

УДК 504.064.36:551.586+582.475.4

ОЦЕНКА АККУМУЛИРОВАНИЯ CO₂ СОСНОВЫМ ДРЕВОСТОЕМ
МЕТОДОМ МИКРОВИХРЕВЫХ ПУЛЬСАЦИЙ© 2002 г. О. Б. Шибистова, Д. Ллойд, О. Колле, А. Арнет, Н. М. Чебакова,
Д. А. Золотухин, Г. К. Зражевская, Э.-Д. Шульце

Представлено академиком Е.А. Вагановым 09.11.2001 г.

Поступило 26.11.2001 г.

Бореальные леса северного полушария, несмотря на относительно невысокую скорость накопления биомассы, аккумулируют значительные количества углекислого газа антропогенного происхождения [1-4].

Прямые непрерывные исследования углеродного баланса экосистем получили развитие в последние годы в связи с совершенствованием приборного и программного обеспечения метода микровихревых пульсаций (eddy covariance), основанного на регистрации высокочастотных ковариаций между вертикальной составляющей скорости ветра и концентрацией углекислого газа [5-7].

Исследования углеродного баланса одновозрастного сосняка лишайникового проводили в 1999-2000 гг. в южной подзоне средней тайги (35 км западнее п. Зотино Туруханского района Красноярского края: 60°45' с.ш., 89°23' в.д.). Возраст древостоя - 200 лет, средняя высота деревьев - 22 м, индекс листовой поверхности - 1.5 от проективного покрытия [8].

Потоки CO₂, тепла и влаги наряду с основными микрометеорологическими параметрами измеряли непрерывно на высоте 27 м (в 5 м над средней поверхностью кроны). Эмиссию CO₂ из почвы регистрировали при помощи дополнительной системы микровихревых пульсаций, установленной в 2.5 м над поверхностью почвы. Концентрацию CO₂, локализованного в кроне и пространстве между поверхностью почвы и вершиной 27-метровой вышки, определяли, используя профильную систему забора воздуха, на высоте 0.1, 1.0, 2.5, 4.0, 8.0, 10.0, 16.0 и 24.0 м. Дыхание стволов измеряли, используя модификацию метода открытой камеры [9].

Согласно микрометеорологической конвенции, чистый обмен CO₂ экосистемы выражается отрицательными величинами, если поток углекислого газа направлен в экосистему, т.е. аккумулируется растительностью. Тогда:

$$NEE = R_c - A - dC/dt, \quad (1)$$

где NEE - чистый газообмен экосистемы, R_c - дыхание всех компонентов экосистемы; A - фотосинтетическая ассимиляция CO₂ растительностью; dC/dt - изменение концентрации углекислого газа, накопленного в кроне и пространстве между поверхностью почвы и вершиной измерительной системы в ночные часы в условиях малой турбулентности. Данный параметр, равный нулю при оценке годовых значений NEE , важен для расчетов суточного газообмена.

Поскольку метод микровихревых пульсаций регистрирует интегрированные потоки CO₂, суммарное дыхание экосистемы принято рассчитывать на основе температурной параметризации величин потоков углекислого газа в ночные часы ($\Phi_{AP} < 10$ мкмоль · м⁻² · с⁻¹). Это нередко приводит к занижению результатов, полученных в условиях малой турбулентности и стабильной атмосферы. Систематическая ошибка в расчетах может привести к переоценке аккумулятивной способности экосистемы [10]. Поэтому в предложенной нами модели использовались значения ночных потоков, регистрируемых при скоростях ветра выше 2 м · с⁻¹ (составляющие 70% от всего массива данных). Предложенный метод коррекции позволил более точно оценить затраты на дыхание и избежать систематической ошибки (порядка 10%) в расчетах аккумулятивной способности экосистемы.

