



УДК 630*

В.А. Соловьев, С.В. Николаев

Соловьев Виктор Александрович родился в 1935 г., окончил в 1958 г. Ленинградскую лесотехническую академию, доктор биологических наук, профессор, заведующий кафедрой общей экологии, анатомии и физиологии растений С.-Петербургской государственной лесотехнической академии, действительный член РАЕН, Международной академии наук экологии и безопасности жизнедеятельности. Имеет более 150 печатных работ в области ксилобиологии.



Николаев Сергей Викторович родился в 1962 г., окончил в 1984 г. Ленинградскую лесотехническую академию, кандидат биологических наук, доцент кафедры общей экологии, анатомии и физиологии растений С.-Петербургской государственной лесотехнической академии. Имеет 20 печатных трудов в области экологии и биотехнологии.

**РОЛЬ ЛЕСНОГО СЕКТОРА В БЮДЖЕТЕ УГЛЕРОДА ЛЕНИНГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ**

Разработана методика оценки депонирования С при лесозаготовках в порубочных остатках на лесосеке, а также в продуктах и отходах переработки за 50 лет. Предложена математическая модель, позволяющая оценивать пулы С и его эмиссию в атмосферу для каждой фракции продуктов и отходов.

Ключевые слова: депонирование углерода, скорость эмиссии в атмосферу, стационарные состояния пулов углерода.

Леса служат источником древесного сырья для промышленности. Вследствие рубки и вывозки древесины в лесных экосистемах уменьшается количество углерода (С). Изъятый С частично остается в продуктах на основе древесины, частично в виде отходов захоранивается на более или менее продолжительное время, двуокись углерода CO_2 возвращается в атмосферу после биологического разложения или сжигания отходов и древесных продуктов. Соотношение этих потоков с учетом продуктивности лесных экосистем, поглощающих С из атмосферы, характеризует роль лесов, древесных продуктов и отходов в секвестровании атмосферного С.

В последнее время баланс С изучается с различной детализацией в разных временных и пространственных масштабах, с особым вниманием к пулам и потокам С в лесных экосистемах. Некоторые работы включают результаты исследования пулов и потоков С, связанных с рубкой древостоя [5, 7] и получением древесных продуктов [6, 8–12]. Для условий России балансовые потоки вещества в технологических процессах лесного комплекса впервые оценил А.И. Киприанов [2]. Эмиссия С за счет лесозаготовки, обработки древесины и использования продукции в 1989 г. подсчитана А.И. Исаевым и др. [1].

Цель данной работы – определить вклад лесозаготовительной, деревообрабатывающей и целлюлозно-бумажной промышленности в основные пулы и потоки С, первоначально находившегося в веществе древесины. Анализ ограничен последним полувеком и современными границами Ленинградской области, окончательно оформленными в 1944 г.

Основой для расчета пулов и потоков С служат данные об объемах древесины (в плотных кубометрах), вывозимой из леса, и количестве получаемой основной продукции, опубликованные в сборниках ЦСУ СССР. Сведения, относящиеся к последнему десятилетию, получены из публикации Комитета по лесопромышленному комплексу при губернаторе Ленинградской области [3]. Используются также неопубликованные данные о структуре потребления древесины и технологическим особенностям переработки древесины на предприятиях Ленинградской области и г. С.-Петербурга.

Извлечение массы С из леса вычисляли на основе состава древостоев, базисной плотности древесины основных лесобразующих пород при 50 %-м содержании С в сухом веществе, а также объемов ежегодной вывозки. Пулы и потоки С, связанные с продуктами переработки древесного сырья и отходами, рассчитывали, исходя из сортиментной структуры продуктов переработки и статистических данных об их выходе с учетом нормативов отходов. Пулы и потоки С, принятые в настоящей работе, и скорость эмиссии С вследствие экспоненциального разложения лесных продуктов и отходов показаны в табл. 1. Для более наглядного представления о скорости эмиссии указано также время разрушения на 50 ($t_{0,5}$) и 95 % ($t_{0,95}$).

