

УДК 504.54+574

УГЛЕРОДНЫЙ БЮДЖЕТ РАСТИТЕЛЬНЫХ ЭКОСИСТЕМ РОССИИ© 2003 г. С. Нильссон, академик Е. А. Ваганов, А. З. Швиденко,
В. Столбовой, В. А. Рожков, И. Мак-Каллум, М. Йонас

Поступило 04.08.2003 г.

Снижение концентраций парниковых газов в атмосфере является конечной целью Рамочной конвенции ООН по климатическим изменениям [8]. Поэтому только полный углеродный бюджет (ПУБ), точнее полный бюджет всех парниковых газов, соответствует смыслу и намерениям Протокола Киото [9], причем полнота учета должна быть обеспечена во всех аспектах - пространственном, временном и процессном [7]. В случае ратификации Россией Протокола Киото углеродный бюджет из злободневной научной проблемы превращается в объект международной политики и экономики, хотя некоторые алогичности современного международного переговорного процесса по смягчению неблагоприятных последствий глобальных изменений климата (в особенности концепция частного, а не полного бюджета, принятая КОП6 и КОП7) пока не устранены. Это усиливает необходимость надежной, "прозрачной" и верифицируемой оценки основных составляющих ПУБ.

Углеродный цикл в национальном (континентальном) масштабе - очень сложная динамическая открытая нечеткая (слабо организованная, fuzzy) система, образованная сложным переплетением нестационарных (и, часто, случайных) процессов. Минимизация неопределенности результатов оценивания является главной научной целью ПУБ. Особенности системы определяют, что: 1) ни один отдельно взятый метод сам по себе не позволяет оценить точность (неопределенность) результатов; необходима интеграция различных информационных источников, методов и моделей; 2) методология ПУБ должна удовлетворять некоторому набору обязательных сис-

темных требований [6]. Соответствующая методология ПУБ растительных экосистем для больших территорий разработана Международным институтом прикладного системного анализа (IIASA) совместно с российскими научными институтами [4].

Методология базируется на системном объединении методов, оценивающих потоки и динамику резервуаров углерода с использованием исчерпывающего описания природных ландшафтов в виде интегральной земельной информационной системы (ИЗИС), результатов мониторинга изменений (с использованием, среди других, концепции много-сенсорного дистанционного зондирования из космоса) и региональных экологических моделей различных классов. Прямые измерения потоков, атмосферных концентраций и инверсное моделирование используются для параметризации моделей и независимого контроля. ИЗИС представлена в виде многослойной ГИС (включая цифровые карты ландшафтов, почв, растительности, земельных угодий и землепользования и др. и связанные с ними атрибутивные базы данных). Ландшафтно-экосистемный подход является основой моделирования основных компонентов ПУБ. Результаты оценивания представляют собой пространственно распределенную структуру, описывающую в явном виде динамику резервуаров и потоков углерода для ландшафтных единиц целесообразного масштаба.

Результаты ПУБ для растительных экосистем России (годовые средние потоки и изменений резервуаров в 1988-1992 гг. - стартового периода Протокола Киото) приведены на рис. 1. Три основных потока - чистая первичная продукция, гетеротрофное дыхание и поток, обусловленный антропогенными причинами (потребление растительных продуктов и нарушения) - определяют величину чистой биомной продукции (ЧБП) как численного выражения ПУБ. Растительные экосистемы России в среднем за год в пятилетие 1988-1992 гг. изымали из атмосферы $351 \text{ Тг С} \cdot \text{год}^{-1}$, из которых приращение экосистемных резервуаров углерода составило $269 \text{ Тг С} \cdot \text{год}^{-1}$, а $82 \text{ Тг С} \cdot \text{год}^{-1}$ было вынесено в гидро- и литосферу, т.е. в основном удалено из биологического кругооборота.

