

ББК 40.3  
М 54  
УДК 631.417:613.42

**Методы исследований органического вещества почв.** М.:  
Россельхозакадемия – ГНУ ВНИПТИОУ, 2005 г., 521 с.

В сборнике представлены материалы, отражающие современные методологические и методические подходы к оценке гумусного состояния почв, изучению состава и свойств гумусовых веществ, круговорота и баланса углерода в естественных и антропогенных экосистемах, разработке моделей динамики изменения содержания органического вещества в почвах.

Показано состояние и основные пути оптимизации режима органического вещества в почвах при их сельскохозяйственном использовании.

Материалы сборника могут быть использованы научными работниками, преподавателями ВУЗов, специалистами агрохимслужбы, аспирантами, студентами в проведении исследований по изучению динамики и трансформации органического вещества почв.

Редакционная коллегия:

- А.И. Еськов,** директор ГНУ ВНИПТИОУ Россельхозакадемии,  
доктор с.-х. наук  
**В.А. Черников,** доктор с.-х. наук, профессор МСХА  
им. К.А. Тимирязева  
**С.М. Лукин,** зам. директора ГНУ ВНИПТИОУ Россельхозакадемии,  
канд. с.-х. наук  
**И.В. Русакова,** зав. лабораторией, ГНУ ВНИПТИОУ Россельхозакадемии,  
канд. биол. наук

М 54  
ISBN 5-85941-196-0

© Российская академия  
сельскохозяйственных наук  
© ГНУ ВНИПТИОУ  
Россельхозакадемии

## Предисловие

Показатели гумусного состояния почв, состава и свойств органического вещества используются для решения общих и частных, фундаментальных и прикладных проблем почвоведения, экологии, земледелия.

Огромное природное разнообразие органических соединений, их полидисперсность и полифункциональность обуславливают разработку различных методов их изучения в соответствии с конкретными целями и задачами.

В последние годы в научной литературе возрастает интерес к разработке новых методических подходов к оценке гумусного состояния почв, изучению состава и свойств гумусовых веществ, разработке математических моделей динамики изменения содержания органического вещества в почвах, изучению круговорота и баланса углерода в экосистемах, особенно в связи с проблемой глобального изменения климата, а также антропогенной деградации почв.

В настоящем сборнике представлены доклады участников симпозиума «Методы исследований органического вещества почв», состоявшегося во Всероссийском научно-исследовательском, конструкторском и проектно-технологическом институте органических удобрений и торфа Россельхозакадемии 27-28 мая 2005 года.

В первой главе обсуждается новая, уточненная и расширенная система показателей гумусного состояния почв. Введение ряда дополнительных показателей с расширением числа их градаций позволяет более полно отразить реальное разнообразие почв и дать оценку тех или иных проводимых агротехнических мероприятий в отношении их влияния на эти показатели.

Проблема регулирования гумусного состояния пахотных почв очень актуальна и сложна, т.к. в этих почвах с усилением антропогенной нагрузки возрастает число факторов, определяющих это состояние.

С агрономической точки зрения наибольшее значение имеют функциональные свойства гумуса, для реализации которых ключевую роль играют лабильные, наиболее реакционно-способные соединения.

Разработанная модель гумусного состояния почв Лесостепи Поволжья может использоваться для усовершенствования структуры севооборотов, систем удобрения с целью получения максимальной продуктивности пашни с наименьшими экономическими и экологическими затратами.

Показано изменение содержания гумуса в пахотных почвах различных регионов России, а также приведена методика исследований по

## МЕТОДЫ КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ ПОТОКОВ ДИОКСИДА УГЛЕРОДА ИЗ ПОЧВ

В.О. Лопес де Гереню, И.Н. Курганова, Д.Г. Замолодчиков,  
В.Н. Кудеяров

### Введение

Подписание правительством России Киотского протокола требует точного подсчета всех источников и объема связывания (сinks) углекислого газа ( $\text{CO}_2$ ) на территории нашей страны. Почвенный покров является основным природным генератором и источником  $\text{CO}_2$  поступающего в атмосферу и включающегося в циклы воздушной циркуляции (Заварзин, 1993; Глазовская, 1996). Прогноз изменения содержания в атмосфере углекислого газа строится на расчетах баланса углерода, который определяется, главным образом, соотношением между поглощением (связыванием)  $\text{CO}_2$  наземной растительностью и выделением углекислого газа, прежде всего при дыхании почв (Глазовская, 1996; Kudeyarov and Kurganova, 1998). Поэтому для балансовых расчетов важно произвести точную оценку всех составляющих углеродного цикла, как в глобальном масштабе, так и для отдельных зон, поясов и регионов. В связи с этим, в настоящее время, особое внимание должно уделяться методам количественного определения потоков  $\text{CO}_2$  из почв различных экосистем.

