

УДК 57.087

ОЦЕНКА И МИНИМИЗАЦИЯ ОШИБОК ПРИ ИЗМЕРЕНИИ ДЫХАНИЯ ПОЧВЫ ПО ОТКРЫТОЙ СХЕМЕ

© 2009 Ф.А. Татаринов¹, А.Г. Молчанов², А.В. Ольчев¹

¹ Институт проблем экологии и эволюции им. Северцова РАН, Москва, Россия;
e-mail: pedro2005@rambler.ru

² Институт лесоведения РАН, Успенское, Московская область, Россия

Аннотация: Проведена аналитическая и экспериментальная оценка ошибки камерного измерения дыхания почвы по открытой схеме, связанной с подсосом почвенного воздуха в камеру за счет разницы давлений внутри камеры и в окружающем воздухе и приводящей к значительному завышению величины измеряемого почвенного дыхания. Получено, что скорость подсоса почвенного воздуха гиперболически снижается при уменьшении разницы давлений в камере и в окружающем воздухе. В рамках исследования разницы давлений регулировалась путем увеличения площади входных отверстий почвенной камеры. Получена оценка минимальной площади входных отверстий камеры, при заданной скорости протока воздуха, необходимая для получения корректных данных по почвенному дыханию при открытой схеме.

Ключевые слова: эмиссия CO_2 , дыхание почвы, камерные методы, открытая схема.

ВВЕДЕНИЕ

Дыхание почвы является одним из важнейших компонентов углеродного баланса экосистемы [3, 7]. Поэтому его корректное измерение является важной задачей в рамках экосистемных исследований. Наиболее распространенными методами измерения почвенного дыхания являются камерные методы, при которых участок почвы накрывается камерой и исследуется динамика концентрации CO_2 внутри нее [4, 6]. Камерные измерения газообмена обычно проводятся по двум схемам: закрытой и открытой. При закрытой схеме (Рис. 1а) не происходит обмена воздуха между камерой и атмосферой. При этом воздух обычно непрерывно прокачивается по замкнутому циклу через камеру и газоанализатор. Такая схема реализована, например, в почвенных камерах фирмы Li-Cor LI-6400 и LI-8100 [5]. Возможен и вариант, при котором не используется помпа для прокачки воздуха. При этом из камеры с определенной периодичностью отбираются пробы воздуха и потом анализируются в лаборатории [1]. При этом дыхание (R) определяется по скорости изменения концентрации CO_2 в камере ($C_{chamber}$):

$$R \sim \frac{V}{S} \frac{\partial C_{chamber}}{\partial t},$$

где V – объем камеры и S – площадь почвы в пределах камеры.

Замкнутая схема является довольно надежной при проведении измерений почвенного дыхания. Однако ее использование для непрерывных измерений сопряжено с необходимостью регуля-

ного проветривания камеры после каждого измерения, что затрудняет организацию непрерывных автоматических измерений в полевых условиях.

При открытой схеме воздух непрерывно прокачивается через камеру, проходит через газоанализатор и выбрасывается в атмосферу, при этом дыхание рассчитывается по формуле:

$$R = F \frac{C_{chamber} - C_{air}}{S}, \quad (1)$$

где C_{air} – концентрация CO_2 в приземном слое воздуха и F – скорость потока воздуха через камеру. Открытая схема удобна тем, что легко позволяет проводить круглосуточные автоматические измерения без участия оператора. Одним из недостатков данной схемы является ошибка измерений, связанная с искусственным подсосом в камеру почвенного воздуха с высокой концентрацией CO_2 . Дело в том, что сопротивление потоку воздуха внутрь камеры через почву обычно многократно превосходит сопротивление воздуху, проходящему через входные отверстия камеры. Учитывая, что насос, прокачивающий воздух в систему, расположен после камеры (т.е. работает на отсос воздуха из камеры), давление воздуха в камере будет несколько ниже, чем в атмосфере. В этом случае воздух будет поступать в камеру двумя параллельными путями, как через входные отверстия камеры, так и через почву. Т.о., к диффузии CO_2 из почвы, соответствующей измеряемому дыханию R , добавляется дополнительный привнос CO_2 из почвы за счет разницы давлений, что ведет к завышению $C_{chamber}$, а соответственно и R [8]. Задача данной

