



УДК 630*161.32

Э.А. Курбанов

Марийский государственный технический университет

Курбанов Эльдар Аликрамович родился в 1965 г., окончил в 1989 г. Марийский политехнический институт, доктор сельскохозяйственных наук, профессор кафедры лесоводства Марийского государственного технического университета, руководитель центра устойчивого управления лесами. Имеет более 60 печатных работ по проблемам «Лес и глобальное потепление», устойчивого управления лесами, дистанционных методов в изучении лесов.
Тел.: (8362) 68-68-73



МОДЕЛИРОВАНИЕ БЮДЖЕТА УГЛЕРОДА ЛЕСНЫХ НАСАЖДЕНИЙ НА ПРИМЕРЕ СОСНЯКОВ ПОВОЛЖЬЯ*

Предложена модель оценки основных потоков углерода в различных пулах соснового насаждения Поволжья, позволяющая учесть влияние различных факторов на бюджет углерода лесной экосистемы. Показана важность выделения среднего значения накопления, определяющего устойчивость депонирующей функции лесов.

Ключевые слова: Киотский протокол, лесные экосистемы, бюджет углерода, сосна, парниковые газы.

Согласно международным соглашениям страны-участницы Киотского протокола в отчетах должны представить данные о реальном снижении эмиссии парниковых газов на своей территории, а применительно к России удерживать выбросы на уровне 1990 г. В этом процессе не последнюю роль играют национальные запасы углерода, сосредоточенные в лесных насаждениях [15]. Поэтому оценка лесного пула углерода представляется особенно актуальной для выполнения обязательств по протоколу.

За последние годы российские ученые провели много исследований по оценке депонирования углерода лесными насаждениями [1, 3, 8, 9, 17], в основном ограничиваясь определением его запасов в лесных экосистемах без учета перехода в другие пулы на разных этапах роста насаждения и депонирования углерода в продуктах из древесины в процессе их эксплуатации. Опыт зарубежных исследователей свидетельствует о более прогрессивных

* Работа выполнена в рамках Федеральной целевой научно-технической программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития науки и техники», грант № 2006-РП-19.0/001/342.

подходах в оценках, отражающих все процессы стока и потери углерода между его основными пулами в процессе роста насаждения и последующего использования в качестве древесного материала [7, 13, 14, 16, 22, 25, 26].

Цель нашей работы – обсудить возможность комплексной оценки углерода в лесных экосистемах России, моделируя бюджет углерода на примере сосновых насаждений Поволжья, включающих все его значительные пулы, что позволит повысить точность проводимых оценок.

Бюджет углерода лесного насаждения или одного его компонента является величиной, характеризующей систему или ее компонент (за определенное время) следующим образом: 1) сток, если поток в насаждение или его компонент выше потока из насаждения или его компонента [4] (чистое депонирование позитивно); 2) исток, если этот поток ниже (чистое депонирование отрицательно); 3) равновесное состояние, если потоки равны, т. е. лес является ни стоком, ни истоком углерода (чистое нулевое депонирование).

На уровне лесного насаждения потоки и запасы углерода определяют для всех компонентов. Общая модель бюджета углерода предполагает остаточное его содержание в экосистеме после удаления потоков обратно в атмосферу в процессе авто- и гетеротрофного дыхания, рубок главного и промежуточного пользования, лесных пожаров, сжигания и разложения продуктов из древесины (рис. 1). В бюджете учтены все компоненты насаждения: крона и ствол главного яруса, подрост, подлесок, живой напочвенный покров и древесный детрит.