Не все принятые величины достаточно обоснованы, поскольку зависят не только от материала, но и от условий службы или разложения. Известно, например, что древесные опилки разлагаются быстро в лесных условиях, но очень медленно в отвалах. Деревянная тара, в больших объемах эксплуатировавшаяся до 1990-х гг., служила недолго вследствие сжигания. Рудничная стойка также эксплуатируется недолго, иногда несколько месяцев, и пораженная грибами сжигается, но часть ее остается в горных выработках на десятилетия. Дрова не сжигаются в год заготовки, а сохраняются иногда в течение нескольких лет.

Общее представление о времени службы деревянных конструкций и сооружений дают «Нормы амортизационных отчислений на полное восстановление основных фондов народного хозяйства СССР», утвержденные по-

Таблица 1

Пулы и скорость эмиссии C (k) вследствие экспоненциального разложения продуктов и отходов и время их разложения на 50 % ($t_{0,5}$) и на 95 % ($t_{0,95}$)

Пулы	k	$t_{0,5}$	$t_{0,95}$
Лесосечные отходы после заготовки и вывозки древесины и дрова топливные:			
Крупные древесные остатки (пни, отрезки ствола, корни крупные) хвойных древесных пород	0,04	17	75
То же лиственных пород	0,06	12	50
Мелкие древесные остатки (сучья, ветви, вершины), оставляемые на лесосеке	0,08	8,7	37
Корни мелкие, опилки на лесосеке	0,10	6,9	30
Древесная зелень, кора ветвей, сучьев, вершин (в основном флэма)	0,20	3,5	15
Дрова топливные и мелкие древесные остатки, сжигаемые на лесосеке	0,40	1,7	7,5
Продукты:			
Пиломатериалы	0,04	17	75
Изделия из пиломатериалов	0,01	69	300
Тара	0,02	35	150
Фанера	0,01	69	300
Древесностружечные плиты (ДСтП)	0,01	69	300
Древесноволокнистые « (ДВП)	0,01	69	300
Строительный лес	0,02	35	150
Рудничная стойка	0,02	35	150
Целлюлоза сульфитная и сульфатная	0,02	35	150
Древесная масса	0,02	35	150
Отходы:			
Кора стволов (в основном корка)	0,02	35	150
Отходы древесные лесопиления, деревообработки и целлюлозно-бумажного производства, не вошедшие в состав продуктов:			
вывозимые в отвалы	0,01	69	300
используемые в сельском хозяйстве	0,20	3,5	15
сжигаемые	0,40	1,7	7,5
продукты и отходы глубокой химической переработки	0,40	1,7	7,5

становлением СМ СССР 22.10.1990 (№ 1072). Время службы закрытых сооружений как величина, обратная норме амортизационного отчисления, равно: для жилых зданий с деревянными рублеными или брусчатыми стенами – 50 лет, для производственных и непромышленных, каркасных, щитовых зданий – 20 лет. Время службы открытых сооружений, таких как мосты деревянные, плотины, мачты деревянные, колодцы, заборы, – от 12

до 20 лет. При капитальных ремонтах древесина вторично не используется и обычно сжигается.

Отходы химической переработки, несмотря на различные пути их использования, имеют общую особенность – сравнительно быстро разлагаются. После сульфитной варки целлюлозы образуются сульфитные щелока, используемые для получения этилового спирта и (или) дрожжей, а также товарных лигносульфонатов; часть из них сжигается. После сульфатной варки получают черные щелока, большей частью сжигаемые для регенерации химикатов. Часть органических веществ целлюлозно-бумажного производства попадает в системы биологической очистки. Удельную скорость разложения некоторых продуктов (за исключением целлюлозы, древесной массы и продуктов на их основе) и всех отходов химической переработки принимаем равной 0,40.

Изменение каждого i -го пула C можно представить в виде схемы:

$$\xrightarrow{dV_i/dt} a_i \xrightarrow{k_i} ,$$

где dV/dt – скорость поступления C в соответствующий пул, содержащий C в количестве a_i ; задается, исходя из статистических материалов;

k_i – константа эмиссии C в атмосферу вследствие экспоненциального разрушения материала, содержащего C ; задается, исходя из скорости разрушения или сроков службы материала (табл.1).

