

УДК 547.45+630*162.5(470)

ДИНАМИКА ПУЛОВ И ПОТОКОВ УГЛЕРОДА НА ТЕРРИТОРИИ ЛЕСНОГО ФОНДА РОССИИ

© 2005 г. Д. Г. Замолодчиков*, А. И. Уткин**, Г. Н. Коровин*, О. В. Честных***

* Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН
117810 Москва, ул. Профсоюзная, 84/32

** Институт лесоведения РАН

143030 Успенское, Одинцовский р-н, Московская обл.

*** Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

119992 Москва, Воробьевы горы

Поступила в редакцию 26.12.2003 г.

На федеральном уровне рассмотрено состояние и результаты изучения углеродного цикла лесов на территории лесного фонда России (общая площадь 1172.3×10^6 га). За 1966–1998 гг. охарактеризованы динамика площадей разных категорий земель лесного фонда, возрастная структура насаждений, оценены пул и депонирование углерода в фитомассе, пул органического углерода почв. За 1990–2001 гг. показана погодичная динамика хозяйственной деятельности в лесной отрасли и масштабы пирогенной трансформации лесного покрова. Определены потоки углерода, связанные с лесопользованием, и пожарная эмиссия.

Ключевые слова: лесной фонд России, фитомасса, пулы и потоки углерода, углеродный цикл, задачи исследований.

Киотский протокол подчеркивает важность исследований углеродного цикла в бореальных лесах и их вклада во взаимодействия биосферы и атмосферы на крупнорегиональном и глобальном уровнях. Во многих странах определены не только пулы углерода, но и секвестр CO_2 из атмосферы лесным покровом. Сложнее оценить секвестр $\text{C}-\text{CO}_2$ в многолесных странах, прежде всего в России и Канаде. Леса занимают здесь огромные площади, отличаясь неодинаковой освоенностью и природными условиями, большим разнообразием состава лесообразующих пород. В Канаде инвентаризация углерода (биомассы) лесов осуществляется уже более 20 лет (Вопног, 1997), продолжает совершенствоваться бюджет углерода (Kurz, Apps, 1999), уточняются нормативы, программа исследований и инвентаризации лесов (Climate change..., 2002). В России целенаправленная инвентаризация биомассы (углерода) лесов никогда не проводилась и не проводится сейчас, хотя с 2000 г. в сводках ФАО (Forest resources..., 2000) древесные ресурсы и их эксплуатация характеризуются древесной биомассой и ее углеродным эквивалентом. Фрагментарно информация публикуется и в национальных сообщениях (Второе национальное сообщение..., 1998; Третье национальное сообщение..., 2002; Национальный доклад..., 2002).

Цель настоящей работы – обсудить состояние исследований углеродного цикла лесного фонда России.

СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ

В экологии углеродный цикл объединяется с биологическим круговоротом азота и зольных элементов, с потоками энергии по трофическим уровням в составе широкой проблемы “первичная биологическая продуктивность экосистем”. Крупномасштабное ее изучение наблюдалось в 1964–1974 гг., в период Международной биологической программы (МБП), а результаты неоднократно вовлекались в научный оборот. Значительную известность приобрели созданные Н.И. Базилевич рукописные базы данных по запасам фитомассы и мортмассы, а также их монографическое обобщение (Базилевич, 1993). Ныне считается (Швиденко и др., 2000), что представленные в этой монографии типовые значения запасов фитомассы лесов завышены почти вдвое. Информация МБП лежит в основе и других обобщений, включая базу данных “Биологическая продуктивность лесных экосистем” (Уткин и др., 1994), крупные сводки по фитомассе лесов Северной Евразии (Усольцев, 2001).

В то же время материалам МБП свойствен ряд недостатков: 1) неравномерность охвата древесных лесообразующих пород, особенно на северо-востоке азиатской части России, а также кустарниковых формаций; 2) нерепрезентативность информации о насаждениях, различающихся составом, возрастом, полнотой и другими показателями; 3) недостаточность таксационных описаний

для части пробных площадей; 4) очень большая доля (~60% общего числа пробных площадей) результатов с использованием методики среднего модельного дерева; 5) отсутствие эталонных для России участков лесных экосистем с детальными оценками фитомассы и продукции, лесной подстилки, древесных остатков; 6) преобладание (в среднем десятикратное) оценок фитомассы древостоев над оценками чистой первичной продукции (*NPP*).

Обычно материалы МБП используются для вычисления коэффициентов конверсии запаса древесины и других показателей в фитомассу: $k = Ph/M$, где Ph – фитомасса (общая или по фракциям), т га⁻¹ абсолютно сухого вещества; M – запас стволовой древесины, м³ га⁻¹. Поскольку $M = G(HF)$, а $Ph = \rho G(HF)$, где G – сумма площадей поперечных сечений стволов, м² га⁻¹; HF – видовая высота (H – средняя высота, м; F – видовое число), меняющаяся с возрастом древостоев; ρ – базисная плотность древесины и коры, т м⁻³, следовательно, $k \approx \rho$. Но данное условие реализуется в России только для стволов основных лесообразующих пород (Полубояринов, 1976; Полубояринов, Сорокин, 2000), для ветвей и корней имеются лишь единичные оценки ρ . Корректным и более простым надо признать использование в расчетах коэффициента $k = Ph/M$, поскольку k соответствует величине ρ , интегрирующей и разные фракции фитомассы деревьев, и примесь иных пород в составе древостоев. Другими словами, $k \approx \rho_{\text{ит}}$, т.е. интегрированной для всех фракций фитомассы базисной плотности. Величины k можно рассчитать и для отдельных фракций фитомассы.

Материалы ГУЛФ России содержат различную исходную информацию, но банки данных ГУЛФ на электронных носителях по отдельным лесхозам при существующей системе оплаты информационных услуг для научных учреждений недоступны. Коэффициенты $k = Ph/M$ рассчитывались для отдельных лесообразующих пород по возрастным группам (Isaev et al., 1995) и с учетом подзон и лесорастительных провинций (Уткин и др., 2001), а также в аппроксимированной форме от возраста насаждений (Замолодчиков и др., 1998).

ОЦЕНКА ПУЛОВ УГЛЕРОДА В ЛЕСНОМ ФОНДЕ РОССИИ

Региональные и национальные оценки некоторых параметров углеродного бюджета лесов России в литературе публикуются с начала 90-х годов прошедшего столетия с использованием различных методик, включая картографические.