Запасы углерода в биомассе лесных насаждений разных типов продуктивности представляют собой валовую первичную продукцию экосистемы (GPP). Для получения чистой первичной продуктивности из валовой первичной вычитают углерод, выделившийся в процессе автотрофного

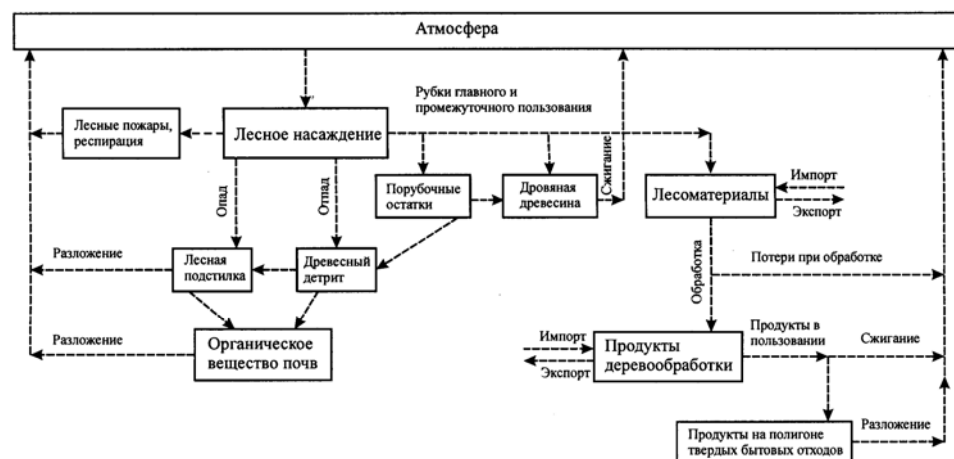


Рис. 1. Основные компоненты бюджета углерода лесного насаждения. Стрелками указан переход углерода в различные пулы и его реализация обратно в атмосферу

дыхания древостоя в процессе его роста, а также древесину от промежуточного пользования, которая согласно правилам рубок в чистых сосновых насаждениях составляет: для осветлений и прочисток 10...15, для прореживаний 15...20, для проходных рубок 15...20 %. При осветлениях и прочистках вырубленную древесину, как правило, оставляют в лесу на перегнивание, пополняя запасы древесного детрита. Во время рубок прореживания, которые проводят в насаждениях 20–40-летнего возраста, часть древесины также оставляют, остальную используют в качестве древесного топлива. Древесина от проходных рубок служит сырьем для производства продуктов и лесоматериалов, а частично древесным топливом. В модели бюджета углерода использованы проценты вырубki лесного насаждения во время промежуточного пользования и соответствующие им проценты эмиссии углерода обратно в атмосферу.

Эмиссия углерода от автотрофного дыхания сосновых древостоев принята на основании материалов предыдущих исследований [11, 18, 20, 24], в среднем этот поток составляет 33 % от валовой первичной продуктивности соснового насаждения. Поток от гетеротрофного дыхания (разложения) принят за 40 % от запасов древесного детрита [5, 12, 16, 18]. Бюджет углерода лесного насаждения на определенном этапе его роста определяется как разность между валовой первичной продуктивностью (GPP) соснового насаждения и автотрофным дыханием, а также разложением древесного детрита экосистемы (табл. 1).

На продуктивность лесных насаждений значительное влияние могут оказывать вредные насекомые и болезни. Однако в отличие от влияния лесных пожаров углерод древесины, подверженной болезням и вредителям, продолжает длительное время оставаться в насаждении. Его эмиссия обратно в атмосферу рассмотрена в виде гетеротрофного дыхания (разложения) древесного детрита.

Таблица 1

Схема определения бюджета углерода в лесных насаждениях

Углерод в древостое	Потоки углерода в древесном детрите	Баланс углерода лесной экосистемы
Валовая первичная продуктивность (GPP) – рубки промежуточного пользования = углерод в древостое – автотрофное дыхание древостоя = Чистая первичная продуктивность – Древесный детрит = Чистая первичная продуктивность древостоя (NPP)	Биомасса детрита – разложение (гетеротрофное дыхание) = Чистая продуктивность древесного детрита (NPD)	Углерод в органическом веществе почв + поток углерода в лесное насаждение (GPP) – поток углерода при автотрофном дыхании – разложение детрита = Чистая продуктивность лесной экосистемы (NEP)

В общий бюджет углерода включены постэкосистемные углеродные потоки в древесных продуктах из сосны (на примере Республики Марий Эл). В качестве основного пула рассматривали долгосрочные продукты (здания, пиловочник, мебель) из сосны. В конечном итоге выявлено значение продуктов деревообработки в сохранении депонированного атмосферного углерода и их вклад в общий углеродный бюджет лесов региона [6].