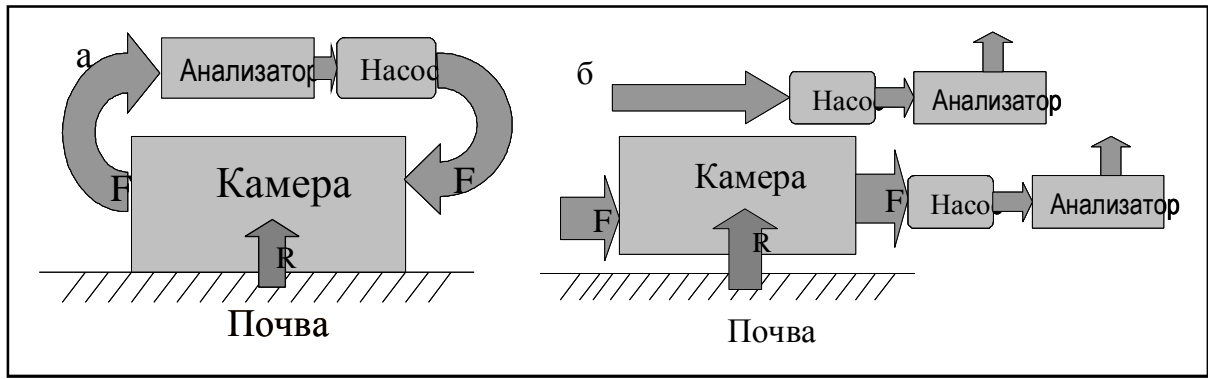


Рис. 1. Схема замкнутой (а) и открытой (б) схем измерения дыхания почвы. F - поток воздуха через камеру, R - эмиссия CO₂ из почвы.

работы – оценить эту ошибку и условия, при которых она не будет превышать допустимых значений.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И АНАЛИТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ

Рассмотрим камеру, которая установлена на поверхности почвы так, чтобы исключить прохождение воздуха между почвой и краем камеры. В ней имеется *n* входных отверстий площадью *s* каждое (т.е. площадь всех входных отверстий *n*·*s*). Из камеры насосом засасывается воздух в газоанализатор. Взамен в камеру поступает самотеком воздух из атмосферы и из почвы. Сопротивление отверстий в камере и почвы обо-

значим как *r_{in}* и *r_{soil}*, причем $r_{in} = \frac{k}{n \cdot s}$, где *k* – константа. Тогда для потока воздуха в камеру в линейном приближении можем записать:

$$F = (P_{air} - P_{chamber}) \left(\frac{1}{r_{soil}} + \frac{n \cdot s}{k} \right) \quad (2)$$

Запишем также баланс CO₂ на выходе из камеры и на входе в нее:

$$c_{chamber} \cdot F = C_{air} \cdot F + R \cdot S + b \frac{P_{air} - P_{chamber}}{r_{soil}} \quad (3)$$

Здесь *b* – коэффициент вовлечения дополнительного CO₂ за счет подсоса из почвы. В правой части первый член соответствует притоку CO₂ с атмосферным воздухом, второй – истинному дыханию почвы, и третий – притоку CO₂ за счет подсоса воздуха из почвы. Исключая из (3) разность давлений за счет выражения для потока (2), получаем:

$$(C_{chamber} - C_{air}) = \frac{R \cdot S}{F} + \frac{b}{r_{soil} \cdot \left(\frac{1}{r_{soil}} + \frac{n \cdot s}{k} \right)} \quad (4)$$

Уравнение (4) демонстрирует как убывание концентрации с ростом числа входных отверстий (или их общей площади), так и то, что считая $R = F \frac{C_{chamber} - C_{air}}{S}$, мы переоцениваем дыхание, а увеличение *n* приводит к более точной оценке. Относительную ошибку измерения, считая точным значением $(C_{chamber} - C_{air})_{true} = R \cdot S / F$, можно оценить так:

$$err = \frac{(C_{chamber} - C_{air}) - (C_{chamber} - C_{air})_{true}}{(C_{chamber} - C_{air})_{true}} = \frac{b \cdot F \cdot k}{R \cdot S \cdot (k + n \cdot s \cdot r_{soil})} \quad (5)$$