Изменение запасов C в пуле a_i описывают дифференциальным уравнением

$$da_i/dt = dV_i/dt - k_i a_i,$$

а запас C в пуле a_i во время t находят интегрированием этого уравнения. Поскольку dV_i/dt , в свою очередь, зависит от времени сложным образом, аналитическое решение в общем случае невозможно. В данной работе выполнено численное интегрирование по методу Эйлера с шагом в 1 год. При отсутствии данных по каждому году dV_i/dt определяют интерполяцией между известными значениями, обычно приходящимися на конец каждой пятилетки. Этот способ оправдан тем, что при плановой экономике резких изменений по годам в течение длительного времени не происходило.

Со временем в каждом пуле устанавливается стационарное состояние \bar{a}_i , определяемое из условия $da_i/dt = 0$:

$$\bar{a}_i = 1/k_i \cdot dV_i/dt.$$

Как видно из последнего уравнения, стационарное состояние i -го пула не зависит от его начального значения, но зависит от скоростей k_i и dV_i/dt . Теоретически в каждый год можно вычислить стационарное состояние, достигаемое при $t \rightarrow \infty$. Практически в некоторых изученных нами случаях оно достигается за десятилетия.

Динамика вывозки углерода в деловой древесине и дровах. После Великой Отечественной войны количество вывозимого С увеличивалось до 1954 г., затем стабилизировалось на уровне примерно 1,3 ... 1,4 Тг/год до 1987 г., после чего резко снизилось, в 1994 г. до уровня 1945 г. В последние годы XX в. вывозка С возросла вплоть до величин, превышающих после 2000 г. ранее наблюдавшиеся стабильные (рис.1) [3].

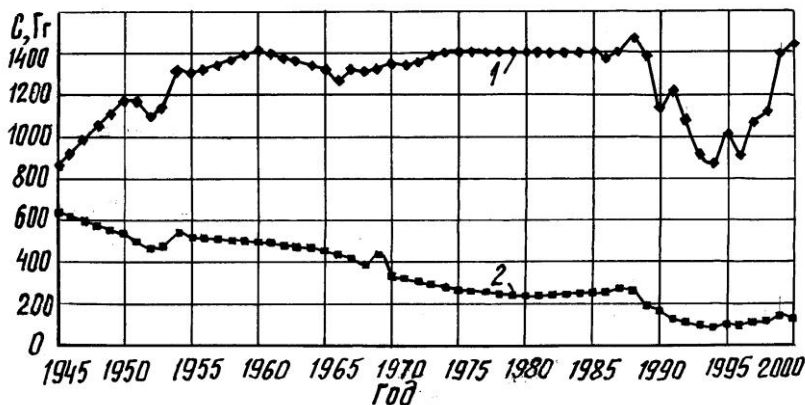


Рис. 1. Вывозка С деловой древесины (1) и дровяного топлива (2) по годам

Депонирование С в порубочных остатках и дровах. В некоторых случаях количество С выходит на стационарный уровень, как в пулах мелких корней, древесной зелени, крупных остатков лиственных пород. В других пулах оно продолжало бы повышаться, но в связи с резким падением вывозки древесины в 1990-е гг. снижалось, как в пулах крупных остатков хвойных пород, мелких остатков, мелких корней.

Наибольшее количество С депонируется в крупных древесных остатках хвойных пород (около 3,5 Тг С) (рис. 2), наименьшее – в древесной