Содержание углерода в насаждении или его компоненте варьирует со временем. Поэтому для определения характера долгосрочного поведения насаждения целесообразно вычислять изменения запасов углерода на длительный период роста древостоя. Нами предложено использовать эквilibrium (среднее равновесное) депонирования углерода, который представляет собой средний поток углерода в компоненте экосистемы в течение нескольких оборотов рубки [10] (каждый 81 год). В общую схему моделирования включены пулы углерода в древостое, почвах и древесном детрите, продуктах из древесины сосны. На рис. 2 среднее равновесное значение депонированного углерода показано в виде пунктирной линии. Данный показатель наглядно демонстрирует способность лесного насаждения устойчиво депонировать атмосферный углерод, если нет неблагоприятных условий (болезни, пожары, антропогенные факторы).

Бюджет углерода на уровне соснового насаждения в Поволжье максимален в спелых и перестойных насаждениях (табл. 2). К этому времени наблюдается увеличение депонирования углерода не только древостоем, но также живым напочвенным покровом, древесным детритом [19] и почвами. Основные изменения в течение роста сосняков происходят в запасах надземной фитомассы. Углерод органического вещества почв также накапливается, но с меньшей скоростью. Об этом также свидетельствуют исследования других ученых [2, 21].

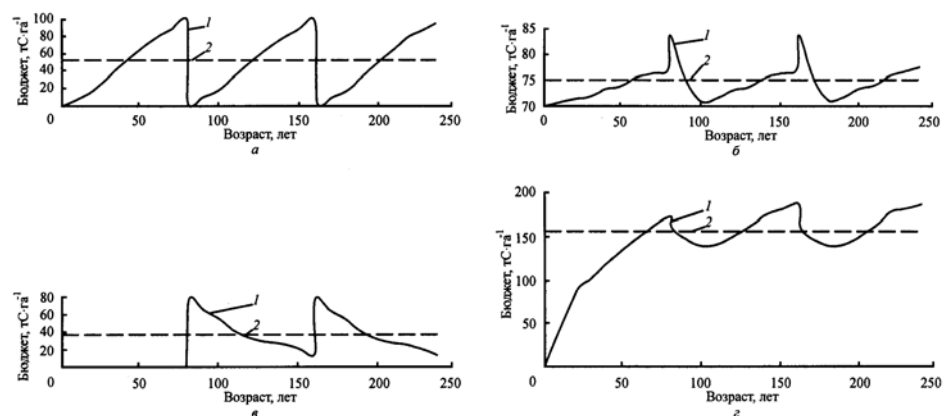


Рис. 2. Динамика углерода в различных пулах соснового насаждения I класса бонитета в течение трех оборотов рубки: *a* – древостой, NPP; *б* – детрит, NPD + + углерод почв; *в* – продукты, депонирование; *г* – итого по всем пулам; 1 – всего; 2 – среднее за весь период

Таблица 2

Бюджет углерода в сосновых насаждениях различных классов бонитета и возраста, т С·га⁻¹

Бюджет углерода	Класс бонитета				
	I	II	III	IV	V
40 лет (молодняки)					
NEP	47	37	30	22	16
NPD	3	3	2	1	1
Углерод почвы	71	62	59	58	58
Общий	121	102	91	81	75
60 лет (средневозрастные)					
NEP	71	57	44	34	25
NPD	7	6	5	3	3
Углерод почвы	72	63	60	59	59
Общий	150	126	109	96	87
80 лет (приспевающие)					
NEP	90	73	56	44	34
NPD	9	8	7	5	4
Углерод почвы	73	64	61	60	60
Общий	172	145	124	109	98
100 лет (спелые)					
NEP	99	87	66	52	42
NPD	11	10	8	6	5
Углерод почвы	74	65	63	61	61
Общий	184	162	137	119	108
140 лет (перестойные)					
NEP	114	98	77	60	53
NPD	16	13	12	9	8
Углерод почвы	75	68	65	63	63
Общий	205	179	154	132	124