Температурная зависимость почвенного дыхания, параметризованная в соответствии с уравнением Ллойда-Тейлора [11], представлена на рис. 1.

$$R_g = 1.49e^{\frac{121996}{R} \left(\frac{1}{283.15} - \frac{1}{T_{5cm}} \right)}, \quad (2)$$

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

Институт биогеохимии Макса Планка,
Йена, Германия

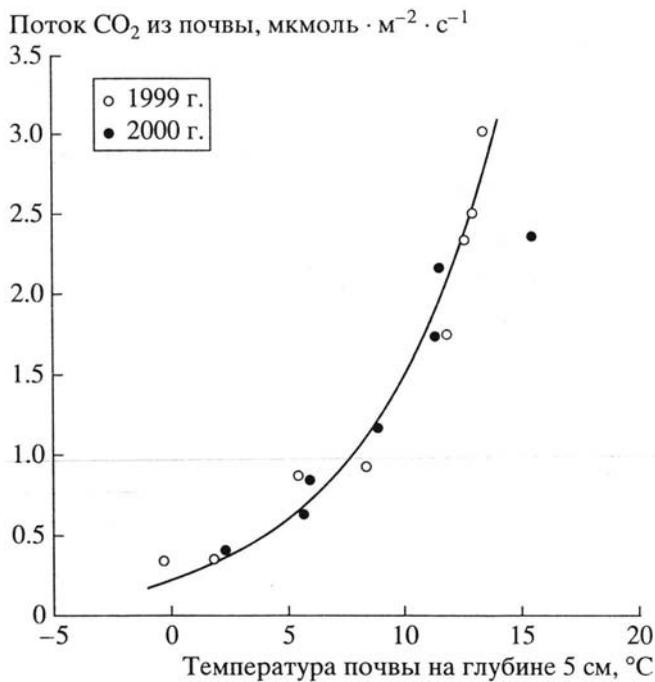


Рис. 1. Температурная зависимость почвенного дыхания.

где R_g - величина потока CO_2 с поверхности почвы; $1.49 \text{ мкмоль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ - значение R_g при 10°C ; $121\,996 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}$ - энергия активации Аррениуса; $T_{5\text{ см}}$ - температура почвы (K); R - универсальная газовая константа ($8.314 \text{ Дж} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$).

Температурные зависимости ночного дыхания стволов и кроны аппроксимированы согласно уравнениям (3) и (4) (рис. 2):

$$R_s = 0.21e^{\frac{77246}{R} \left(\frac{1}{283.15} - \frac{1}{T_{\text{stem}}} \right)}, \quad (3)$$

где R_s - величина дыхания стволов (на площадь проективного покрытия почвы); $0.21 \text{ мкмоль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ - значение R_s при 10°C , $77\,246 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}$ - энергия активации, R - универсальная газовая константа и T_{stem} - температура ксилемы в момент измерений (K);

$$R_c = 0.88e^{\frac{51946}{R} \left(\frac{1}{283.15} - \frac{1}{T_{\text{air}}} \right)}, \quad (4)$$

где R_c - величина дыхания кроны (на площадь проективного покрытия почвы); $0.88 \text{ мкмоль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ - значение R_c при 10°C ; $51\,946 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}$ - энер-