Оценки пула углерода в фитомассе лесов приводятся как для лесного фонда, так и для лесного биома, включают и разные категории земель, и

только покрытые лесом (табл. 1). Полученные в период 1993–1995 гг. величины плотности углерода варьировали более чем вдвое: от 24 (Углерод в экосистемах..., 1994) до 62, 53 и 47 т С га⁻¹ (Kolchugina, Vinson, 1993a, б; Kolchugina et al., 1993). В 1996–2001 гг. использование отношений Ph/M и привлечение материалов ГУЛФ сблизило оценки. При этом общий пул углерода в фитомассе лесов России варьирует от 33.1 (Shvidenko, Nilsson, 1998) до 37.3×10^9 т С (Швиденко и др., 2000); оценка по данным настоящей работы (35.9×10^9 т С) близка к середине этого размаха. Последняя официальная оценка пула углерода лесов ниже: 28×10^9 т С для площади 646×10^6 га и 34.4×10^9 т С для лесного фонда в целом (Национальный доклад..., 2002).

Пул углерода в древесной биомассе лесов России оценен и дистанционным зондированием – 24.39×10^9 т С для площади 642.2×10^6 га при плотности 38.0 т С га⁻¹ (Muneri et al., 2001). Наша оценка для покрытых лесом земель (774.2×10^6 га) равна 33.7×10^9 т С, средняя плотность углерода 43.5 т С га⁻¹. Различие между величинами составляет 30%, причем 17% приходится на различие в оценках площадей лесов, что не совсем понятно, и 13% – на значения плотности углерода. Расхождения в плотностях углерода обусловлены разной структурой учитываемой фитомассы. В работах R.V. Muneri et al. (2001), "Forest resources..." (2000) в расчеты включали все древесные части живых растений, сухостой и валеж. В наших расчетах учтены и недревесные фракции фитомассы. По нашим данным, средняя для лесного фонда РФ плотность углерода только для одревесневших частей древостоев составляет 38.2 т С га⁻¹, в работе Muneri et al. (2001) она близка к 38.0 т С га⁻¹. Вообще же в последнее время пул углерода фитомассы лесов России разными авторами оценивается достаточно сходными величинами плотности – 30 – 35 т С га⁻¹.

В России органический углерод почв оценивается почвоведомы обычно в слое мощностью 1 м. Для этого используются крупномасштабные почвенные карты, классификации типов почв разной степени детальности, запасы углерода для кадастровых участков типологических контуров почв. Лишь в работе О.В. Честных с соавт. (1999) для этих целей служат сведения о структуре земель ГУЛФ и специально созданные базы данных для лесных почв. Имеющиеся оценки органического углерода почв приведены в табл. 2.

Более ранние оценки плотности пула углерода в почве лесов России также варьируют значительно: от 119 (Углерод в экосистемах..., 1994) до 224.7 т га⁻¹ (Kolchugina, Vinson, 1993a, б; Kolchugina et al., 1993) без какой-либо сходимости оценок для пула (см. табл. 2). Наиболее поздние национальные оценки равны 246×10^9 (Nilsson et al., 2000) и

Таблица 1. Сравнение различных оценок пула углерода в фитомассе для земель лесного фонда и лесного биома России или бывшего СССР по данным разных авторов

Территориальный объект, год инвентаризации	Метод*	Площадь		Углерод в фитомассе лесов		Источник
		10 ⁶ га	10 ⁶ т	т га ⁻¹		
Лесной биом быв. СССР (1988 г.)	I	1420	87690	61.8		T.P. Kolchugina, T.S. Vinson (1993a)
То же	I	1306	68677	52.6		T.P. Kolchugina, T.S. Vinson (1993b)
»	I	1306	61773	47.3		T.P. Kolchugina et al. (1993)
Лесной фонд (1988 г.)	II	1183	41163	34.8		A.C. Исаев и др. (1993)
То же	III	1183	28750	24.3		Углерод в экосистемах... (1994)
»	IV	1183	38632	32.7		A.C. Исаев и др. (1995)
»	Va	1183	33300	28.1		P. Lakida et al. (1997), D. Shepashenko et al. (1998)
Покрытые лесом земли (1993 г.)	V	764	32088	42.0		A.З. Швиденко, С. Нильсон (1997)
Лесной фонд (1993 г.)	IV	1181	34400	29.1		A.C. Исаев, Г.Н. Коровин (1999)
То же	Va	1181	33056	28.0		A.Z. Shvidenko, S. Nillson (1998)
Лесные земли (1993 г.)	Vб	1151	37288	32.4		A.З. Швиденко и др. (2000)
Сомкнутые леса всех природных зон (1993 г.)	Vб	764	32862	43.0		S. Nillson et al. (2000)
Леса и приравненные к ним земли (1993 г.)	VI	886	39630	44.7**		Forest resources... (2000)
Лесной фонд и леса, не входящие в лесной фонд (1998 г.)	VII	1179	35625	30.2***		A.И. Уткин и др. (2001)
То же	VII	1179	35874	30.4		Настоящее сообщение
Лесные земли (1998 г.)	VIII	882	33273	37.7		То же

* I – база данных по фитомассе Н.И. Базилевич и карты контуров биомов и крупных экосистем; II – отношения Ph/M по базе данных по фитомассе Н.И. Базилевич и материалы ГУЛФ; III – оригинальные отношения Ph/M и материалы ГУЛФ; IV – отношения Ph/M по базе данных А.И. Уткина и др. (1994) и материалы ГУЛФ; Va – коэффициенты конверсии от возраста, класса бонитета и полноты насаждений и материалы ГУЛФ; Vб – коэффициенты $R_{fj} = f(A, SI, RS)$ и площади земель с использованием ГИС-технологий; VI – оригинальные отношения Ph/M для надземной и подземной древесины хвойных и лиственных насаждений и общие древесные запасы тех же двух групп древесных пород; VII – отношения Ph/M , дифференцированные для подзон и лесорастительных провинций, и материалы ГУЛФ; VIII – отношения Ph/M , предложенные группой ФАО, и материалы ГУЛФ.

** Оценка только для древесных частей деревьев, кустарников, включая пригодную для заготовки мертвую древесину.

*** Фитомасса всех частей деревьев, нижних ярусов растительности.

257×10^9 т С (настоящая работа) – разница составляет 11×10^9 т С. Причины различий оценок пула органического углерода почв многообразны, в связи с чем пул углерода почв – существенный источник неопределенности углеродного бюджета лесов России.

ТЕКУЩЕЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Применение к материалам ГУЛФ конверсионных коэффициентов Ph/M для пород-лесообразователей по группам возраста их насаждений с учетом природных зон позволило удовлетворительно оценить пул углерода фитомассы лесного фонда РФ. Базовыми здесь остаются регулярно

публикуемые материалы учетов лесных и земельных ресурсов на нескольких уровнях: РФ, федеральные округа, экономические районы, субъекты федерации. За отдельные годы приводятся сведения о гибели лесов от огня и других причин, о размерах рубок, лесовосстановлении и т.д. ГУЛФ и государственные земельные учеты в России выполняются разными ведомствами, поэтому сведения о площади земель в лесном фонде России могут не совпадать. ГУЛФ объединяет сведения о площадях лесов, других категорий земель (не покрытых лесом и нелесных), запасах древесины для ведомств-лесофондодержателей. Интегральная на уровне субъектов федерации информация основана на различающихся по качественным критериям материалах инвентариза-

Таблица 2. Сравнение различных оценок пула органического углерода почв лесного фонда и лесного биома России и бывшего СССР (по данным разных авторов)

Территориальный объект	Площадь		Органический углерод в почвах		Источник
	10 ⁶ га	10 ⁶ т	т га ⁻¹	т га ⁻¹	
Лесной биом быв. СССР	1420	319 100	224.7		Т.Р. Kolchugina, Т.С. Vinson (1993a, 1993b), Т.Р. Kolchugina et al. (1993)
Лесной фонд (1988 г.)	1183	140 294	118.6		Углерод в экосистемах... (1994)
Почвы лесного биома	1383	235 000	169.9		Д.С. Орлов и др. (1996)
Лесные почвы	1317	266 700	202.6		В.А. Рожков и др. (1997)
Покрытые лесом земли (1993 г.)	764	138 310	181.2		A.Z. Shvidenko, S. Nilsson (1998)
Лесной фонд (1993 г.)	1181	183 409	155.3		О.В. Честных и др. (1999)
Лесной биом	1189	246 500	207.4		S. Nilsson et al. (2000)
Лесной фонд (1998 г.)	1179	256 845	217.9		Настоящая работа

ции лесов отдельных предприятий, но на конечном этапе все результаты объединяются в общий пакет материалов ГУЛФ единого формата, которые публикуются в виде справочников, издаваемых с пятилетней периодичностью (Лесной фонд СССР, 1968–1990; Лесной фонд России, 1995, 1999). Наиболее полно охарактеризованы леса Федерального агентства лесного хозяйства Минприроды России, представленные 94% общей площади земель лесного фонда. К наиболее важным для углеродного баланса показателям ГУЛФ относятся: а) площади разных категорий земель лесного фонда, б) распределение площадей и запасов насаждений по лесообразующим породам и далее, в) по группам возраста, г) средние запасы насаждений, рассчитанные по этим материалам. В состав абсолютно сухой фитомассы мы включали все живые части (фракции) деревьев: древесину и кору стволов, ветви и годичные побеги, корни, листья, хвою. Для конверсии фитомассы в углерод использовали коэффициент 0.5 для древесных фракций и 0.45 – для листьев, хвои, трав, мхов и лишайников.

При расчетах потоков углерода, связанных с рубками леса в России, пользовались: а) опубликованными недавно статистическими материалами о рубках леса по главному и промежуточному пользованию и прочим рубкам (Основные направления..., 2002; Государственный доклад..., 2002, 2003); б) сведениями о годовых отпусках (заготовках) леса по лесообразующим породам (доля различных пород в конце 80-х годов в среднем составляла: сосна – 0.289, ель, пихта, кедр – 0.335, лиственница – 0.069, дуб, бук – 0.006, прочие твердолиственные – 0.004, береза – 0.199, прочие мягколиственные – 0.098); в) для порубочных остатков фракционными P_h/M -отношениями для спелых и перестойных насаждений тех же пород.

Прямые потери углерода фитомассы за счет лесных пожаров, а также послепожарный отпад и прочих причин гибели древостоев рассчитывали на основе: а) доли площадей погибших насаждений в составе всей лесной площади (Основные направления..., 2002); б) средних для России запасов фитомассы по фракциям в насаждениях основных лесообразующих пород (Уткин и др., 2001).

Пул органического углерода почв, включая лесную подстилку, первоначально определяли по специальной базе данных, которая сейчас существенно переработана (Честных, Замолодчиков, 2004).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Принципиально важные для поставленной задачи показатели лесов России по материалам семи ГУЛФ и полученные на их основе оценки пулов и потоков углерода приведены в табл. 3. Обращает на себя внимание сохранение общей площади лесного фонда за 30-летний период на фоне увеличения площадей под лесной растительностью и уменьшения не покрытых лесом земель. В 1966–1978 гг. еще сохранялись невозобновившиеся вырубki от лесозаготовок предвоенных и военных лет. Нарушение хода динамики лесных земель по данным ГУЛФ 1993 г. связано с исключением северных редколесий из категории “леса” и переводом в “естественные редины”. Наибольшая неупорядоченность динамики площадей свойственна нелесным землям, главным образом за счет болот.

Распределение площади лесов по группам возраста насаждений свидетельствует об улучшении (с точки зрения увеличения поглощения углерода) возрастной структуры древостоев. Площади молодяков и средневозрастных насаждений, которые и определяют в основном сток углерода в

Таблица 3. Выборочные данные о динамике за 1968–1998 гг. площадей земель лесного фонда России, запасов древесины (Лесной фонд СССР, 1966–1991; Лесной фонд России, 1995, 1999), пулы и некоторые потоки углерода (расчеты авторов)

Показатели	Год учета						
	1966	1973	1978	1983	1988	1993	1998
Площади земель разных категорий, 10 ⁶ га							
покрытые лесом	705.6	729.7	749.5	766.6	771.1	763.5	774.2
не покрытые лесом	157.4	132.4	122.8	113.9	113	123	107.8
нелесные	298.9	299.3	313.9	307.2	298.5	294.4	296.6
всего	1161.9	1161.4	1186.2	1187.7	1182.6	1180.9	1178.6
Площади покрытых лесом земель по группам возраста насаждений, 10 ⁶ га							
молодняки	76.8	100.9	114.0	123.4	129.5	133.9	137.4
средневозрастные	109.9	121.9	137.5	159.2	178.5	201.4	208.8
приспевающие	72.2	69.5	70.6	76.7	77.3	75.0	79.5
спелые и перестойные	446.8	437.5	427.4	407.3	385.8	353.2	348.4
всего	705.6	729.7	749.5	766.6	771.0	763.5	774.2
Запасы древесины, 10 ⁹ м ³							
леса бывш. Рослесхоза	73.5	74.0	74.7	75.4	74.7	73.0	74.3
прочие леса	3.5	4.7	6.0	6.5	7.0	7.7	7.6
всего	77.0	78.7	80.7	81.9	81.7	80.7	81.9
Пул углерода в фитомассе растительного покрова земель разных категорий, 10 ⁹ т С							
покрытые лесом	33.80	34.09	34.43	34.68	34.35	33.42	33.70
не покрытые лесом	0.91	0.82	0.79	0.76	0.76	0.88	0.79
нелесные	1.45	1.48	1.53	1.48	1.42	1.35	1.38
всего	36.16	36.39	36.74	36.92	36.54	35.64	35.87
Пул углерода в фитомассе лесов по группам возраста насаждений, 10 ⁹ т С							
молодняки	1.2	1.6	1.8	1.9	2.0	2.1	2.1
средневозрастные	4.9	5.4	6.0	6.7	7.4	8.2	8.5
приспевающие	3.9	3.8	3.8	4.1	4.2	4.0	4.3
спелые и перестойные	23.8	23.3	22.9	21.9	20.8	19.1	18.8
всего	33.8	34.1	34.4	34.7	34.4	33.4	33.7
Годичное депонирование углерода в фитомас- се по землям разных категорий, 10 ⁶ т С год ⁻¹							
покрытые лесом	150.9	180.6	199.2	214.0	222.1	231.5	238.4
не покрытые лесом	34.4	22.3	20.2	18.6	17.5	18.1	13.9
нелесные	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
всего	185.3	202.9	219.4	232.6	239.7	249.6	252.4
Годичное депонирование углерода в фитомас- се лесов разных групп возраста, 10 ⁶ т С год ⁻¹							
молодняки	94.2	121.4	135.0	142.7	146.2	150.5	154.0
средневозрастные	39.2	42.6	47.0	52.9	57.6	63.2	65.4
приспевающие	17.5	16.6	17.3	18.4	18.3	17.8	19.0
спелые и перестойные	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
всего	150.9	180.6	199.2	214.0	222.1	231.5	238.4
Пул углерода почв земель разных категорий, 10 ⁹ т С							
покрытые лесом	110.1	113.8	117.1	120.3	121.7	121.1	123.2
не покрытые лесом	23.4	20.3	19.0	17.8	17.6	19.4	17.3
нелесные	122.3	125.5	129.1	124.9	120.0	112.9	116.3
всего	255.8	259.6	265.2	263.0	259.4	253.5	256.8