Депонирование углерода (NPP) сосновым насаждением I класса бонитета с момента начала его роста до возраста рубки достигает 96 т С·га⁻¹. После сплошной вырубki древостоя запасы углерода резко снижаются, а на лесосеке остается 3 т С·га⁻¹ в виде лесной подстилки и подлеска (рис. 2, а). Затем в результате лесовозобновления сосновое насаждение продолжает накапливать углерод до предыдущего уровня и очередной рубки. В целом наблюдается максимум к возрасту рубки и последующий относительно долгий период существования продуктов из древесины, подлежащих эксплуатации.

Во время сплошной рубки часть сосновой древесины в виде порубочных остатков остается на лесосеке, пополняя запасы древесного детрита. На графике это видно по резко возросшим запасам древесного детрита

и углерода почв (рис. 2, б). В течение последующих 10 лет в процессе разложения порубочных остатков происходит снижение запасов углерода в данном пуле. С ростом древостоя и его отпадом детрит повторно продолжает аккумулироваться, и кривая растет до следующего возраста рубки. Продолжительность нахождения углерода в этих пулах в значительной степени зависит от скорости накопления биомассы и дальнейшего ее разложения. Древесный детрит разлагается с различной скоростью и трансформируется в пул почвы, в котором этот процесс замедляется. Основной неопределенностью в данном случае остается скорость разложения фракций лесной подстилки, древесного детрита и почв.

Вырубленная древесина (GPP) трансформируется в продукты, которые продолжают удерживать углерод (рис. 2, в), этот пул максимален на момент вырубки древостоя. Через год после вырубки древостоя (81 год в общем периоде моделирования) он составляет 76 т С с 1 га соснового насаждения. В течение 100 лет эксплуатации в долговременных продуктах остается до 10 % депонированного углерода от его первоначального значения [23]. Сумма всех пулов за весь период показывает, что если сосновое насаждение продолжает расти на месте вырубленного, то общая кривая (рис. 2, г) депонирования находится в пределах 140...180 т С·га⁻¹. Значительный вклад в общее накопление углерода вносят лесные почвы, которые депонируют его дольше, чем сам древостой.

Таким образом, при исследованиях депонирования углерода сосновыми насаждениями рекомендуется использовать следующие критерии: среднее (эквilibrium) равновесное депонирование насаждением на три оборота различных рубок главного пользования древостоем, почвами и детритом, продуктами из древесины; бюджет углерода на определенный период роста насаждения. Для соснового древостоя I класса бонитета запасы депонированного углерода в течение трех оборотов рубки достигают среднего равновесного значения 51, древесного детрита и почв – 75, продуктов из древесины – 37, в целом по всему насаждению – 155 т С·га⁻¹ или соответственно 31,46 и 23 % по основным пулам. Таким образом, главным пулом депонированного углерода являются почвы с древесным детритом, далее следуют сосновый древостой и продукты из древесины. Для сравнения можно привести подобные критерии для 150-летних сосняков Финляндии [16], где чистое депонирование углерода по пулам составляет: в древостое 44...50, в детрите 12...21, в почве 18...35, в продуктах из древесины 18...29, общее 101...127 т С·га⁻¹, чистый средний прирост углерода 0,6...1,0 т С·га⁻¹·год⁻¹. Наши показатели сравнимы также с материалами M.G.R. Cannell и R.C. Dewar [10], изучавшими депонирование углерода в лесных насаждениях Великобритании. По их данным, процентное соотношение среднего равновесного депонирования елью Ситка на 300 лет составляет: почвой и детритом – 50, древостоем – 34, продуктами из древесины – 16 %.

