

УДК 574.4:212.3:582.475.2

ЦИКЛ УГЛЕРОДА В ЛИСТВЕННИЧНИКАХ СЕВЕРНОЙ ТАЙГИ

© 2003 г. Ф. И. Плешиков, Э. Ф. Ведрова, В. Я. Каплунов, Л. В. Мухортова, И. Н. Безкоровайная, А. В. Климченко

Представлено академиком Е.А. Вагановым 30.04.2002 г.

Поступило 16.05.2002 г.

Глобальные изменения климата, связанные с увеличением концентрации CO_2 в атмосфере и возникновением парникового эффекта, требуют детального изучения баланса углерода в бореальных лесах [1]. Косвенные данные об углеродном балансе [2-7] свидетельствуют о значительном накоплении углерода лесными экосистемами высоких широт, характеризующимися медленной и сезонноподавленной деструкцией. По последним оценкам [8], ежегодный сток углерода в северные леса колеблется в разных странах от 0.30 до $0.54 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$, составляя в среднем $0.48 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$. Приводимые показатели стока углерода в бореальные леса России изменяются в широких пределах - от 0.08 [7] до $0.44 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$ [9], что объясняется как большим разнообразием российских лесов по составу, структуре и продуктивности, так и недостатком, а часто и полным отсутствием региональных оценок баланса углерода.

С позиций углеродного цикла лесные экосистемы представляют систему блоков "растительность" и "почва", связанных между собой потоками вещества. Запас вещества в блоках ($\text{г(т)} \cdot \text{м}^{-2} \cdot (\text{га}^{-1})$) и интенсивность обменных процессов ($\text{г(т)} \cdot \text{м}^{-2} (\text{га}^{-1}) \cdot \text{год}^{-1}$) - основные параметры, описывающие кругооборот углерода. Пул органического вещества в блоках обеспечивается взаимодействием двух групп процессов: фотосинтетической ассимиляцией углерода атмосферы в продукции (NPP) и его освобождением и возвратом в атмосферу в ходе разложения органического вещества. Соотношение интенсивностей этих процессов характеризует роль экосистемы в биосфере.

Исследования годичного цикла углерода проводили в лесных экосистемах северной тайги на Туруханской исследовательской станции Енисейского трансекта IGBP. Станция расположена в поясе субарктического климата в бассейне р. Нижняя Тунгуска ($65^{\circ}46'$ с.ш., $89^{\circ}25'$ в.д.). По терми-

ческим условиям ($\Sigma t > 10^{\circ}\text{C} = 1100^{\circ}\text{C}$) это умеренно холодный агроклиматический район со среднегодовой температурой -7.6°C . Продолжительность вегетационного ($s t > 5^{\circ}\text{C}$) периода 115, безморозного 85 дней. За год в среднем выпадает 470 мм осадков. Для территории характерно преобладание вечной мерзлоты над островами талого грунта.

В условиях хорошего дренажа на мелкоземисто-обломочных продуктах выветривания траппов, вулканических туфов, плотных осадочных пород Тунгусского плато фоновыми почвами являются подбуры. Они характеризуются маломощностью профиля, преобразованием почвообразованием, щебнистостью, преобладанием фракций песка в гранулометрическом составе мелкозема, интенсивным промывным режимом.

В составе фитоценозов преобладает лиственница Гмелина (*Larix gmelinii* (Rupr.) Rupr.). Из сопутствующих пород присутствуют ель сибирская (*Picea obovata* Ledeb.), кедр сибирский (*Pinus sibirica* Du Tour) и береза (*Betula pendula* Ehrh.). Исследования выполнены на четырех постоянных пробных площадях, заложенных в одноярусных разновозрастных перестойных 380-летних и спелых 110-летних послепожарных насаждениях зеленомошной и лишайниковой групп типов леса V-V^a классов бонитета зеленомошной и лишайниковой групп типов леса. Доля лиственницы в них достигает 61-77% от общего запаса 31-118 м³/га при относительной полноте 0.26-0.68.

Анализ параметров углеродного цикла основывался на балансовом методе [10]. На пробных площадях учитывались запасы углерода в надземной и подземной биомассе растений, органическом веществе почвы, определялась интенсивность процессов формирования текущего прироста и отмирания биомассы растений, разложения мертвых растительных остатков. Оценивалось перераспределение освобожденного при разложении углерода по потокам: возврат в атмосферу в форме диоксида, синтез гумусовых кислот, вынос с поверхностным стоком и фильтрация в почву.