лесном фонде, к 1998 г. увеличились почти вдвое и сравнялись с площадью спелых и перестойных древостоев со свойственными им углеродконсервирующими функциями (Уткин, 1995). Доля спелых и перестойных насаждений в лесном фонде России по-прежнему велика: на 01.01.1998 г. – 43% от покрытой лесом площади и 54% от общих запасов древесины при среднем запасе $133 \text{ м}^3 \text{ га}^{-1}$ (Лесной фонд России, 1995, 1999). Перестойные (старовозрастные) леса, преимущественно лиственничные, сосредоточены в северной и средней тайге Восточной Сибири и Дальнего Востока. Чаще всего их омоложение происходит в результате пожаров. Уменьшение площади спелых и перестойных насаждений в 60–70-е годы на 20–22%, в 80-е годы – на 10–15% обусловлено рубками и отчасти пожарами. Запасы древесины с 1978 г. оставались неизменными – в пределах $81 \times 10^9 \text{ м}^3$, пулы углерода в фитомассе тоже почти не менялись, сохраняясь на уровне $\sim 36.5 \times 10^9 \text{ т С}$, в том числе $\sim 34 \times 10^9 \text{ т С}$ для покрытой лесом площади.

Депонирование углерода определяли из материалов ГУЛФ по разности наличных запасов древесины двух ближайших возрастных групп и последующей конверсии разницы через $k = Ph/M$ (или $k = C/M$) в фитомассу (углерод) всех фракций насаждений. Для разных категорий земель лесного фонда депонирование углерода повторяет распределение пула углерода фитомассы. Оно удовлетворительно определяется от молодняков до приспевающих насаждений, в спелых и перестойных признается находящимся в стационарном (климаксовом) состоянии: годичный текущий прирост их примерно равен отпаду.

Наиболее высокие нормы депонирования углерода в молодняках и средневозрастных насаждениях – принципиальный факт. Отсюда более перспективно не облесение ранее безлесных земель согласно Киотскому протоколу, сколько выравнивание возрастной структуры насаждений в лесном фонде в ее наиболее освоенных районах европейской части России.

Масштабы связанной с лесопользованием хозяйственной деятельности в России за 90-е годы прошедшего столетия показаны в табл. 4. Расчетная лесосека в этот период определена приблизительно в $500 \times 10^6 \text{ м}^3$, в том числе более $300 \times 10^6 \text{ м}^3$ по хвойному хозяйству. В 80-е годы освоение расчетной лесосеки достигало 49–54% (Лесопользование в Российской Федерации..., 1996), в 90-е годы оно уменьшилось до 30–20%, в 1997 и 1998 гг. – даже до 19 и 17%, но в 1999–2001 гг. увеличилось до 22–23% (Леса России, 2002; Основные показатели..., 2002). Площадь рубок главного пользования с середины 90-х годов сократилась в два-три раза и составляет сейчас $\sim 0.5 \times 10^6 \text{ га}$. То же касается и заготовок древесины по главному пользованию. Возросли годовые объемы незаконно

заготовленной древесины – с $390\text{--}520 \times 10^3 \text{ м}^3$ в 1996–1998 гг. до $720 \times 10^3 \text{ м}^3$ в 1999–2000 гг. и $940 \times 10^3 \text{ м}^3$ в 2001 г. (Леса России, 2002). По официальным данным, в среднем около 1.0% ликвидной древесины оставляется на лесосеках, не считая корней, пней и порубочных остатков. В действительности же, по обследованиям мест рубок, на лесосеках бросается в среднем $30 \text{ м}^3 \text{ га}^{-1}$ ликвида, на долю недорубов приходится $\sim 2.5\%$ от размеров вывозки ликвида.

В насаждениях разных пород соотношение вывозимой древесины и оставляемых на лесосеках всех видов древесных остатков в среднем примерно одинаково. Поэтому потоки углерода, связанные с рубками леса (лесопользованием), можно разделить на две примерно равные части: а) ствольную древесину, поступающую на обработку и переработку в виде круглого леса, включая дрова; б) разного рода остатки от лесозаготовок, пополняющие детритный пул углерода на вырубках. В 1990–1992 гг. сумма обоих потоков составляла $95\text{--}119 \times 10^6 \text{ т С год}^{-1}$, в 1993–1998 гг. понизилась с 74 до $47 \times 10^6 \text{ т С год}^{-1}$ (табл. 4), равняясь в среднем за десятилетие $65 \times 10^6 \text{ т С год}^{-1}$ (Сухих, Уткин, 2004). Для второй половины 90-х годов по отношению к размерам депонирования углерода суммарный вклад лесопользования оценивается в 22%.

На активно охраняемой территории лесного фонда в период 1990–2002 гг. ежегодно регистрировалось от 18 до 32 тыс. пожаров (Основные направления..., 2002), в среднем около 22 тыс. в год (табл. 5). При 268 тыс. пожаров за весь период на долю лесной площади пришлось $11.61 \times 10^6 \text{ га}$ (средняя площадь пожара $\sim 43 \text{ га}$). Наиболее крупные площади пожаров свойственны районам Сибири и Дальнего Востока. Пожарная эмиссия от обгорания крон, т.е. без учета послепожарного разложения древесины и других остатков, на активно охраняемой площади лесного фонда в среднем за 90-е годы оценена в $0.9 \times 10^6 \text{ т С год}^{-1}$, а в расчете на один пожар $\sim 39 \text{ т С}$. Послепожарный отпад выводит из пула живой фитомассы в среднем $10.2 \times 10^6 \text{ т С год}^{-1}$, а в сумме с обгоранием крон потери фитомассы составляют $11.1 \times 10^6 \text{ т С год}^{-1}$. Считая условно, что такие же масштабы свойственны и не охраняемой части лесного фонда, общая пирогенная эмиссия углерода может достигать $\sim 20 \text{ т С год}^{-1}$.

