Shvidenko A. Estimation of forest phytomass for selected countries of the former European USSR. IIASA Laxenburg Austria. Working paper, WP-95-79. 1995. 33 p.
16. Liski J., Kauppi P. Carbon cycle and biomass // Forest Resources of Europe, CIS, North America, Australia, Japan and New Zeland (Industrialized/Boreal Countries): United Nations – Economic Commission for Europe / Food and Agricultural Organization Contributions to the Global Forest Resources Assessment 2000. N. Y.: United Nations, 2000. P. 155–171.

17. *Myneni R.B., Dong J., Tucker C.J., Kaufmann R.K., Kauppi P.E., Liski J., Zhou L., Alexeyev V., Hughes M.K.*  
A large carbon sink in the woody biomass of Northern

forests // Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. 2001. V. 98. № 26. P. 14.784–14.789.

## **Methods for Determination of Carbon Accumulation in Phytomass and Net Productivity of Forests (by the Example of Stands in Republic of Belarus)**

**A. I. Utkin, D. G. Zamolodchikov, and A. A. Pryazhnikov**

Using distributions of areas and stocks of the stands (Republic of Belarus) both by age classes and age groups, carbon pools in phytomass of forest-forming species were determined. The calculations of the carbon pools by age classes and age groups based on the ratio carbon reserves/stocks of stem wood have produced similar results. The amounts of the carbon accumulation calculated by the changes in stocks in age classes and age groups of stands and using conversion coefficients did not differ essentially. The similar calculations were made using local tables of stand productivity. Annual dieback, annual fall off, and annual net production (NPP) were determined and expressed in carbon units. The use of tables of stand productivity proved to be also useful. Estimates of NPP differ insignificantly from those obtained using conversion coefficients.