Обозначим для краткости $r = R \cdot S / F$, общую площадь отверстий через $S_{in} = n s$ и отношение сопротивлений почвы и отверстия единичной площади $k_r = r_{soil} / k$. Тогда получим:

$$(c_{chamber} - C_{air}) = r + b / (1 + S_{in} \cdot k_r) \quad (6)$$

или

$$(c_{chamber} - C_{air}) = r + b / (1 + n \cdot d) \quad (7)$$

где $d = s \cdot r_{soil} / k$ есть отношение притока воздуха через отверстие и через почву.

Эти дробно-линейные зависимости имеют 3 параметра, которые можно определить с помощью уравнения регрессии, измеряя концентрации CO₂ при разных *S_{in}* или *n*.

Согласно уравнению (5), ошибка будет возрастать с уменьшением дыхания *R*. Параметр *b*, определяющий приток CO₂ за счет подсоса воздуха из почвы, зависит от распределения CO₂ в почве (что в свою очередь зависит от *R*), а также от ее аэродинамических свойств, поэтому рассчитать аналитически его практически невозможно. Однако в самом первом приближении можно считать, что $b \sim R / r_{soil}$. Тогда в уравнении (5) *R* сокращается, т.е. ошибка оказывается независимой от дыхания.

Следует отметить два момента, касающихся вышеприведенных выкладок.

1. Поскольку, если пользоваться электрической аналогией, $\Delta P = F \cdot r_{total}$ и $\frac{1}{r_{total}} = \frac{1}{r_{soil}} + \frac{1}{r_{in}}$,

где ΔP - разность давлений в камере и в атмосфере, то уменьшение r_{in} за счет увеличения S_{in} ведет к снижению ΔP , что является целью ряда усовершенствований открытой схемы [8].

2. Вышеприведенные выкладки предполагают одинаковую концентрацию CO_2 в пределах камеры, т.е. идеальное перемешивание воздуха в камере, что может и не достигаться без дополнительного вентилятора в камере.

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ДИФФУЗИИ CO_2 ПРОТИВ ТОКА ВОЗДУХА

Еще одним возможным источником ошибки является диффузия CO_2 из камеры против тока воздуха. Поскольку концентрация CO_2 в камере выше, чем в воздухе, пойдет диффузия CO_2 из камеры наружу через входные отверстия. Если линейная скорость этой диффузии будет выше, чем скорость входящего воздуха, концентрация CO_2 в камере будет занижена.

Диффузия описывается законом Фика:

$$F_c = -D \frac{dC}{dx} \quad (8)$$

где F_c - это диффузионный поток CO_2 , D - коэффициент диффузии, C - концентрация CO_2 , а x - расстояние.

Коэффициент в общем случае зависит от температуры (T : °C) и давления (P : hPa):

$$D = D_{std} \cdot \left(\frac{T + 273}{273}\right)^{n_1} \cdot \left(\frac{1013}{P}\right)^{n_2} \quad (9)$$

где D_{std} - коэффициент диффузии при стандартных условиях, а n_1 и n_2 - константы [2]. Для CO_2 D_{std} , n_1 и n_2 равны соответственно $1,39 \times 10^{-5} \text{ м}^2\text{с}^{-1}$, 1,75 и 1.

Если взять температуру в 15°C, давление 1013 hPa и градиент концентрации CO_2 в 100 ppm на 5 мм, получим диффузию $0,58 \text{ мг } CO_2 \cdot \text{м}^{-2}\text{с}^{-1}$. Разделив ее на плотность CO_2 в воздухе (при нормальных условиях и концентрации в 500 ppm она составляет $950 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3}$), получим линейную скорость диффузии $0,61 \text{ мм} \cdot \text{с}^{-1}$. В то же время линейная скорость потока воздуха в камеру при $F = 1 \text{ л} \cdot \text{мин}^{-1}$ и пяти входных отверстиях по 4 мм диаметром с общей площадью $0,63 \text{ см}^2$ составит $0,27 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$, т.е. более чем на два порядка выше.