*Международный институт прикладного системного анализа,
Лаксенбург, Австрия*

*Институт леса им. В.Н. Сукачева
Сибирского отделения Российской Академии наук,
Красноярск*

*Почвенный институт им В.В. Докучаева
Российской Академии сельскохозяйственных наук,
Москва*

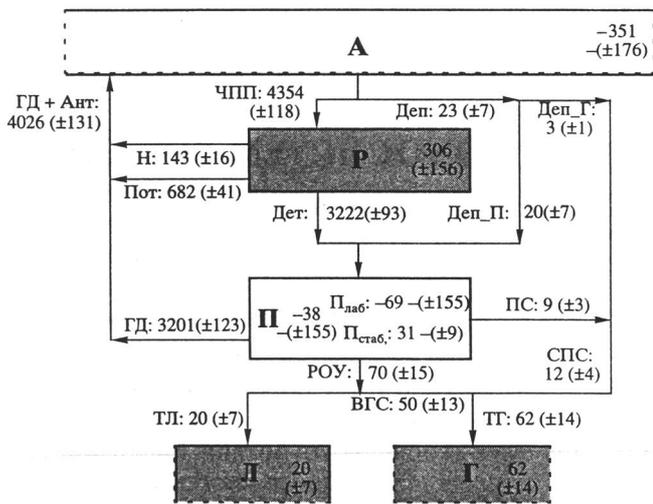


Рис. 1. Полный углеродный бюджет растительных экосистем России (годовые средние потоков и изменения резервуаров за период 1988-1992 гг). Все величины даны в $\text{Tg C} \cdot \text{год}^{-1}$. Резервуары: А - атмосфера, Р - растительность, П - почва (разделенная на 2 резервуара - С лабильного и стабильного органического вещества), Л - литосфера, Г - гидросфера. Потоки: ЧПП - чистая первичная продукция, Деп - сухое и влажное осаждение, ГД - гетеротрофное дыхание, Н и Пот - потоки, обусловленные нарушениями и потреблением растительных продуктов; Дет - детрит; ВТ (водный транспорт С) как сумма поверхностного стока ПС и внутригрунтового стока ВГС; РОУ - растворимый органический углерод; ТЛ и ТГ - С-транспорт в литосферу и гидросферу соответственно. Неопределенности оценок (в скобках) приведены для достоверной вероятности 0.9.

Последняя величина составляет только около 2% ЧПП, но это значит, что каждые 50 лет органическое вещество в размере годичной продукции удаляется из биологического кругооборота; на временах геологического масштаба это дает значительные величины. Примерно 19% ЧПП составляют "управляемую" часть ПУБ, хотя возможности заметного изменения этой величины в обозримый период времени маловероятны, поскольку это потребовало бы либо существенного изменения уровня потребления растительных продуктов, либо принципиального улучшения управления экосистемами (например, в части снижения горимости лесов и т.д.). Величина неопределенностей основных потоков (рассчитанная по специальной методике [6], учитывающей специфику ПУБ) относительно невелика, однако ЧБП оценивается с погрешностью порядка 50%.

Трендовые изменения ПУБ определяются динамикой показателей внешней среды (температура, режим осадков, концентрация углекислого газа, дополнительное поступление доступного азота), изменениями в землепользовании и интенсивности антропогенного воздействия на растительные экосистемы. Как суммарное проявление факторов

первой группы, динамические модели растительности предполагают увеличение ЧПП порядка 0.1-0.2% в год в течение последних десятилетий (см., например, [2]), однако надежные данные на пороговых уровнях насыщения этого процесса в его фактических проявлениях в ненарушенных природных экосистемах (например, в лесах и болотах) недостаточны. Изменения в землепользовании и снижение интенсивности сельскохозяйственного производства и лесопользования в России в течение последних 15 лет способствовали снижению эмиссий парниковых газов в атмосферу. Межгодовая изменчивость ПУБ на национальном уровне определяется главным образом распространением и интенсивностью природных нарушений (особенно растительных пожаров) определяемой региональной спецификой сезонных особенностей погоды.

Модельные модификации влияния показателей внешней среды на основные компоненты ПУБ оценки динамики потоков, обусловленных природными и антропогенными нарушениями, данные динамики землепользования, инвентаризация земельного и лесного фондов и т.д. показали что в 1988-2002 гг. растительные экосистемы России в среднем поглощали из атмосферы $520 \pm 128 \text{ Tg C} \cdot \text{год}^{-1}$, из которых 78% приходится на лесные и лесоболотные системы. Межгодовая изменчивость высока, величины годового стока углерода колебались за этот период от 180 до $750 \text{ Tg C} \cdot \text{год}^{-1}$.

Полученные результаты были сравнены с результатами инверсного моделирования на основе измерений концентраций CO_2 в атмосфере. Различия в оценках с двумя независимыми результатами [3, 5] составили 3 и 20%. Отсюда следует важный вывод: в случае полного углеродного бюджета явления "потерянного стока", широко обсуждавшегося в течение последних двух десятилетий, не существует - эта проблема рождена неполнотой анализа.