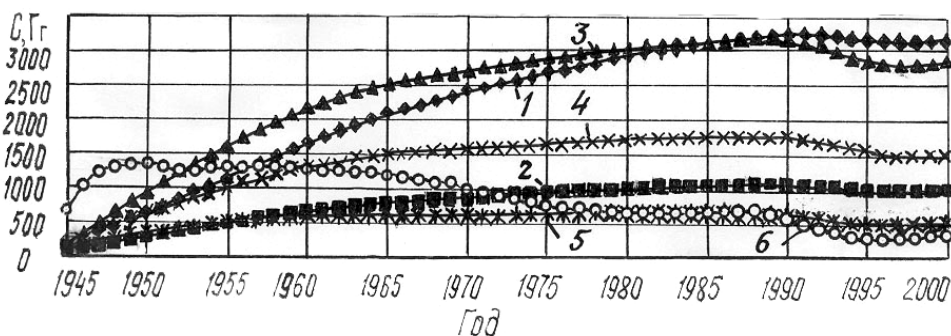


Рис. 2. Депонирование С в порубочных остатках на лесосеке и в дровах: 1 – крупные древесные остатки хвойных пород; 2 – то же лиственных пород; 3 – мелкие древесные остатки, оставляемые на лесосеке; 4 – корни мелкие, опилки на лесосеке; 5 – древесная зелень, кора ветвей, сучьев, вершин (в основном флоэма); 6 – дрова топливные и мелкие древесные остатки, сжигаемые на лесосеке

зелени, коре ветвей, сучьях, вершинах (более 0,5 Тг С). Суммарное увеличение пулов С в порубочных остатках достигло почти стационарного состояния (10 Тг С) примерно к 1990 г. Особенно большое количество С выделяется в атмосферу при заготовке и сжигании дров, а количество остающегося в дровах С ничтожно мало.

Депонирование С в продуктах переработки древесины. Количество С в пиломатериалах достигло стационарного состояния в 1980-е гг. и затем начало снижаться (рис. 3). Эмиссия С в атмосферу за счет этого значительно возросла. Количество С в изделиях из пиломатериалов и таре без учета их разложения практически одинако, однако в изделиях С депонируется в значительном количестве, с выходом в стационарное состояние, в то время как в таре существенно меньше с более ранним выходом в стационарное состояние и последующим снижением. В фанере, ДСтП и ДВП различия в величине пула С сравнительно невелики, наибольшее количество депонируется в ДСтП (1,7 Тг), наименьшее – в ДВП (0,35 Тг). Наблюдается четкий перелом в депонировании С в фанере и ДСтП со снижением величины пула в 1990-е гг. Депонирование С в ДВП вышло на стационарный уровень. Величина пула С в строительном лесе постоянно увеличивалась, достигнув в 2000 г. почти 2 Тг; напротив, пул С в рудничной стойке в 1980-е гг. достиг стационарного состояния (более 0,25 Тг) с последующим снижением в 1990-е гг. Химическая переработка древесного сырья приводит к депонированию С в значительных количествах в целлюлозе (свыше 5,5 Тг к началу 1990-х гг.) и древесной массе (почти 1,0 Тг).

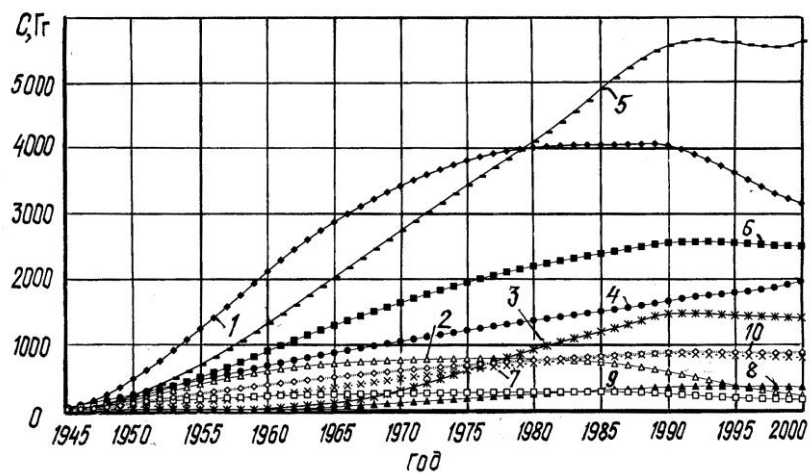


Рис. 3. Депонирование С в продуктах переработки древесины: 1 – пиломатериалы; 2 – тара; 3 – ДСтП; 4 – строительный лес; 5 – целлюлоза сульфитная и сульфатная; 6 – изделия из полуфабрикатов; 7 – фанера; 8 – ДВП; 9 – рудничная стойка; 10 – древесная масса

Суммарное накопление С во всех продуктах переработки древесного сырья достигло 18 Тг и более к началу 1990-х гг. с последующим снижением до 17 Тг к 2000 г.