### Анализ современных методов определения эмиссии $\text{CO}_2$ из почв

Методы определения эмиссии  $\text{CO}_2$  из почв и интенсивности дыхания почвы\* (ИДП) можно разделить на прямые и косвенные. Косвенные методы позволяют грубо оценить эмиссию диоксида углерода за большие периоды времени и основаны на определении потерь органического углерода из почв и подстилки, с последующим расчетом выделившегося  $\text{CO}_2$  (Singh, 1977). К методам прямого определения почвенного дыхания относятся диффузионные (de Jong et al., 1972; Rolston, 1978;) и камерные (Lundegardh, 1924; Штатнов, 1952; Макаров, 1977; Ларионова и др., 1993). Наиболее часто применяемой разно-

видностью диффузионного метода является профильный метод, который позволяет определять интенсивность дыхания почв по градиенту концентрации и коэффициенту диффузии  $\text{CO}_2$  в почве (Каспаров и др., 1986; Ларионова и др., 1988). Другой разновидностью диффузионного метода является аэродинамический метод (Lemon, 1967; Kimball et al., 1970; Nakayama et al., 1988), используемый в лесных биогеоценозах, где турбулентный обмен не является основной движущей силой газообмена в воздухе. При использовании этого метода ИДП также рассчитывается на основе законов диффузии (Комиссарова, 1988), а градиент концентрации  $\text{CO}_2$  определяется при помощи высокоточных инфракрасных газоанализаторов. Диффузионные методы предпочтительны при стационарных исследованиях, поскольку позволяют определить ИДП, не нарушая растительного покрова. Вместе с тем эти методы имеют ограничения. Это необходимость определения дополнительных переменных - коэффициента диффузии  $\text{CO}_2$  в почве и коэффициента турбулентного обмена в атмосфере. Кроме того, промерзание почвы и наличие снежного покрова в зимний период также затрудняют применение диффузионных методов.

Камерный статический метод определения ИДП по накоплению диоксида углерода в камере - изоляторе, предложенный ещё Лундегордом (1924), имеет множество модификаций и является в настоящее время самым популярным в силу своей простоты и удобства. В России наиболее распространено применение закрытых камер, хотя результаты, полученные при их применении, дают недооценку величины потоков  $\text{CO}_2$  из почвы по сравнению с открытыми камерами в среднем на 10% (Rayment, 2000). Ранние модификации камерного метода получили название "абсорбционного метода", поскольку выделяющийся из почвы углекислый газ абсорбировался щелочью, которую после определенного времени экспозиции подвергали титриметрическому анализу. В современных модификациях камерного метода изменение концентрации углекислого газа в камерах определяют при помощи портативных инфракрасных газоанализаторов или стационарными хроматографами после отбора газовых проб через определенные промежутки времени. Большинство данных по оценке потоков  $\text{CO}_2$  из почв различных экосистем, опубликованных в отечественной и зарубежной литературе, получены именно камерным методом (Курганова, Кудеяров, 1998). Для корректного применения метода закрытых камер, как в полевых, так и в лабораторных условиях, прежде всего, необходимо правильно подобрать время экспозиции, в течение которого концентрация  $\text{CO}_2$  в камере-изоляторе будет возрастать линейно. Очевидными ограничениями при использовании этого метода являются трудоемкость и

\* Оценка эмиссии  $\text{CO}_2$  с поверхности почв в большинстве случаев совпадает с величиной общего дыхания почв, хотя эти понятия характеризуют различные процессы (Кудеяров, 1999).