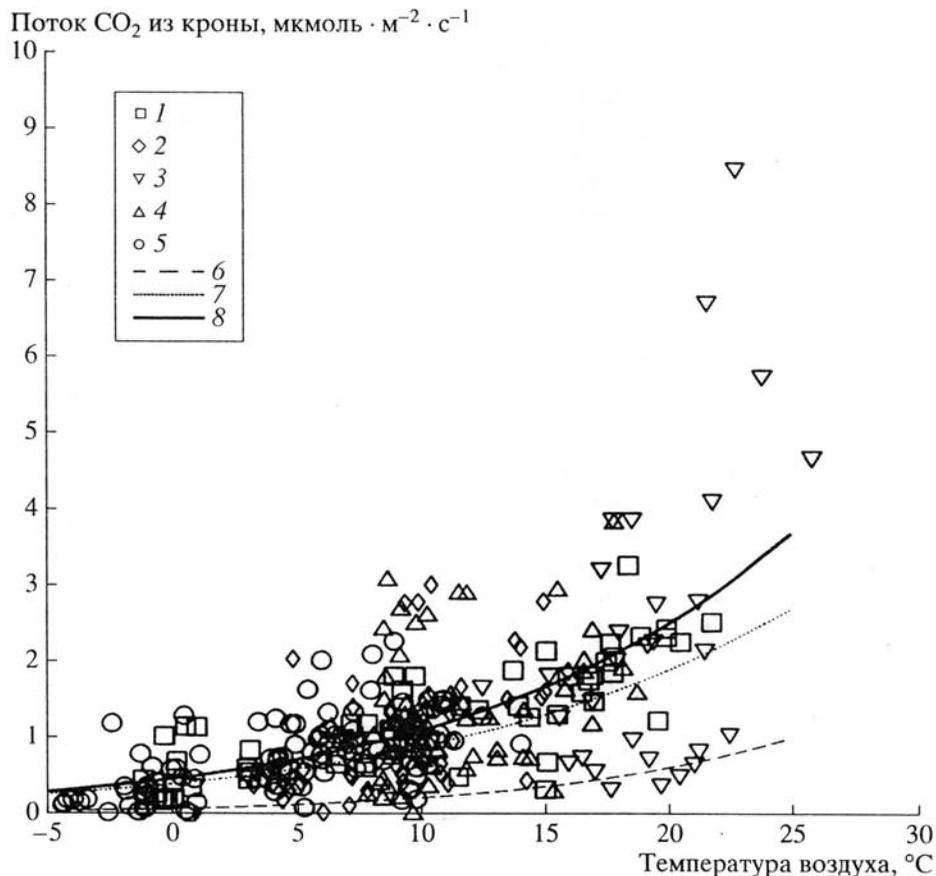


Рис. 2. Зависимость ночного дыхания стволов и кроны от температуры воздуха. 1 - май, 2 - июнь, 3 - июль, 4 - август, 5 - сентябрь, 6 - ствол, 7 - крона, 8 - общее.

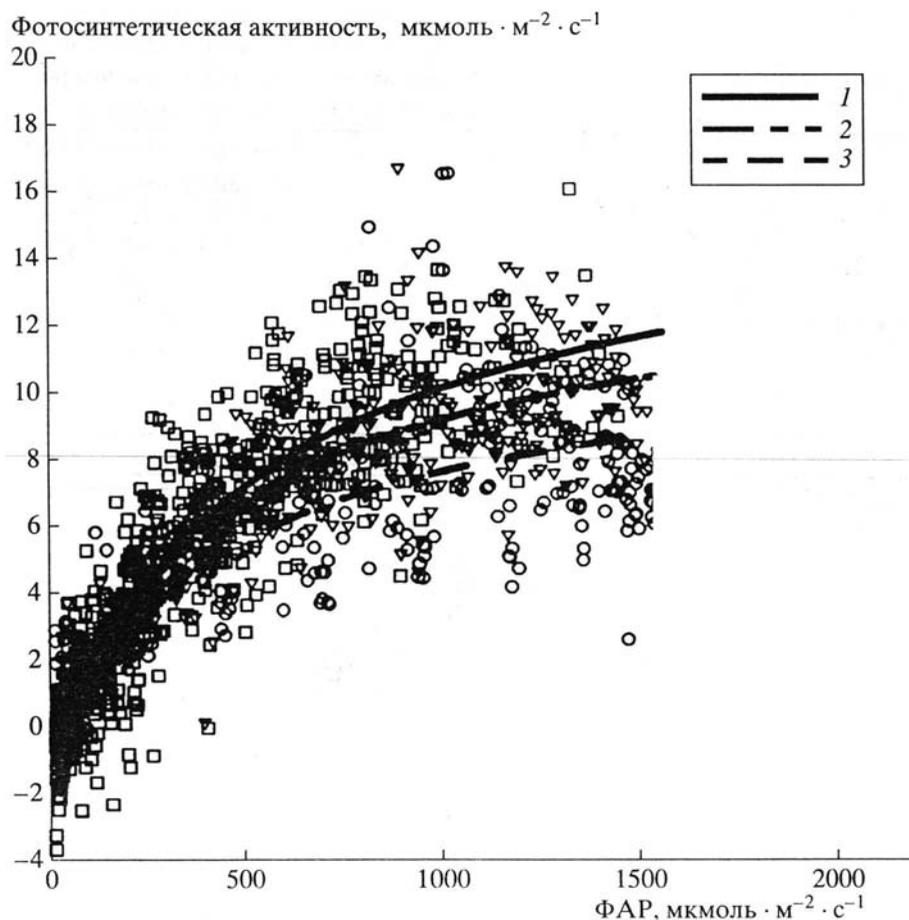


Рис. 3. Зависимость фотосинтетической активности кроны от ФАР при различных значениях дефицита водяного пара (ДВП). 1 - ДВП < 8 ммоль · моль⁻¹, 2 - ДВП < 16 ммоль · моль⁻¹, 3 - ДВП > 16 ммоль · моль⁻¹.