ЭМПИРИЧЕСКАЯ ПРОВЕРКА

В мае и июле 2009 г. в Серебряноборском лесничестве и Центральном-лесном государственном природном биосферном заповеднике (ЦЛГПБЗ) было проведено несколько экспериментов по измерению зависимости $C_{chamber}(S_{in})$. Эксперименты проводились при помощи газоанализатора LI-820 фирмы Li-Cor. В камере было проделано от одного до 11 входных отверстий диаметром 6 мм. Измерения проводились при скорости потока $0,9 \text{ л} \cdot \text{мин}^{-1}$. Во всех случаях получена очень хорошая аппроксимация зависимости $(C_{chamber} - C_{air})(n)$ по формуле (6) (Рис. 2).

Рисунок показывает, что во всех случаях с ростом количества (или площади) входных от-

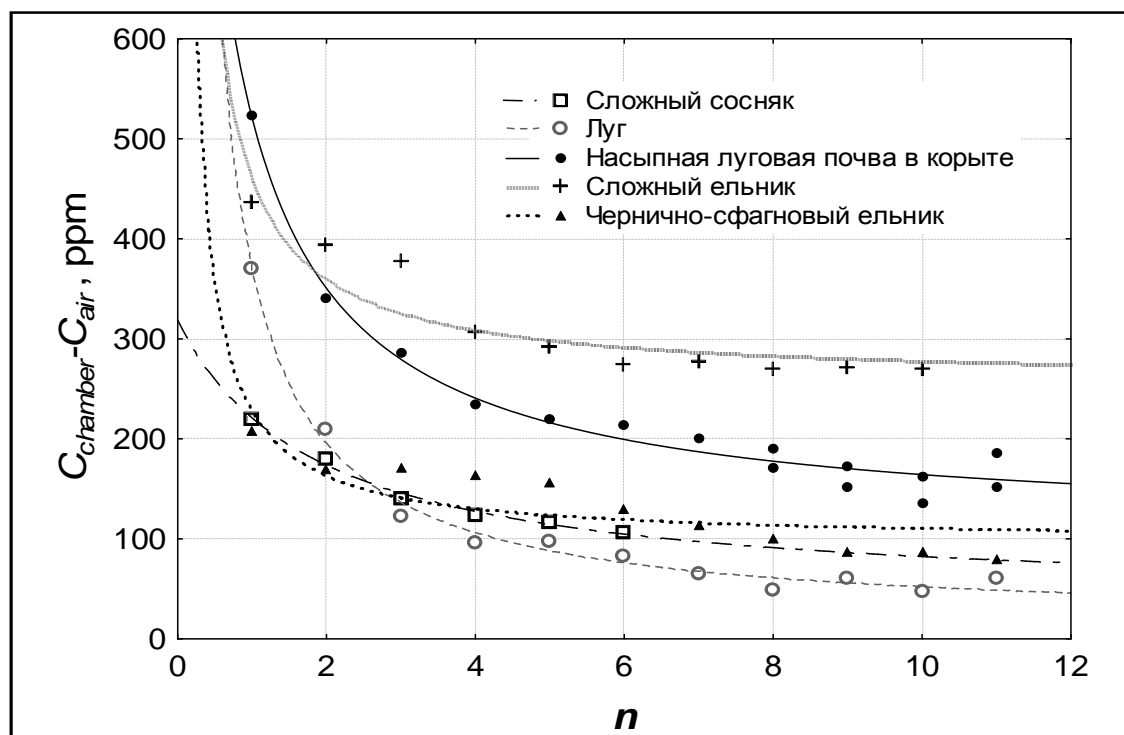


Рис. 2. Зависимость разности концентраций CO_2 в камере и в воздухе от количества входных отверстий (диаметр отверстий 6 мм). Аппроксимация данных по формуле (6).