точечность (отсутствие непрерывности) проводимых измерений, малый размер пробных площадей и невозможность прямой оценки балансовых потоков в лесных и некоторых других типах экосистем. В солнечную погоду температура в камере в течение часа может подниматься на 10-15°C, что вносит значительные погрешности в измерения. Поэтому камеры должны быть светлоокрашенными и защищенными от прямого солнечного света, например, экранами. В снежный и морозный период применение камерного метода также имеет свои трудности. Во-первых, отрицательные температуры воздуха исключают использование абсорбционного метода из-за замерзания раствора щелочи. Во-вторых, ИДП в зимний период снижается в 5-10 раз, что приводит к значительному увеличению времени экспозиции. В-третьих, при нарушении снежного покрова происходит мгновенный выброс углекислого газа, а затем нарушенный снег начинает активно сорбировать CO<sub>2</sub>, выделяющийся из почв, занижая реальную скорость эмиссии. И если в начале зимы рыхлый снежный покров практически не оказывает сопротивления потоку углекислого газа из почвы, то во время оттепелей или к концу зимы в нем образуются ледяные прослойки, он уплотняется и затрудняет газообмен между почвой и атмосферой. Всё это требует от исследователя в зимний период предельной аккуратности и точности. Анализ литературы показал, что зимнее дыхание почв определяют так же либо модифицированным абсорбционным методом (Adam and Stahr, 1997), либо используя концентрационный и диффузионный коэффициенты (Zimov *et al.*, 1993; Burton and Beauchamp, 1994), либо кюветным методом (Cuvette method, Pajary, 1995) с окончанием на инфракрасном газоанализаторе.

В последние десятилетия для определения потоков CO<sub>2</sub> в сочетании с камерами - изоляторами применяются портативные и весьма чувствительные инфракрасные газоанализаторы, например LI-COR 6200 (Oechel, 1997; Замолотчиков и др., 1999, 2000, 2003). Их использование позволяет уменьшить время экспозиции (до 1 - 5 минут в зависимости от сезона измерений) и тем самым избежать увеличения температуры воздуха внутри камеры. Однако инфракрасные анализаторы не могут работать на морозе и требуют обогрева. Во время единичного измерения с использованием LI-COR пробный участок размером около 40x40 см герметично накрывается камерой, прозрачной для фотосинтетически активной солнечной радиации. По изменению концентрации углекислого газа в объеме камеры за время экспозиции рассчитывается величина его потока (Замолотчиков, 2003). Значения эмиссии CO<sub>2</sub> при естественном освещении служат оценкой балансового потока углерода (Net Ecosystem Exchange, NEE), а использование

непрозрачных камер позволяет оценить валовое дыхание экосистемы (Ecosystem Respiration, *ER*). Разность этих величин представляет собой оценку валовой первичной продукции (Gross Primary Production, *GPP*). Таким образом, применение прозрачных и затемненных камер позволяет использовать метод закрытых камер не только для измерения почвенного потока CO<sub>2</sub>, но и для оценки баланса углерода в экосистеме.

Со второй половины 90-х годов и за рубежом, и в России (в рамках международных проектов) для количественной оценки потоков CO<sub>2</sub> в экосистемах все чаще используется микрометеорологический метод (eddy-covariance), называемый также методом турбулентной ковариации, позволяющий сразу оценивать величину углеродного обмена экосистемы в целом (Valentini *et al.*, 2000; Arneeth *et al.*, 2001; Замолотчиков и др., 2003). Математическая теория метода базируется на законе сохранения вещества в единице объема воздуха, из которого после преобразования при ряде допущений следует, что по ковариации флуктуаций вертикальной скорости ветра и концентраций химического вещества можно рассчитать поток вещества на граничном слое экосистема-атмосфера. Указанные флуктуации вертикальной скорости ветра и концентрации газообразного вещества происходят с частотой порядка десятков герц, поэтому для их регистрации используется точное и чувствительное оборудование. Флуктуации вертикальной скорости ветра измеряются ультразвуковым анемометром, в то время как газовый анализатор выбирается в зависимости от вида газообразного вещества. При проведении микрометеорологических измерений потоков углекислого газа хорошо зарекомендовали себя открытые инфракрасные анализаторы. Площадь участка, баланс которого измеряется методом турбулентной ковариации, определяется высотой размещения измерительного оборудования.

Микрометеорологический способ измерения потоков парниковых газов обладает рядом несомненных достоинств при длительных стационарных наблюдениях. К ним можно отнести непрерывность получения данных, минимальное воздействие на изучаемый природный объект, значительный пространственный масштаб оцениваемого объекта. Теория метода, однако, базируется на ряде существенных допущений, далеко не всегда выполняющихся на практике. К недостаткам данного метода, сдерживающим его широкое распространение, следует отнести высокую стоимость оборудования. При этом аппаратура должна быть постоянно подключена к электрическим сетям, защищена от воздействия климатических факторов, а в холодный период года требует обогрева.