Полученные результаты свидетельствуют о необходимости интегрированного подхода к оценке депонирования углерода лесами и лесным

сектором в целом, что также способствует оценке общего цикла углерода в атмосфере. Предложенная модель обладает рядом преимуществ, так как позволяет выделить и включить в общую оценку различные факторы, влияющие на бюджет углерода лесной экосистемы, выявить основные его потоки и наметить мероприятия по долгосрочному депонированию. В дальнейшем она может быть адаптирована к различным сценариям ведения лесного хозяйства.

Важным аспектом исследований является выделение среднего (эквивалибриума) значения накопления углерода, которое определяет устойчивость депонирующей функции лесов. Такой подход позволит получать углеродные кредиты в начале проектов Киотского протокола, что важно для лесного хозяйства в связи с продолжительным процессом выращивания леса. Скорость накопления углерода в молодых насаждениях будет выше, чем в спелых и перестойных. Эквивалибриум депонирования позволит выравнять это различие.

Несмотря на важность комплексного подхода при оценке бюджета углерода лесного насаждения, существует ряд факторов, влияющих на точность его определения. Это отсутствие достоверных данных о площади лесных пожаров, различных нарушениях, нелегальных рубках, сложно определяемой биомассе корней. Большую неопределенность вызывает также вопрос об использовании продуктов из древесины и их терминальной утилизации на полигонах твердых бытовых отходов. Все эти вопросы должны быть приняты во внимание при дальнейшей оценке бюджетов углерода в лесном хозяйстве на уровне отдельных регионов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ведрова, Э.Ф.* Круговорот углерода в молодняках основных лесообразующих пород Сибири [Текст] / Э.Ф. Ведрова, Л.В. Спиридонова, В.Д. Стаканов // Лесоведение. – 2000. – № 3. – С. 40–48.
2. *Газизуллин, А.Х.* Почвенно-экологические условия формирования лесов Среднего Поволжья [Текст] / А.Х. Газизуллин. – Казань: РИЦ «Школа», 2005. – 496 с.
3. Динамика пулов и потоков углерода на территории лесного фонда России / Д.Г. Замолотчиков [и др.] // Экология. – 2005. – № 5. – С. 323–333.
4. *Курбанов, Э.А.* Бюджет углерода сосновых экосистем Волго-Вятского района России [Текст] / Э.А. Курбанов. – Йошкар-Ола: МарГТУ, 2002. – 300 с.
5. *Курбанов, Э.А.* Древесный детрит в сосновых насаждениях Среднего Заволжья [Текст] / Э.А. Курбанов, О.Н. Кранкина // Лесн. журн. – 2001. – № 4. – С. 27–32. – (Изв. высш. учеб. заведений).
6. *Курбанов, Э.А.* Углерод в продуктах из древесины Республики Марий Эл [Текст] / Э.А. Курбанов // Лесн. журн. – 2003. – № 6. – С. 16–24. – (Изв. высш. учеб. заведений).
7. Опыт агрегированной оценки основных показателей биопродукционного процесса и углеродного бюджета наземных экосистем России. 2. Нетто-первичная продукция экосистем [Текст] / А.З. Швиденко [и др.] // Экология. – 2001. – № 2. – С. 83–90.
8. *Усольцев, В.А.* Фитомасса лесов северной Евразии: нормативы и элементы географии [Текст] / В.А. Усольцев. – Екатеринбург: УрО РАН, 2002. – 761 с.