За период 1961–1998 гг. площадь искусственных насаждений в лесном фонде России возросла с $2 \times 10^6 \text{ га}$ до $15 \times 10^6 \text{ га}$, т.е. ежегодно в среднем создавалось $\sim 400 \times 10^3 \text{ га}$ лесных культур. Сейчас трудно ожидать активизации в России работ по искусственному разведению лесов, ориентированных на поглощение атмосферного CO_2 . Эту проблему можно решить с минимальными экономическими потерями за счет мягколиственных

Таблица 4. Рубки леса (Российский статистический ежегодник, 2000; Природные ресурсы... 2001; Основные показатели..., 2002; Сухих, Уткин, 2004) и связанные с ними потоки углерода (расчеты авторов) в период 1990–2001 гг.

Показатель	Год учета											
	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001
Площадь лесопользования, 10^3 га год ⁻¹												
Главное пользование	1810.0	1608.4	1415.5	1074	814.6	761.6	612.1	623.5	573.5	706.8	758.0	822.0
Рубки ухода в молодняках	–	–	911.9	877.8	839.9	815.4	701.9	611.3	583.5	606.6	624.0	621.1
Объем лесопользования, 10^6 м ³ год ⁻¹ ликвидной древесины												
Рубки главного пользования	283.2	251.7	227.5	174.2	130.4	134.1	110.5	103.4	96.8	121.6	130.0	127.0
Прочие рубки	18.9	18.1	14.7	9.4	6.9	7.2	6.5	8.2	9.9	12.4	13.4	13.8
Итого рубки главного пользования и прочие	302.1	269.8	242.2	183.6	137.3	141.3	117.0	111.6	106.7	134.0	143.4	140.8
Промежуточное пользование	27.5	24.7	22.8	20.1	20.7	22.6	22.7	23.1	22.2	22.9	18.7	18.2
Заготовлено древесины (по отпуску)	329.6	294.5	265.0	203.7	158.0	163.9	139.7	134.7	128.9	156.9	162.1	159.0
Оставлено на лесосеках главной рубки (невывозка)	2.5	2.6	2.4	2.9	1.5	1.1	0.7	0.6	0.4	–	0.8	0.7
Оставлено на лесосеках (расчет)*	54.4	48.6	43.6	33.0	24.7	25.4	21.1	20.1	19.2	24.1	25.8	25.3
Вывезено заготовленной древесины	275.2	245.9	221.5	170.7	133.3	128.5	118.6	114.6	109.7	132.8	136.3	133.7
Оставлено недорубов	5.0	6.2	4.9	4.9	4.7	2.5	2.0	2.9	–	–	–	–
Оставлено на гниение от рубок ухода в молодняках	–	–	6.0	6.2	6.0	6.2	5.8	4.8	4.6	5.3	5.5	5.6
Потоки углерода, связанные с лесопользованием, 10^6 т С год ⁻¹												
Главное пользование	102.2	90.9	82.1	62.9	47.1	48.4	39.9	37.3	34.9	43.9	46.9	45.8
Прочие рубки	6.8	6.5	5.3	3.4	2.5	2.6	2.3	3.0	3.6	4.5	4.8	5.0
Промежуточное пользование	9.9	8.9	8.2	7.3	7.5	8.2	8.2	8.3	8.0	8.3	6.8	6.6
Все виды лесопользования	119.0	106.3	95.7	73.5	57.0	59.2	50.4	48.6	46.5	56.6	58.5	57.4
Вывоз с древесиной	66.7	59.6	53.7	41.4	32.3	31.1	28.7	27.8	26.6	32.2	33.0	32.4
Оставлено древесины на вырубках	13.2	11.8	10.6	8.0	6.0	6.2	5.1	4.9	4.7	5.8	6.3	6.1
Порубочные остатки на вырубках (пни, корни)	23.9	21.3	19.2	14.8	11.4	11.9	10.1	9.8	9.3	11.4	11.7	11.5
Порубочные остатки на вырубках (ветви, листва)	15.3	13.6	12.3	9.4	7.3	7.6	6.5	6.2	6.0	7.3	7.5	7.4
Всего оставлено на вырубках	52.3	46.7	42.0	32.2	24.7	25.6	21.7	20.9	20.0	24.5	25.5	25.0
Фитомасса недорубов	1.8	2.2	1.8	1.8	1.7	0.9	0.7	1.0	–	–	–	–
Оставлено при рубках ухода	–	–	2.7	2.7	2.7	2.7	2.6	2.1	2.0	2.3	2.4	2.5

Примечание. Прочерк означает отсутствие данных; * – по разности заготовленной древесины (по отпуску) и вывезенной.

Таблица 5. Пожары, вспышки насекомых-вредителей и болезней (Российский статистический ежегодник, 2000; Природные ресурсы..., 2001; Основные показатели..., 2002) и связанные с ними потоки углерода (расчеты авторов) в период 1990–2001 гг. в охраняемых лесах МПР РФ

Показатель	Год учета												
	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	
Лесные пожары на активно охраняемой территории лесного фонда (по данным статучета)													
Число, 10^3 случаев	18.3	18.0	21.0	17.0	18.5	24.3	28.3	27.6	24.1	31.6	18.8	20.9	
Лесная площадь, пройденная огнем, 10^6 га	1.33	0.61	0.52	0.73	0.52	0.35	1.81	0.67	2.28	0.68	1.24	0.87	
Погибло насаждений, 10^3 га год ⁻¹													
от пожаров	–	–	313	132	225	53	291	228	246	268	637	131	
от насекомых и болезней	–	–	21	14	26	80	198	5	8	10	26	23	
Потоки углерода, связанные с гибелью насаждений, 10^6 т С год ⁻¹													
Эмиссия от обгорания кроны при верховых пожарах	–	–	1.12	0.47	0.81	0.19	1.05	0.82	0.88	0.96	2.29	0.47	
Послепожарный отпад	–	–	14.69	6.19	10.56	2.49	13.65	10.70	11.54	12.58	29.89	6.15	
Отпад при гибели от насекомых и болезней	–	–	0.91	0.60	1.12	3.45	8.55	0.22	0.35	0.43	1.12	0.99	

Примечание. Прочерк означает отсутствие данных.

насаждений (березняков, сероольшаников), которые хорошо возобновляются, в том числе и на брошенных сельскохозяйственных угодьях (Уткин и др., 2002). Сейчас площадь мягколиственных насаждений в лесном фонде России равна 122×10^6 га, из них половина приходится на молодняки и средневозрастные древостои (Леса России, 2002).