## Сравнительная оценка методов определения потоков CO<sub>2</sub> из почв

В литературе неоднократно указывалось на несовпадение данных по определению ИДП, полученных разными методами (Мина, 1962; Карпачевский, Киселева, 1968; Freijer J.I., Bouten W., 1991). Сравнительный анализ наиболее часто применяемых методов определения дыхания почв, проведенный в рамках базы данных по дыханию почв (Курганова, Кудеяров, 1998), показал, что на 5% уровне значимости достоверно различаются между собой оценки потоков диоксида углерода, полученные методом Люндегорда и абсорбции, камерным и профильным. Наиболее близкие оценки эмиссии CO<sub>2</sub> из почв получаются при использовании методов Штатнова (1952) и Макарова (1977), которые и являются наиболее часто используемыми среди исследователей.

Сопоставление камерных и микрометеорологических оценок (рис. 1) показало, что в условиях типичных тундр камерный метод переоценивает источник углерода в среднем на 0,7 г С м<sup>-2</sup> сут<sup>-1</sup> по сравнению с микрометеорологическим. В расчете на теплый сезон (4месяца) величина расхождения оценок может достигнуть 80 г С м<sup>-2</sup>, что вполне сопоставимо по абсолютной величине с известными оценками годового дисбаланса углерода в мерзлотных экосистемах. Поэтому следует с известной долей осторожности относиться к сравнению оценок баланса, полученных разными методами.

Итак, анализ методов количественной оценки потоков CO<sub>2</sub> из почв, показал, что «идеального» метода для количественной оценки потоков CO<sub>2</sub> из почв не существует: подавляющая часть используемых методов далеко не безупречна - они либо трудоемки, либо плохо подходят к использованию в зимних условиях, либо весьма дорогостоящи. Поэтому, на наш взгляд, наиболее приемлемым методом для проведения круглогодичных мониторинговых наблюдений за эмиссией CO<sub>2</sub> из почв в различных экосистемах остается камерный статистический метод Макарова, модифицированный для условий морозных и снежных зим (Лопес де Гереню и др., 2001; Kurganova et al., 2003). Предложенная модификация камерного метода проста в исполнении и практически позволяет избежать нарушения снежного покрова и изменений в температурном режиме почвы во время замеров ИДП, что способствует получению более достоверных результатов.