Депонирование С в отходах переработки древесного сырья. Увеличение пула С значительно в отходах коры (до 5 Тг в 2000 г.) и древесных отходах, вывозимых в отвалы (почти 4 Тг в начале 1990-х гг.) (рис. 4). Остальные отходы в основном быстро выделяют С в атмосферу за счет сжигания или разложения в очистных сооружениях, так что соответствующие пулы не достигают 1 Тг. Пул С в отходах суммарно достиг максимума 10,4 Тг к концу 1980-х гг. и в 1990-е гг. незначительно снижался. При сравнении суммарных пулов видно, что количество С в лесосечных отходах и отходах от предобработки древесного сырья примерно одинаковы (около 10,5 Тг). Наибольшее количество С накапливается в продуктах переработки (свыше 18 Тг). Из общего количества вывезенного С примерно 70 Тг в продуктах и отходах связано около 28,5 Тг С, т. е. 41 %. Остальные 59 % С попадали в атмосферу.

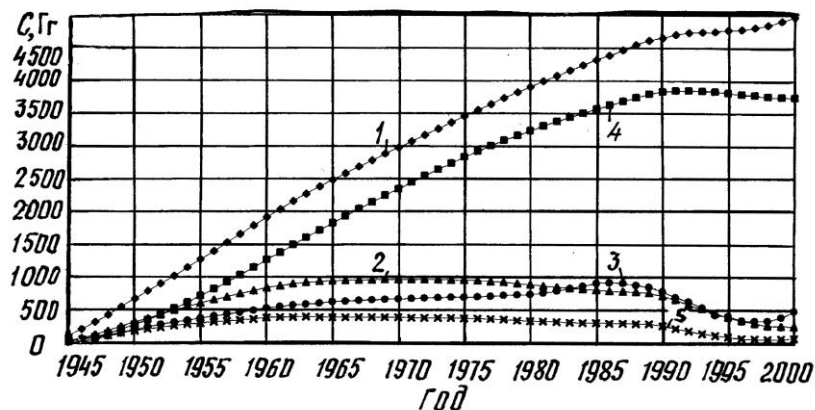


Рис. 4. Депонирование С в отходах, находящиеся в естественных условиях разложения: 1 – кора стволов (корка); 2 – используемые в сельском хозяйстве; 3 – продукты и отходы глубокой химической переработки; 4 – вывозимые в отвалы; 5 – сжигаемые

Суммарное депонирование С в результате заготовки и переработки древесного сырья. Хотя суммарно количество С в вывозимой древесине почти линейно возрастало, пулы С в порубочных остатках, продуктах переработки и отходах пришли в стационарное состояние (или близкое к нему) в конце 1980-х – начале 1990-х гг. Почти во всех случаях (кроме дров, строительного леса и коры стволов) наблюдается период длительной стабилизации пула. Среди лесосечных отходов больше всего С накапливается в крупных остатках хвойных пород (3,3 Тг), затем по мере снижения количества С – в мелких древесных остатках (3,2 Тг), корнях мелких и опилках (1,8 Тг), крупных остатках лиственных пород (1,0 Тг) и древесной зелени (более

Таблица 2

Баланс углерода

Потоки	1989		2000	
	Тг	%	Тг	%
Поступление (нарастающим итогом):				
Вывозка	58,80	53,4	70,90	54,4
Образование лесосечных отходов	51,22	46,6	59,37	45,6
Итого	110,02	100,0	130,27	100,0
Депонирование:				
Продукты	18,02	16,4	17,03	13,1
Отходы переработки	10,36	9,4	9,55	7,3
Лесосечные отходы	10,43	9,5	9,43	7,2
Итого	38,81	35,3	36,02	27,6

0,6 Тг). Количество С в дровах после достижения его максимума с конца 1940-х гг. до середины 1960-х гг. неуклонно снижалось.

В табл. 2 представлено сравнение конечных результатов лесозексплуатации и переработки древесного сырья за период 1945–1989 гг. (до спада вывозки С) и 1945–2000 гг.