гия активации; R - универсальная газовая константа и T_{air} - температура воздуха (К). Различия температуры воздуха и хвои рассматривали как несущественные.

Поскольку дыхание почвы и стволов наблюдается и в дневные часы, уравнения 1, 2, 3 и 4 использовали в дальнейшем для оценки фотосинтетической активности крон. Несмотря на высокую вариабельность температуры воздуха в течение вегетационного сезона, наблюдалась четкая зависимость активности фотосинтеза от приходящей ФАР и дефицита водяного пара (рис. 3).

Зависимость, приведенная на рис. 3, использовалась для восполнения данных, утраченных в дневные часы в связи с калибровкой или дисфункцией системы:

$$A = \alpha + \frac{\beta \Phi AP}{\gamma + \Phi AP} (1 - \eta \sqrt{D}), \quad (5)$$

где эмпирические параметры α , β , γ , η были подобраны индивидуально для 10-суточных блоков данных.

Анализ интегрированных суточных потоков CO₂ показал, что в годовом цикле древостой обнаруживал значительные аккумулирующие свойства к концу мая. Фотосинтетическая деятельность продолжалась до начала октября, после чего лес вновь становился слабым источником двуокиси углерода (рис. 4).

В целом с начала мая по конец октября исследуемая экосистема представляла собой "сток" CO₂, и ее аккумулирующая активность была достаточно высока - до 0.4 моль С · м⁻² · сутки⁻¹, что вполне сравнимо с данными, приводимыми для бореальных лесов Европы и Канады [4, 10, 12]. Средняя интенсивность дыхания экосистемы в период с 1 апреля по 28 декабря 1999 г. не превышала 1.6 мкмоль · м⁻² · с⁻¹, что примерно втрое ниже значений, полученных для лесов Канады и Швеции [10, 12]. Установлено, что около 66% дыхания экосистемы составляло дыхание почвы, 16% - дыхание стволов и около 18% - ночное дыхание хвои.

Чистый газообмен экосистемы в 1999 г. составил 14 моль С · м⁻² · год⁻¹. Фотосинтетическая и