Гетерогенность органического вещества почвы и разная устойчивость к биотрансформации обусловили объединение его компонентов в две

Таблица 1. Средние параметры углеродного цикла в лиственничниках северной тайги

Запасы углерода в экосистеме		Интенсивность потоков углерода	
блоки, субблоки экосистемы	С, т · га ⁻¹	потоки	С, т · га ⁻¹ год ⁻¹
Биомасса растений	46.1	Продукция (NPP)	2.35
древостой	34.6	древостой, подрост,	
подрост и подлесок	2.6	подлесок	0.81
напочвенный покров	8.9	напочвенный покров	1.54
Органическое вещество почвы	58.7	Освобождение при деструкции	1.53
легкоминерализуемая фракция	40.8	эмиссия в атмосферу	1.29
стабильный гумус	17.9	новообразование гумуса	0.03
		фльтрация в почву	0.18
		вынос с талыми водами	0.03
		Сток в экосистему	0.82

фракции: легкоминерализуемое органическое вещество (ЛМОВ) и стабильный гумус (СГ). Основными компонентами ЛМОВ служат лесная подстилка, корневая мортмасса, сухостой, валеж, микробная и зообиомасса, а также подвижные органические продукты растительных остатков и почвы, легко переходящие в растворимое состояние.

Экологические варианты 380-летних лиственничников при одинаковой полноте аккумулируют близкие количества углерода в надземной и подземной биомассе древостоя и нижних ярусов леса - 43-46 т · га⁻¹, а 110-летние древостой этих же вариантов, но при полноте 0.68 и 0.26-67 и 27 т · га⁻¹ соответственно. Близкого порядка размеры пула углерода (23.9-45.2 т · га⁻¹) приводит А.З. Швиденко с соавторами [11] для лесотундры, северной и средней тайги России, основываясь на косвенных данных учета лесного фонда. В фитомассе древесного полога сконцентрировано 60-90% углерода, при этом большая его часть (до 70%) закрепляется в стволовой древесине, надолго выпадая из кругооборота (табл. 1). В нижних ярусах насаждений накапливается от 7 до 13 т · га⁻¹, 70-90% этого запаса связано биомассой напочвенного покрова.

Органическое вещество почвенного блока аккумулирует от 40 до 76 т · га⁻¹. Основная его часть (61-84%) представлена легкоминерализуемой фракцией. Преобладают (66-85%) органические продукты в виде растительных остатков на поверхности и в толще почвы. Подвижные, легко-растворимые в водных и слабощелочных растворах органические продукты составляют от 25 до 40% запаса ЛМОВ, более половины их сосредоточено в гумусе почв.

Величина углерода микробной биомассы не превышает 4-7% запаса углерода легкоминерализуемой фракции органического вещества. Практически не отличаясь в экологических вариантах

лиственничников, она аккумулирует 3.5 т · га⁻¹. В зоомассе сосредоточено 0.001-0.006 т · га⁻¹.

Пул СГ, прочно связанного с минеральной частью почв и устойчивого к биотрансформации, изменяется в лиственничниках зеленомошных в пределах 19-29 т · га⁻¹, в лишайниковых - 7-17 т · га⁻¹.

В целом экосистемы лиственничных лесов в возрасте 110 и 380 лет накапливают от 67 до 143 т · га⁻¹.

По существующим представлениям [12, 13], годовая продукция растительных сообществ мало зависит от их состава и структуры и определяется в большей степени условиями местопроизрастания. В общей годичной продукции зеленомошных лиственничников ассимилируется 2.5-2.9 т · га⁻¹, лишайниковых - 1.7-1.9 т · га⁻¹. Более половины этой величины (74-77%) формируется за счет напочвенного покрова (см. табл. 1). Основная роль в накоплении углерода принадлежит травяно-кустарничковому ярусу.

Интенсивность отмирания растительных фракций достигает 60-70% годового прироста. При этом на опад древесного полога приходится от 60 до 90% годового депонирования углерода в текущем приросте фитомассы, для травяно-кустарничкового яруса эта величина в разных типах лиственничников изменяется от 50 до 60%. Свежий опад активно вовлекается в деструкционные процессы, разлагаясь с константой 0.22-0.29 год⁻¹.

Кроме опада в процессы биохимической трансформации ежегодно вовлекаются подстилка, сухостой, валеж и пни отпавших деревьев, корневая мортмасса почвенной толщи. В насаждениях 110- и 380-летнего возраста общий пул углерода в этом материале составляет соответственно 29 и 34 т · га⁻¹. В общих запасах растительных остатков на поверхности почвы преобладает подстилка. На долю валежа и пней в спелых древосто-

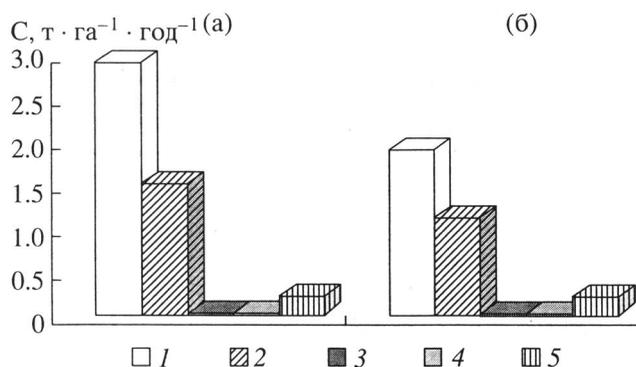


Рис. 1. Основные потоки углерода. 1 - NPP; 2 - минерализация (эмиссия CO_2); 3 - синтез гумуса; 4 - внос с тальными водами; 5 - фильтрация в почву, а - лиственничники зеленомошные; б - лишайниковые.