Пулы углерода (особенно фитомассы), определенные разными авторами, имеют удовлетворительную сходимость. Оценки же потоков углерода, интегрированные на лесной фонд, малочисленны и не охватывают всего разнообразия процессов в системе атмосфера – растительность – почва – гидросфера. В наименьшей степени исследованы на региональном уровне потоки между пулами фитомассы и детрита. Потоки углерода, связанные с рубками, лесными пожарами и нападениями насекомых, часто относят к залповым эмиссиям того же календарного года, игнорируя последующие деструктивные процессы древесины и других растительных остатков. Остановимся на некоторых потоках углерода и их оценках во взаимосвязи с пулами. Пул детрита для покрытых лесом земель варьирует по оценкам разных авторов от 32.4×10^9 (Углерод в экосистемах..., 1994) и 30.4×10^9 (Kolchugina et al., 1993a) до 19.5×10^9 т С (Nilsson et al., 2000) при пуле углерода крупных древесных остатков соответственно 17.6 , 18.3 и 8.0×10^9 т С. Запасы лесной подстилки оценены в 14.8×10^9 (Углерод в экосистемах...,

1994) и 12.2×10^9 т С (Kolchugina et al., 1993a), стабильного гумуса почвы – 214×10^9 т С (Kolchugina et al., 1993a).

Наиважнейшей статьей бюджета углерода могла бы стать *NPP*, но ее определение для лесного фонда России сдерживается ограниченностью исходной информации и трудностями ее адаптации к материалам ГУЛФ. Для лесного фонда бывшего СССР величина *NPP* определена на основе ГУЛФ в 4360×10^6 т С год⁻¹ (Kolchugina, Vinson, 1993b). Для России оценки варьируют от 5614×10^6 т С год⁻¹ до 1707×10^6 т С год⁻¹, в том числе 320×10^6 т С за счет корней (Nilsson et al., 2000; Швиденко и др., 2001). Нами (Замолотчиков, Уткин, 2000) для основных лесобразующих пород (площадь 630×10^9 га, или 82.5% от общей) *NPP* определена по конверсионным коэффициентам в $1800 \pm 500 \times 10^6$ т С год⁻¹. По разности между *NPP* и суммой годового отпада и опада для лесного фонда страны оценивается альтернативная величина годового депонирования углерода. Данные о годовом отпаде в лесном фонде РФ малочисленны и отличаются большим разбросом – от 7 до 339×10^6 т С год⁻¹; то же касается и годового опада: 526 и 2269×10^6 т С год⁻¹.

Депонирование по изменению объемных запасов древесины лесного фонда России определено нами в 626×10^6 м³ год⁻¹, что в 1.5 раза меньше аналогичной оценки А.З. Швиденко и С. Нильссона (Shvidenko, Nilsson, 1998). Среднегодовое депонирование углерода нами рассчитано в 252×10^6 т С год⁻¹,

другими авторами в 1.7–1.9 раза больше – $430\text{--}470 \times 10^6 \text{ т С год}^{-1}$ (Forest resources..., 2000; Kolchugina, Vinson, 1995). Официальные оценки депонирования лесов России в среднем за 90-е годы, напротив, в 1.5–2.0 раза меньше наших: $81\text{--}163 \times 10^6 \text{ т С год}^{-1}$ (Третье национальное сообщение..., 2002) и $161 \times 10^6 \text{ т С год}^{-1}$ (Национальный доклад..., 2002). Считается (данные ВНИИЦлесресурс), что официальная методика примерно вдвое занижает поглотительный потенциал С–CO₂ российских лесов.

Наши оценки запасов углерода в заготовленной древесине для 1988 и 1993 гг. составляют $88 \times 10^6 \text{ т С год}^{-1}$ и $81 \times 10^6 \text{ т С год}^{-1}$ соответственно. Такие же величины ($88 \times 10^6 \text{ т С год}^{-1}$ и $82 \times 10^6 \text{ т С год}^{-1}$) приводятся для 90-х годов сотрудниками Международного института системного анализа (Shvidenko, Nilsson, 1998; Nilsson et al., 2000). Потоки углерода, связанные с рубками леса, в России приходится учитывать, руководствуясь преимущественно объемами отпуска леса (Сухих, Уткин, 2004). Площади ежегодных рубок леса применимы лишь для лесозаготовок сплошными лесосеками.

Статистику лесопользования, выраженную объемами древесины, несложно совместить с соответствующими потоками углерода, хотя и здесь корректно не решается вопрос количественных различий в понятиях “объем рубки” и “объем заготовки” (последний нередко подменяется “объемом вывозки” с включением части продукции от заготовки предыдущего года). Слабейшее звено в определении потоков углерода, связанных с рубками леса, – оценка бросаемой на лесосеках древесины, не относящейся к порубочным остаткам. Последние можно учесть по отпуску древесины и конверсионным коэффициентам фитомассы (углерода) фракций.

Статистика лесных пожаров включает число пожаров и пройденные ими площади на лесных землях и на всех категориях земель лесного фонда. Запасы древесины на гарях определяются только при очередных инвентаризациях или при отводе сплошных санитарных рубок. Поэтому имеются лишь отдельные оценки пирогенных потоков углерода в лесном фонде России: для 90-х годов – приблизительно $20 \times 10^6 \text{ т С год}^{-1}$, из них $11 \times 10^6 \text{ т С год}^{-1}$ на активно охраняемой территории, в том числе 8% приходится на выгорание массы крон (см. настоящую работу), для 80-х – начала 90-х годов – соответственно $16.38 \times 10^6 \text{ т С год}^{-1}$ и $24.44 \times 10^6 \text{ т С год}^{-1}$, из которых 55–60% приходится на пожарные эмиссии (включая выгорание напочвенного покрова и фитодетрита), остальная часть на разложение послепожарного отпада (Исаев и др., 1985). Другие оценки вдвое больше – $58 \times 10^6 \text{ т С год}^{-1}$ (Shvidenko, Nilsson, 1998).

Наши оценки депонирования, пирогенной эмиссии и изъятия углерода с заготовленной древесины дают следующую годовую величину нетто-стока (1990–1999 гг.): $251 - (30 + 86) = 135 \times 10^6 \text{ т С год}^{-1}$. Согласно “Третьему национальному сообщению...” (2002), за период 1990–1999 гг. лишь два года (1990 и 1999 гг.) были с эмиссиями по углероду: $38.5 \times 10^6 \text{ т С год}^{-1}$ и $7.5 \times 10^6 \text{ т С год}^{-1}$. За вычетом этих лет нетто-сток углерода в лесах России составил $40.1 \times 10^6 \text{ т С год}^{-1}$, в расчете на все десятилетие – $30.8 \times 10^6 \text{ т С год}^{-1}$. По другой методике расчета из той же публикации нетто-сток определен в $26.9 \times 10^6 \text{ т С год}^{-1}$, т.е. почти столько же, как и по разности депонирования с эмиссиями от рубок леса и лесными пожарами: $123 - (85 + 8) = 30 \times 10^6 \text{ т С год}^{-1}$. Но для 1999 г. нетто-сток определен почти вдвое больше – $57 \times 10^6 \text{ т С год}^{-1}$ (Национальный доклад..., 2002).