9. Экологические проблемы поглощения углекислого газа посредством лесовосстановления и лесоразведения в России [Текст] / А.С. Исаев [и др.]; под ред. А.В. Яблокова. – М.: Центр экологической политики России, 1995. – 155 с.
10. *Cannell, M.G.R.* The carbon sink provided by plantation forests and their products in Britain [Text] / M.G.R. Cannell, R.C. Dewar // *Forestry*. – 1995. – Vol. 68, N 1. – P. 35–48.
11. *Farquhar, G.D.* A biochemical model of photosynthetic CO₂ assimilation in leaves of C3 species [Text] / G.D. Farquhar, S. Von Caemmerer, J.A. Berry // *Planta*. – 1980. – N 149. – P. 79–90.
12. *Grace, J.* Methodologies for estimating the forest carbon budget for Europe [Text] / J. Grace, F. Veroustraete, T. Karjalainen // *Forest ecosystem modeling, upscaling and remote sensing*. – The Netherlands, 2000. – P. 109–122.
13. *Haripriya, G.S.* Carbon budget of the Indian forest ecosystem [Text] / G.S. Haripriya // *Climatic change*. – 2003. – N 56. – P. 291–319.
14. *Harmon, M.E.* Modeling carbon stores in Oregon and Washington forest products: 1900-1992 [Text] / M.E. Harmon, J.M. Harmon, W.K. Ferrell // *Climatic change*. – 1996. – N 33. – P. 521–550.
15. IPCC: Climate change 2001: The Scientific basis. Contribution of working group I to the third assessment report of the Intergovernmental panel of Climate Change [Text] / J.T. Houghton [et al.] // Cambridge University Press. – Cambridge: United Kingdom and NY, USA, 2001. – 881 p.
16. *Karjalainen, T.* Dynamics of the carbon flow through forest ecosystems and the potential of carbon sequestration in forests and wood in Finland [Text] / T. Karjalainen: Academic Dissertation. – University of Joensuu: Faculty of forestry, 1996. – 80 p.
17. *Krankina, O.N.* Carbon storage and sequestration in the Russian forest sector [Text] / O.N. Krankina, M.E. Harmon, J.K. Winjum // *Ambio*. – 1996. – Vol. 25, N 4. – P. 284–288.
18. *Krankina, O.N.* Dynamics of the dead woods carbon pool in north-western Russian boreal forests [Text] / O.N. Krankina, M.E. Harmon // *Water, air and soil pollution*. – 1995. – Vol. 82. – P. 227–238.
19. *Kurbanov, E.A.* Woody detritus in temperate pine forests of Western Russia [Text] / E.A. Kurbanov, O.N. Krankina // *World Resources Review*. – 2000. – Vol. 12, N 4. – P. 741–754.
20. *Lindroth, A.* Long-term measurements of boreal forest carbon balance reveal large temperature sensitivity [Text] / A. Lindroth, A. Grelle, A. Moren // *Global change biology*. – 1998. – N 4. – P. 443–450.
21. *Liski, J.* Density of organic carbon in soil at coniferous forest sites in southern Finland [Text] / J. Liski, C.J. Westman // *Biogeochemistry*. – 1995. – N 29. – P. 183–197.
22. *Molly K.W.* Life cycle inventories of roundwood production in northern Wisconsin: Inputs into an industrial forest carbon budget [Text] / K.W. Molly, T.G. Stith, E. Douglas // *Forest Ecology and Management*. – 2005. – N 219. – P. 13–28.
23. *Row, C.* Tracing the flow of carbon through U.S. forest product sector [Text] / C. Row, R. Phelps // Presentation at the 19th World Congress: IUFRO, 1991. – 13 p.
24. Strategies for measuring and modeling carbon dioxide and water vapour fluxes over terrestrial ecosystems [Text] / D. Baldocchi [et al.] // *Global change biology*. – 1996. – N 3. – P. 159–168.
25. The carbon budget of the Canadian forest sector: Phase I. for Canada [Text] / W.A. Kurz [et al.]. – Edmonton, 1994. – 93 p.

26. The carbon pool in a British semi-natural woodland [Text] / G.L. Patenaude [et al.] // Forestry (Oxford University Press). – 2003. – Vol. 76/1. – P. 109–119.

Поступила 28.11.06

E.A. Kurbanov
Mari El State Technical University

Carbon Budget Simulation in Forest Stands Based on Example of Povolzhje Pine Forests

The estimation model is offered for main carbon flows in different pools of Povolzhje pine stands allowing to take into account different factors' influence on carbon budget of forest ecosystem. The importance of mapping a mean value of carbon storage determining the stability of forest depositing function is shown.

Keywords: Kyoto protocol, forest ecosystems, carbon budget, pine, greenhouse gases.