верстий ($C_{chamber} - C_{air}$) снижается, асимптотически приближаясь к некоторому постоянному уровню, соответствующему реальному почвенному дыханию при данных условиях. Причем во всех случаях, кроме измерений в сфагновом ельнике ЦЛГПБЗ, ($C_{chamber} - C_{air}$) практически стабилизируется в камере с 4-6 входными отверстиями (110-170 мм²). Т.е. в практических целях такую площадь отверстий можно считать достаточной для получения достоверных значений R при скорости прокачивания воздуха через камеру порядка 1 л•мин⁻¹. Продолжающееся до конца эксперимента снижение ($C_{chamber} - C_{air}$) в сфагновом ельнике связано, видимо, с относительно низким r_{soil} в нем. Качество аппроксимации данных уравнением (7) в разных экспериментах колебалось в пределах $0,85 < r^2 < 0,99$, только в сфагновом ельнике оно было $r^2 = 0,67$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенных исследований показывают, что увеличение площади входных отверстий камеры ведет к снижению ошибки измерения почвенного дыхания за счет подсоса воздуха из почвы. Получено, что при их общей площади больше 170 мм² для камеры площадью около 200 см² и объемом около 2.5 л концентрация CO₂ в камере практически стабилизируется, т.е. данная ошибка становится незначительной. Использование камер с небольшой площадью входных отверстий может привести к многократной переоценке выноса CO₂ с поверхности почвы.

Авторы выражают глубокую признательность Сысоеву Н.Е. за ценные консультации в области механики жидкостей и газов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лопес де Гереню В.О., Курганова И.Н., Замолодчиков Д.Г., Кудяров В.Н. Методы количественной оценки потоков диоксида углерода из почв // Методы исследований органического вещества почв. М.: Россельхозакадемия – ГНУ ВНИПТИОУ. 2005. С. 408-425.
2. Campbell G.S. Soil physics with BASIC: transport models for soil-plant systems. Amsterdam: Elsevier, 1985.
3. Grace J., Rayment M. Respiration in the balance. Nature. 2000. V. 404 P. 819–820.
4. LI-COR Biosciences, Application Note 124. Considerations for measuring ground CO₂ fluxes with chambers. LI-COR Biosciences. 1998. Lincoln, NE, USA.
5. Madsen R. A., Demetriades-Shah T. H., Garcia R. L., McDermitt D. K. Soil CO₂ Flux Measurements: Comparisons Between the LI-COR LI-6400 and LI-8100. LI-COR Biosciences. 2006. Lincoln, NE, USA (www.licor.com).
6. Pumpanen J., Kolari P., Ilvesniemi H., Minkkinen K., Vesala T., Niinisto S., Lohila A., Larmola T., Morero M., Pihlatie M., Janssens I. A., Yuste J. C., Grunzweig J. M., Reth S., Subke J. A., Savage K., Kutsch W., Ostreng G., Ziegler W., Anthoni P., Lindroth A., Hari P. Comparison of different chamber techniques for measuring soil CO₂ efflux // Agricultural and Forest Meteorology. 2004. V. 123. P. 159–176.
7. Raich J.W., Potter C.S. Global patterns of carbon dioxide emissions from soils // Global Biogeochem. Cycles. 1995. V. 9. P. 23–36.
8. Rayment M. B., Jarvis P. G. An improved open chamber system for measuring soil CO₂ effluxes in the field // J. Geophys. Res. 1997. V. 102(D24). P. 779–784.

ESTIMATION AND MINIMISATION OF ERRORS OF SOIL RESPIRATION MEASUREMENT USING OPEN SCHEME

© 2009 F.A. Tatarinov¹, A.G. Molchanov², A.V. Oltchev¹

¹Severtsov Institute of Ecology and Evolution Problems of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia; e-mail: pedro2005@rambler.ru

²Institute of Forestry of Russian Academy of Sciences, Uspenskoye, Moscow region, Russia

The analytical and experimental estimation of error of chamber measurements of soil respiration using open scheme, caused by the air infiltration into the chamber from soil due to the difference in air pressure inside the chamber and in ambient air. This error may lead to the significant overestimation of measured soil respiration. It was obtained that the air infiltration from soil decreases hyperbolically under decreasing difference of air pressure inside and outside of chamber. Within the frame of the study the pressure difference was regulated by the increase of the area of chamber inlets. The estimation of minimal inlets area under the given air flux necessary for the correct soil respiration measurement with open scheme was obtained.

Key words: CO₂ emission, soil respiration, chamber methods, open path.