Расхождение в 2.5–4.5 раза наших и официальных величин годового нетто-стока углерода обусловлено, скорее всего, различием методов определения депонирования. Процедуры расчетов нетто-стока углерода на территории лесного фонда России нуждаются в специальном обсуждении и согласовании с разными специалистами. Базовыми в таких расчетах должны оставаться материалы ГУЛФ.

Наличие материалов государственной статистичности и ГУЛФ и научной информации по биологической продуктивности и прочим процессам в лесных экосистемах позволяет подойти к созданию углеродного бюджета (баланса) для лесного фонда России. Но для этого необходима консолидация сил научных коллективов в разработке согласованных концепций и программы исследований, в первую очередь по составлению бюджета на федеральном уровне, затем или одновременно, причем в более детализированном формате, на региональном.

В нашей стране вопросы углеродного цикла лесов и лесных болот в настоящее время изучаются в нескольких научных коллективах. По числу публикаций (преимущественно в зарубежных изданиях) лидируют представители Международного института системного анализа (IIASA, Австрия) А.З. Швиденко, S. Nilsson и др. Полезным могло бы стать деловое совещание представителей этих групп для подведения итогов и выбора направлений в дальнейших работах.

В ближайшие 30–50 лет вряд ли следует ожидать изменения формата ГУЛФ в сторону расширения объема базовой информации и перехода от групп возраста к классам возраста, поэтому существующие методики не потеряют своей актуальности. Пул углерода фитомассы в лесном фонде России определен сейчас согласованно для разных методик ($35 \times 10^9 \text{ т С}$). Ныне гораздо важнее

получить аналогичную оценку для пула углерода в детрите (растительных остатках).

Неотложной задачей становится определение потоков углерода в формате материалов ГУЛФ и адаптированной к ним экологической информации. Модель потоков углерода, сложившаяся в период МБП, трактуется как универсальная для всех типов экосистем. Ее приложение к лесам требует агрегированного описания частных потоков углерода в единой системе атмосфера – биосфера – педосфера. Не все элементарные процессы, протекающие в этой сложной системе, можно вписать в структуру материалов ГУЛФ, и требуется привлечение других методик. Прежде всего это касается дифференциации крупномасштабных пулов фитомассы и детрита и описание применительно к ним отдельных потоков углерода (Уткин, 2003). Вполне допустимы расчеты крупных статей бюджета углерода (NPP, депонирование, опад и отпад) при использовании материалов ГУЛФ, лесотаксационных нормативов и конверсионных коэффициентов от запасов древесины (Уткин и др., 2003). В отношении дебриса наиболее сложным остаются нормативы для деструктивных процессов.

Таким образом, информационное обеспечение в России проблемы углеродного цикла в лесном фонде можно считать достаточным для построения в первом приближении федерального бюджета углерода. Но первичная информация требует тщательной систематизации и адаптации к материалам ГУЛФ. Только в этом случае можно ограничить поток сильно разнящихся оценок и определений продуктивности и вклада лесов России в биосферные процессы, включая и самые оптимистичные из этих оценок (Кондратьев и др., 2003). Можно считать, что леса России обладают высоким производственным потенциалом для дополнительного секвестра углерода из атмосферы, в первую очередь из-за фактического изменения функционального статуса земель сельского и лесного хозяйства. Произшедшие изменения в землепользовании потребуют соответственного законодательного оформления.

Исследование выполнялось при поддержке международного проекта “Развитие международного сотрудничества по оценке углеродного цикла” (Институт мировых ресурсов, Вашингтон, США), частично грантов РФФИ (№ 03–04–48097, 05–04–49552).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Базилевич Н.И. Биологическая продуктивность экосистем Северной Евразии. М.: Наука, 1993. 295 с.

Второе национальное сообщение Российской Федерации, представленное в соответствии со статьями 4 и 12 рамочной Конвенции ООН об изменении климата. М.:

Межведомственная комиссия РФ по проблемам изменения климата, 1998. 121 с.

Государственный доклад о состоянии и использовании лесных ресурсов Российской Федерации в 2001 г. М.: ВНИИЛМ, 2002. 108 с.

Государственный доклад о состоянии и использовании лесных ресурсов Российской Федерации в 2002 г. М.: ВНИИЛМ, 2003. 98 с.

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.

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.

Исаев А.С., Коровин Г.Н. Углерод в лесах Северной Евразии // Круговорот углерода на территории России. НТП “Глобальные изменения природной среды и климата” / Под ред. Заварзина Г.А. М.: Миннауки РФ, 1999. С. 63–95.

Исаев А.С., Коровин Г.Н., Сухих В.И. и др. Экологические проблемы поглощения углекислого газа посредством лесовосстановления и лесоразведения в России (Аналитический обзор). М.: Центр экологической политики России, 1995. 156 с.

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

Кондратьев К.Я., Лосев К.С., Ананичева М.Д., Чеснокова И.В. Цена экологических услуг России // Вестн. РАН. 2003. Т. 73. № 1. С. 3–13.

Леса России – 2002. М.: ВНИИЛМ, 2002. 48 с.

Лесной фонд России (по учету на 1 января 1993 года). Справочник. М.: ВНИИЦлесресурс, 1995. 281 с.

Лесной фонд России (по учету на 1 января 1998 года). Справочник. М.: ВНИИЦлесресурс, 1999. 649 с.

Лесной фонд СССР. М.: Государственный Комитет СССР по лесному хозяйству, 1966 (на 1 января 1966 г. – 744 с.); 1976 (на 1 января 1973 г., т. 1 – 600 с., т. 2 – 561 с., т. 3 – 800 с.); 1982 (на 1 января 1978 г., т. 1 – 601 с., т. 2 – 973 с.); 1986 (на 1 января 1988 г. т. 1 – 891 с., т. 2 – 973 с.); М.: Государственный Комитет по лесу (на 1 января 1988 г.), 1990, т. 1 – 1021 с., 1991, т. 2 – 989 с.

Лесопользование в Российской Федерации в 1946–1992 гг. М.: Федер. служба лесн. хоз-ва России, 1996. 313 с.

Национальный доклад по проблемам изменения климата. М.: МПР РФ, 2002. 29 с.

Национальный доклад Российской Федерации по критериям и индикаторам сохранения и устойчивого управления умеренными и бореальными лесами (Монреальский процесс). М.: ВНИИЛМ, 2003. 84 с.

Орлов Д.С., Бирюкова О.Н., Суханова Н.И. Органическое вещество почв Российской Федерации. М.: Наука, 1996. 256 с.