ях зеленомошного и лишайникового типов приходится соответственно 15 и 6% общей массы растительных остатков, в перестойных - 23 и 11%. Подстилки на 65-80% состоят из ферментированных сильно разложившихся остатков. Многократно отмытые от легкорастворимых соединений, они представляют собой законсервированный субстрат, мало пригодный для активной биотрансформации. На данной стадии их разложение протекает медленно и оценивается константами 0.06 и 0.035 год^{-1} . Однако абсолютное преобладание ферментированного материала по сравнению с другими составляющими растительной мортмассы на поверхности почвы обеспечивает от 61 до 74% ежегодного освобождения углерода в процессах разложения. Всего в годичном цикле разложения наземной мортмассы в лиственничниках зеленомошных освобождается 1.32-1.42 $\text{т} \cdot \text{га}^{-1}$, в лишайниковых - 0.83-0.97 $\text{т} \cdot \text{га}^{-1}$. Интенсивность потери углерода компенсируется величиной ежегодного поступления с опадом.

Запас углерода в корневой мортмассе (7.3-10.2 $\text{т} \cdot \text{га}^{-1}$) в слое 0-20 см минерального профиля почвы в 2.0-2.8 раз ниже, чем в растительных остатках на поверхности почвы. Интенсивность отмирания корней составляет 4-6% запаса корневой мортмассы и сопоставима с величиной ежегодного освобождения углерода при ее разложении, которое протекает с константой 0.03-0.06 год^{-1} .

Общая потеря углерода при разложении растительных остатков на поверхности и в толще почвы составляет в лиственничниках зеленомошных 1.73 и 1.86 $\text{т} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$, лишайниковых - 1.17 и 1.34 $\text{т} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$ (рис. 1) соответственно в спелых и перестойных древостоях. Основную ее часть (82-85%) составляет эмиссия в атмосферу. В процессы гумификации вовлекается не более 3% (1.9-2.8%) освободившегося при разложении углерода. Новообразованные гумусовые вещества обновляют периферическую часть молекулы

гумусовых кислот, компенсируя минерализацию гумуса почвы, которая в спелых древостоях равна 0.2, в перестойных 0.1% запаса гумуса. Весенние талые воды выносят за пределы водосборной площади от 0.5 до 3.2%, в почву фильтруется 9-15% ежегодного освобождения углерода при разложении.

Таким образом, количественный анализ пулов и потоков углерода показывает, что в годичном цикле кругооборота углерода в северотаежных лиственничниках чистая первичная продукция экосистемы (NPP) составляет в среднем 34% NPP и определяет сток в экосистемы CO_2 атмосферы, эквивалентный для спелых древостоев зеленомошного и лишайникового типов соответственно 1.27 и 0.73 $\text{т} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$, для перестойных - 0.87 и 0.41 $\text{т} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$.

Работа выполнена при поддержке РФФИ и Красноярского краевого фонда науки (грант 99-04-96024), Миннауки и технологий (грант 130) и СО РАН (грант 67).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Исаев А.С., Коровин Г.Н. В сб.: Круговорот углерода на территории России. М.: Миннауки России; РАН; Минобразования России, 1999. С. 63-95.
- Вудвелл Д.М., Хафтон Р.Э. Устойчивое развитие бореальных лесов. М.: ВНИИЦлесресурс, 1997. С. 39-46.
- Apps M.J., Kurz W.A., Luxmoore R.J. et al. // Water, Air and Soil Pollution. 1993. V. 70. P. 39-53.
- Заварзин Г.А. В сб.: Круговорот углерода на территории России. М.: Миннауки России; РАН; Минобразования России, 1999. С. 11-16.
- Исаев А.С., Коровин Г.Н., Уткин А.И. и др. // Лесоведение. 1993. № 5. С. 3-10.
- Isaev A., Korovin G., Zamolodchikov D. et al. // Water, Air and Soil Pollution. 1995. V. 82. P. 247-256.
- Nilsson S., Shvidenko A., Stolbovoi V. Full Carbon Account for Russia. Global Change Open Science Conf., 10-13 July 2001: Abstrs. Amsterdam, 2001. P. 82.
- Myneni R.B., Dong J., Tucker C.J. et al. // Proc. Nat. Acad. Sci. 2001. V. 98. № 26. P. 14784-14789.
- Alexeyev V.A., Birdsey R.A. Carbon Storage in Forests and Peatlands of Russia. Gen. Techn. Rept. NE-244. Radnor (Pa.): US Depart. Agricult. Forest Serv.; North-eastern Res. Station, 1998. 137 p.
- Ведрова Э.Ф. // Лесоведение. 1998. № 6. С. 3-11.
- Shvidenko A., Nilsson S., Shepashenko G. Biodiversity and Dynamics of Ecosystems in North Eurasia. Novosibirsk, 2000. V. 4. Pt. 1. P. 110-112.
- Утехин В.Д. Первичная биологическая продуктивность лесостепных экосистем. М.: Наука, 1997. 146 с.
- Абатуров Б.Д. Продукционный процесс в наземных экосистемах. М.: Наука, 1979. 130 с.