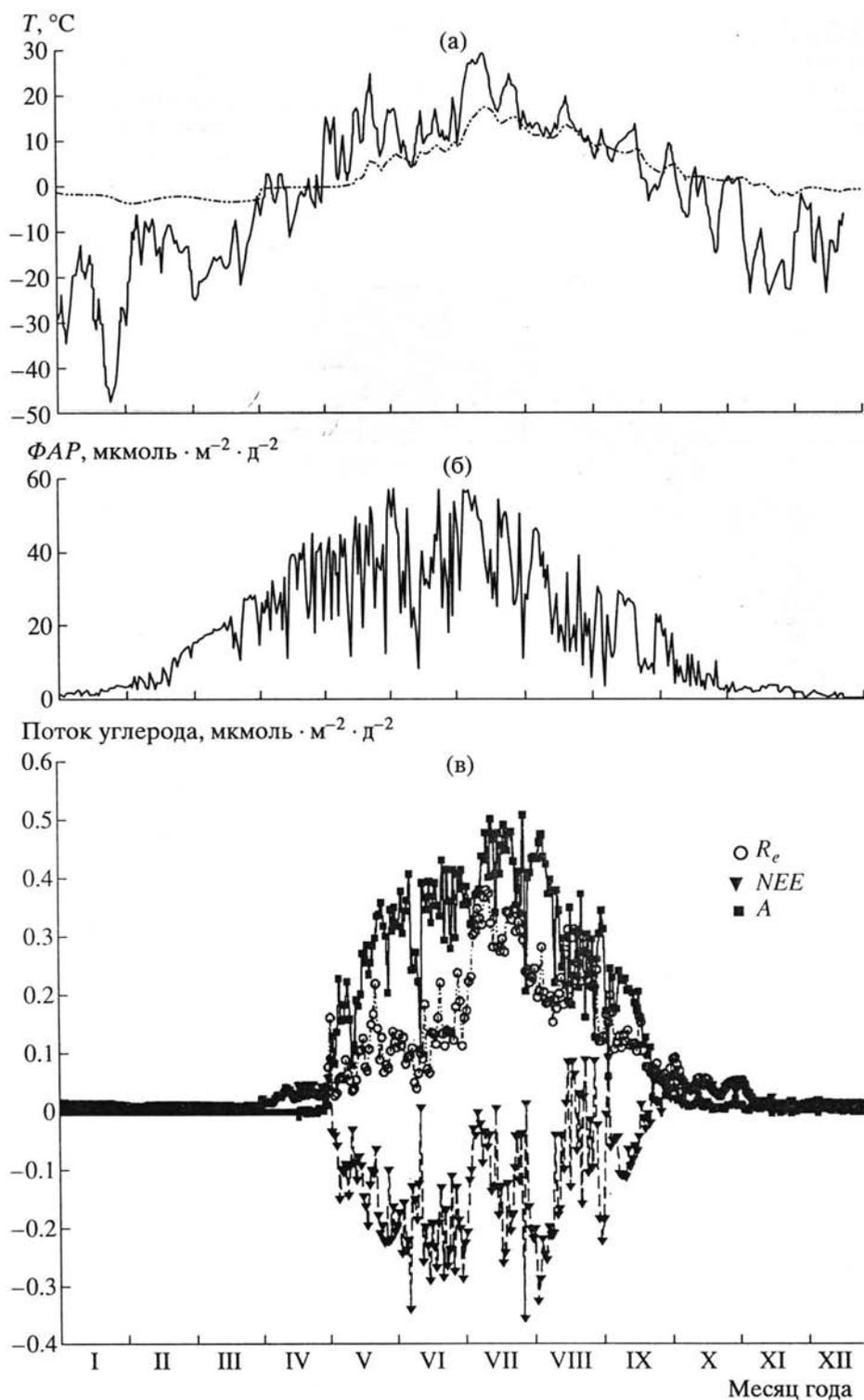


Рис. 4. Сезонная динамика температуры воздуха и почвы (а), ФАР (б), дыхания (R_e) и чистого газообмена (NEE) экосистемы (в). A - фотосинтетическая ассимиляция.

дыхательная активности при этом равнялись 45 $\text{моль С} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$ и 31 $\text{моль С} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$ соответственно. В 2000 г. NEE был равен 15 $\text{моль С} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$, несмотря на то, что как фотосинтез, так и дыхание

были несколько выше: 48 $\text{моль С} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$ и 33 $\text{моль С} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$ соответственно.

Таким образом, на основании прямых измерений потоков углекислого газа методом микрови-

хревых пульсаций было показано, что исследуемый древостой является существенным аккумулятором атмосферного CO₂. За изучаемый период накопление углерода составило в среднем 1.8 т · год⁻¹ на гектар лесной площади.

Работа выполнена в сотрудничестве с Институтом Макса Планка (Йена, Германия) в рамках Международного проекта EUROSIBERIA CARBON FLUX.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ciais P., Tans P.P., White J.W. et al.* // J. Geophys. Res. 1995. V. 100. P. 5051-5070.
2. *Tans P.P., Fung I.Y., Takahashi T.* // Science. 1990. V. 247. P. 1431-1438.
3. *Lloyd J.* // Funct. Ecol. 1999. V. 13. P. 439-459.
4. *Schulze E.-D., Lloyd J., Kelliher F. et al.* // Global Change Biol. 1999. V. 6. P. 703-722.
5. *Паунер Ю.Л.* Тепловой баланс растительного покрова. Л.: Гидрометеиздат, 1972. 210 с.
6. *Wofsy S.C., Goulden J.W., Munger S.-M. et al.* // Science. 1993. V. 260. P. 1314-1317.
7. *Aubinet M., Grelle A., Ibrom A. et al.* // Adv. Ecol. Res., 2000. V. 30. P. 113-175.
8. *Wirth Ch., Schulze E.-D., Schulze W. et al.* // Oecologia. 1999. V. 121. P. 66-80.
9. *Low B.E., Ryan M.G., Anthoni P.M.* // Global Change Biol. 1999. V. 5. P. 169-182.
10. *Goulden M.L., Daube B.C., Fan S.-M. et al.* // J. Geophys. Res. 1997. V. 102. P. 28987-28996.
11. *Lloyd J., Taylor J.A.* // Funct. Ecol. 1994. V. 8. P. 315-323.
12. *Jarvis P.G., Massheder J.M., Hale S.E. et al.* // J. Geophys. Res. 1997. V. 102. P. 28953-28986.