Основные направления лесохозяйственной деятельности за 1988, 1992–2001 гг. М.: Рослесинформ, 2002. 124 с.

Полубояринов О.И. Плотность древесины. М.: Лесн. пром-сть, 1976. 159 с.

Полубояринов О.И., Сорокин А.М. Базисная плотность древесины и коры лесобразующих пород европейской части России // Лесн. хоз-во. 2000. № 5. С. 35–36.

Природные ресурсы и окружающая среда России (аналитический доклад). М.: НИА-Природы, РФФИ, 2001. 572 с.

Рожков В.А., Вагнер В.В., Козут Б.М., Конюшков Д.Е., Шеремет Б.В. Запасы органических и минеральных форм углерода в почвах России // Углерод в биогеоценозах: Чтения памяти акад. В.Н. Сукачева. Т. XV. М.: Наука, 1997. С. 5–58.

Российский статистический ежегодник: Стат. сб. М.: Госкомстат России, 2000. 642 с.

Сухих В.И., Уткин А.И. Рубки леса в Российской Федерации с позиций углеродного цикла // Эмиссия и сток парниковых газов на территории Северной Евразии. Пушино: ОНТИ ПНЦ РАН, 2004. 252 с.

Третье национальное сообщение Российской Федерации, представленное в соответствии со статьями 4 и 12 рамочной Конвенции ООН об изменении климата. М.: Межведомственная комиссия РФ по проблемам изменения климата, 2002. 158 с.

Углерод в экосистемах лесов и болот России / Под ред. Алексеева В.А., Бердси Р.А. Красноярск: Ин-т леса СО РАН, 1994. 232 с.

Усольцев В.А. Фитомасса лесов Северной Евразии: база данных и география. Екатеринбург: УрО РАН, 2001. 707 с.

Усольцев В.А. Фитомасса лесов Северной Евразии: нормативы и элементы географии. Екатеринбург: УрО РАН, 2002. 763 с.

Уткин А.И. Углеродный цикл и лесоводство // Лесоведение. 1995. № 5. С. 3–20.

Уткин А.И. Изучение пулов и потоков углерода на уровнях экосистемы и территориального комплекса // Материалы Международной конференции “Стационарные лесоэкологические исследования: методы, итоги, перспективы”. Сыктывкар: Коми НЦ УрО, 2003. С. 9–13.

Уткин А.И., Гульбе Я.И., Гульбе Т.А., Ермолова Л.С. Биологическая продуктивность лесных экосистем. Компьютерная база данных. М.: ИЛ РАН, ЦЭПЛ РАН, 1994.

Уткин А.И., Гульбе Я.И., Гульбе Т.А., Ермолова Л.С. О наступлении лесной растительности на сельскохозяйственные земли в Верхнем Поволжье // Лесоведение. 2002. № 5. С. 44–52.

Уткин А.И., Замолодчиков Д.Г., Честных О.В. и др. Леса России как резервуар органического углерода биосферы // Лесоведение. 2001. № 5. С. 8–23.

Уткин А.И., Замолодчиков Д.Г., Пращников А.А. Методы определения депонирования углерода фитомассы и нетто-продуктивности лесов (на примере Республики Беларусь) // Лесоведение. 2003. № 1. С. 48–57.

Честных О.В., Замолодчиков Д.Г. Оценка объемного веса почвенных горизонтов по глубине их залегания и содержанию гумуса // Почвоведение. 2004. № 8. С. 937–944.

Честных О.В., Замолодчиков Д.Г., Уткин А.И., Коровин Г.Н. Распределение запасов органического углерода в почвах лесов России // Лесоведение. 1999. № 2. С. 13–21.

Швиденко А.З., Нильсон С. Динамика лесов России в 1961–1993 годах и глобальный углеродный бюджет // Лесная таксация и лесоустройство: Межвуз. сб. науч. тр. Красноярск: СибГТУ, СГТУ, 1997. С. 15–23.

Швиденко А.З., Нильсон 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.

Швиденко А.З., Нильсон 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.

Bonnor G.M. Forest Biomass Inventory // Biomass. Renewable Energy. Hall D.O., Overend R.P. eds. N. Y.: John Wiley and Sons, 1997. P. 47–73.

Forest resources of Europe, GIS, North America, Australia, Japan and New Zealand (industrialized temperate/boreal countries). UN-ECE/FAO Contribution to the Global Forest resources assessment 2000. New York, Geneva: United Nations, 2000. 445 p.

Climate change and forest carbon accounting in Canada // Information Forestry. Special Issue, 2002. 7 p.

Isaev A., Korovin G., Zamolodchikov D. et al. Carbon stock and deposition in phytomass of the Russian forests // Water, Air and Soil Pollution. 1995. V. 82. P. 247–256.

Kolchugina T.P., Vinson T.S. Carbon sources and sinks in forest biomes of the former Soviet Union // Global Biogeochemical Cycles. 1993a. V. 7. № 2. P. 291–304.

Kolchugina T.P., Vinson T.S. Equilibrium analysis of carbon pools and fluxes of forest biomes in the former Soviet Union // Can. J. Forest Res. 1993b. V. 23. P. 81–88.

Kolchugina T.A., Vinson T.S. Role of Russian forests in the global carbon balance // Ambio. 1995. V. 24. № 5. P. 258–264.

Kolchugina T.P., Vinson T.S., Shvidenko A.Z. et al. Carbon balance of forest biomes (undisturbed ecosystems) in the former Soviet Union // Kanninen M. ed. Carbon balance of world's forest ecosystems: towards a global assessment. Proceedings of the IPCC AFOS Workshop held in Joensuu, Finland, 11–15 May 1992. Helsinki, Publications of the Academy of Finland, 1993. P. 52–62.

Kurz W.A., Apps M.J. A 70-year retrospective analysis of carbon fluxes in the Canadian forest sector // Ecological Application. 1999. V. 9. № 2. P. 526–547.

Lakida P., Nilsson S., Shvidenko A. Forest phytomass and carbon European Russia // Biomass and Bioenergy. 1997. V. 12. № 2. P. 91–99.

Myneni R.B., Dong J., Tucker C.J. et al. A large carbon sink in the woody biomass of Northern forests // Proc. Nat. Acad. Sci. USA. 2001. V. 98. № 26. P. 14784–14789.

Nilsson S., Shvidenko A., Stolbovoi V. et al. Full carbon account for Russia. Interim report IR-00-021. Laxenburg: IIASA, 2000. 180 p.

Shepashenko D., Shvidenko A., Nilsson S. Phytomass (live biomass) and carbon of Siberian Forests // Biomass and Bioenergy. 1998. V. 14. № 1. P. 21–31.

Shvidenko A.Z., Nilsson S. Phytomass, increment, mortality and carbon budgets of Russian forests. Interim report IR-98-105. Laxenburg: IIASA, 1998. 29 p.