Как видно из таблицы, за последнее десятилетие снижались запасы С в продуктах, отходах переработки, лесосечных отходах. Однако к концу XX в. примерно 1/3 поступившего с 1945 г. С осталось аккумулированным (к 1989 г. – 35,3, к 2000 г. – 27,6 %). Это 13 % от 276,2 млн т С [4], ассимилированного во всех насаждениях Ленинградской области к 2000 г. Роль лесной и деревообрабатывающей промышленности в депонировании С в перспективе может быть более ощутимой, если не сжигать промышленные отходы и получит развитие глубокая переработка древесины.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Исаев А.С.* Экологические проблемы поглощения углекислого газа посредством лесовосстановления и лесоразведения в России: аналитический обзор / А.С. Исаев [и др.]. – М.: Центр экологической политики России, 1995. – 156 с.
2. *Киприанов А.И.* Рациональное использование сырья и безотходная технология на примере организации лесного комплекса / А.И. Киприанов // Рациональное использование природных ресурсов и охрана окружающей среды. – Л.: Изд. ЛПИ, 1987. – Вып. 10. – С. 91–96.
3. Комитет по лесопромышленному комплексу при губернаторе Ленинградской области: обзор лесной промышленности Ленинградской области, 1998. – 24 с.
4. *Трейфельд Р.Ф.* Динамика запасов углерода в живой биомассе лесов Ленинградской области / Р.Ф. Трейфельд, К.И. Кобак, А.В. Грязькин // Динамика запасов углерода в лесах Северо-Запада: экология, экономика и политика: матер. Междунар. науч.-техн. конф. / Под ред. С.Е. Грязнова. – СПб.: СПбГЛТА, 2003. – С. 21–38.

5. *Böswald K.* Present and future options of forests and forestry for CO₂ – mitigation in Germany / K. Böswald // Carbon dioxide mitigation in forestry and wood industry. – Berlin: Springer, 1998. – P. 135–151.

6. *Dewar C.R.* Carbon sequestration in the trees, products and soil of forest plantation: an analysis using UK examples / C.R. Dewar, M.G.R. Cannel // Tree Physiology. – 1992. – 11. – P. 49–71.

7. *Harmon M.E.* Effects on carbon storage of conversion of old-growth forest to young forests / M.E. Harmon, W.K. Ferrell, T.F. Franklin. // Science. – 1990. – 247. – P. 699–702.

8. *Harmon M.E.* Modeling historical patterns of tree utilization in the pacific northwest: carbon sequestration implications / M.E. Harmon, S.L. Garman, W.K. Ferrell // Ecological Application. – 1996. – 6(2). – P. 641–652.

9. *Harmon M.E.* Modeling carbon stores in Oregon and Washington forest products: 1990 – 1992 / M.E. Harmon, J.M. Harmon, W.K. Ferrell, D. Brooks // Climatic Chang. – 1996. – 33. – P. 521–550.

10. *Karjalainen T.* Role of wood-based products in absorbing atmospheric carbon / T. Karjalainen, S. Kellomäki, A. Pussinen // Solva Fennica. 1994. – 28(2). – P. 67–80.

11. *Kurz W.A.* The carbon budget of the Canadian forest sector. Phase I. Forestry Canada, Northwest Region, Northern Forestry Center, Information Report NOR-X-322 / W.A. Kurz, M.J. Apps, T.M. Webb, P.J. McNamee. – Edmonton: Alberta, 1992. – 93 p.

12. *Row C.* Tracing the flow of carbon through U.S. forest product sector / C. Row, R.B. Phelps // Presentation at the 19th World Congress, IUFRO, Monreal, Canada, August 5-11, 1990. – 13 p.

С.-Петербургская государственная
лесотехническая академия

Поступила 16.04.03

V.A. Solovjev, S.V. Nikolaev

Role of Forest Sector in Carbon Balance of the Leningrad Region

Estimation technique for carbon deposition under forest-harvesting in felling residues on the logging site has been developed, as well as in products and wastes of processing over 50 years. Mathematic model allowing to estimate carbon storage and its emission into atmosphere for every fraction of products and wastes has been suggested.