Протокол Киото превращает дополнительно накопленный углерод в рыночный товар, в том числе за счет специальных мероприятий в лесном и сельском хозяйствах. Россия имеет выдающуюся стартовую позицию в приложениях Протокола Киото как из-за снижения промышленных эмиссий после 1990-х годов, так и в силу специфики состояния и динамики ее растительных экосистем в течение первого периода действия Протокола. Исследования показывают, что системное воплощение специальной программы по секвестру углерода в лесном и сельскохозяйственных секторах может обеспечить дополнительный секвестр углерода от 200 до $600 \text{ Tg C} \cdot \text{год}^{-1}$ в течение столетия с момента начала реализации такой программы. Экономически выгодное воплощение программы наступает при цене 15 долларов США за тонну секвестрованного углерода. Реальный

объем секвестра зависит главным образом от полноты реализации мероприятий (лесоразведение, лесовосстановление, использование растительной органики для замещения ископаемого топлива в энергетических целях и др.), трудовых и финансовых возможностей создания необходимой инфраструктуры в малонаселенных районах, используемых функций риска достижения целей.

Приведенные результаты получены в рамках рассмотрения полного углеродного бюджета растительных экосистем России и предполагают, что "расходная часть" ПУБ (гетеротрофное дыхание, нарушения) будет находиться в управляемых пределах. Модели общей циркуляции атмосферы и полуэмпирические региональные климатические прогнозы свидетельствуют, что наиболее значительные изменения климата на земном шаре ожидаются в бореальной зоне России. С учетом высокой экологической пластичности основных лесообразующих пород страны эти прогнозы предполагают повышение (существенное в некоторых районах) продуктивности лесов. Однако высоковероятное увеличение частоты экстремальных погодных явлений, особенно сочетания длительных сухих и теплых периодов, порождает опасность возникновения катастрофических природных нарушений, в первую очередь лесных пожаров и вспышек размножения вредителей. Последнее десятилетие, которое было самым теплым за всю историю метеорологических наблюдений в северной Евразии, подтвердило эти опасения. Согласно спутниковым данным, растительные пожары 1998 г. наблюдались на площади $10.5 \cdot 10^6$ га, а средняя площадь сгоревших площадей за последние 5 лет составляет $8.7 \cdot 10^6$ га; подобные серии не наблюдались за всю историю мониторинга растительных пожаров в России. Количество углерода, поступившего в атмосферу вследствие пожаров 1998 г., превысило 150 Тг С. Две вспышки размножения сибирского шелкопряда последнего де-

сятилетия повредили леса на площади порядка $10 \cdot 10^6$ га.

Полученные результаты отчетливо свидетельствуют о том, что наземные экосистемы России, особенно леса [1, 6], могут сыграть значительную роль в снижении темпов глобальных изменений климата и в случае ввода в действие Протокола Киото обеспечить значительный объем зарубежных инвестиций. Однако это возможно лишь при переходе к устойчивому управлению возобновляемыми природными ресурсами и требует разработки и практического воплощения опережающей стратегии подготовки бореальных ландшафтов (в особенности лесных) к глобальным изменениям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Исаев А.С., Коровин Г.Н. В кн.: Круговорот углерода на территории России, М., 1998. С. 63-95.
2. Cramer W., Bondeau A., Woodward F.I. et al. // *Global Change Biol.* 2001. V. 7. P. 357-373.
3. House J.I., Prentice I.C., Ramankutty N. et al. // *Tellus.* 2003. V. 55B. P. 345-363.
4. Nilsson S., Shvidenko A., Stolbovoi V. et al. Full Carbon Account for Russia. Ineterim Rept IR-00-021. Laxenburg: Intern. Inst. Appl. Systems Anal. 2000. 180 p.
5. Schimmel D.S., House J.I., Hibbard K.A. et al. // *Nature.* 2001. V. 414. № 8. P. 69-172.
6. Shvidenko A., Nilsson S. // *Tellus.* 2003. V. 55B. P. 391-415.
7. Steffen W., Noble I., Canadell J. et al. // *Science.* 1998. V. 280. P. 1393-1394.
8. UN FCCC. United Nations Framework Convention on Climate Change. 1992, Available on the Internet: <http://www.unfccc.de/>
9. UN FCCC. Rept Conf. Parties III Session. 1998. Kyoto, 1-11 December 1997. Addendum. Document FCCC/CP/1997/7/Add.1. Available on the Internet: www.unfccc.org/resource/docs/cop3/01a01.pdf