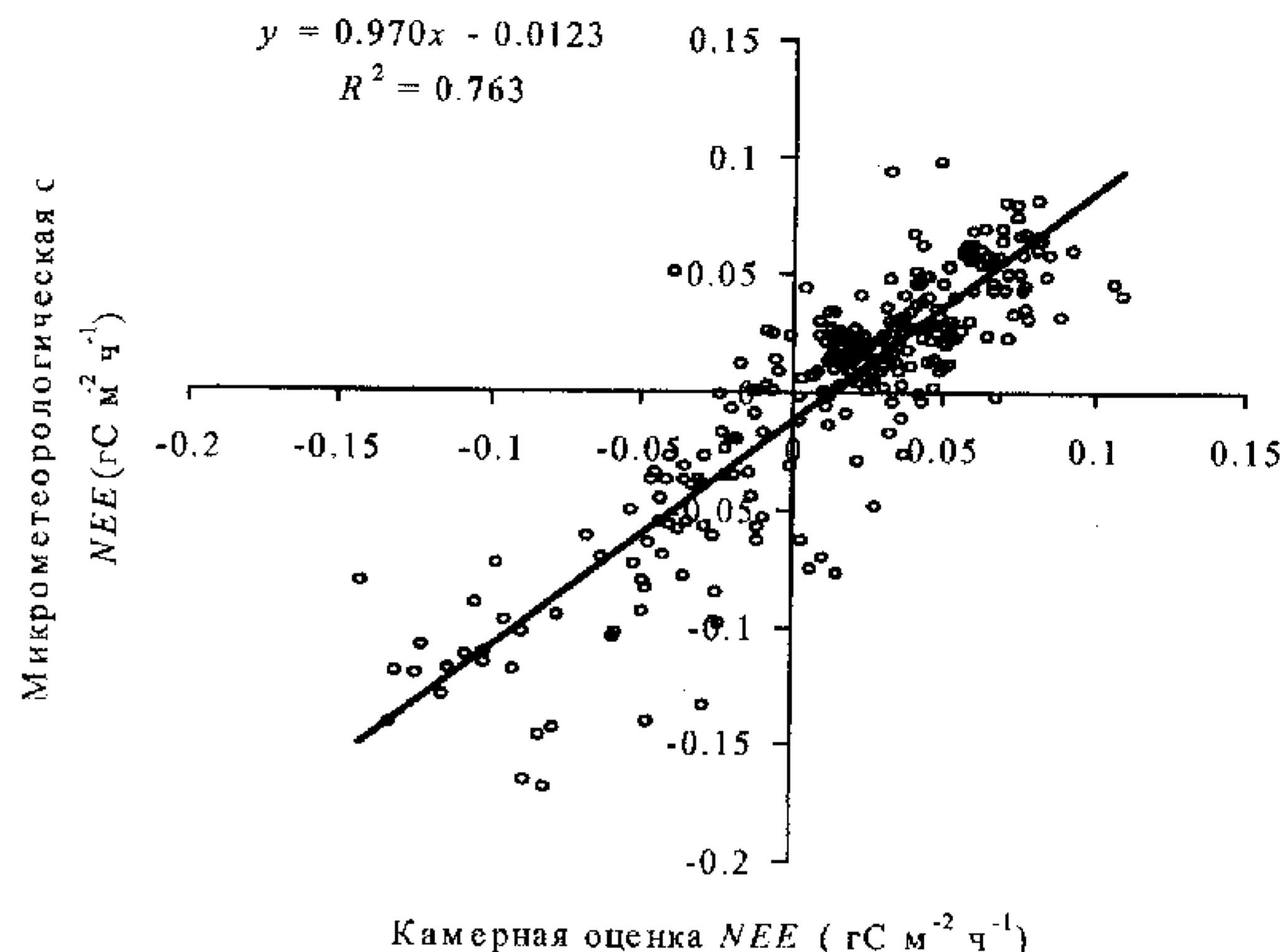


Рис. 1. Сравнение величин NEE (чистый экосистемный обмен), полученных камерным и микрометеорологическим методами

### Камерный статический метод для круглогодичного определения эмиссии CO<sub>2</sub> из почв

Измерения эмиссии CO<sub>2</sub> проводились нами методом закрытых камер, круглогодично, с октября 1997 по ноябрь 2003 года один раз в 7-10 дней. Экспериментальные участки располагались на территории Приокско-Террасного Биосферного Государственного заповедника (дерново-слабоподзолистая песчаная почва, лесной и луговой ценозы) и в 4 км от города Пущино на опытно полевой станции ИФХиБПП РАН (серая лесная тяжелосуглинистая почва, лесной, луговой и агроценоз). Основные свойства почв и растительности изучаемых экосистем приведены в таблице 1.

Таблица 1. Характеристика растительного покрова и основных химических свойств почв исследуемых экосистем (лесная зона)

Характеристика	Дерново-слабоподзолистая почва (Приокско-Террасный биосферный заповедник)		Серая лесная почва (Опытно-полевая станция ИФХиБПП РАН)		
	Лес	Луг	Лес	Луг	Пашня
Растительность	Смешанный лес с хорошим подлеском и богатым разнотравьем	Разнотравно-злаковый, косиновый, неудобранный	Смешанный лес с кустарниковым и травянистым ярусом	Разнотравно-злаковый некосимый, неудобранный	Неудобренный вариант полевого опыта
Возраст	80-100 лет	47-50 лет	45-55 лет	17-19 лет	150
C <sub>общ</sub> , % (0-20 см)	1.9	2.2	2.4	1.6	1.1
N <sub>общ</sub> , % (0-10 см)	0,16	0,13	0,48	0,40	0,24
pH H <sub>2</sub> O	5.6	5.4	6.8	6.5	6.0
ППВ, %	34.5	35.8	64.0	55.8	39.4

Календарный год исследований был условно разделен нами на два периода: теплый - с мая по октябрь и холодный - с ноября по апрель. Методики отбора газовых проб в эти периоды несколько отличались друг от друга. В бесснежный (теплый) период года в качестве камер использовались небольшие стальные цилиндрические сосуды - изоляторы, высотой и диаметром по 10 см (повторность 5-кратная). Сосуды врезали на глубину 4 см непосредственно перед определением ИДП. В агроценозе и в лесу сосуды - изоляторы помещали между растениями, в луговом ценозе - надземную часть растений срезали на уровне почвы. Таким образом, определяемый поток CO<sub>2</sub> представлял собой суммарное дыхание почвенной микрофлоры, листового опада, корней и мортмассы травянистой растительности без учета дыхания надземного яруса фитомассы.

В холодный период года использовались стационарные стальные основания - изоляторы размером 32x32 см с водяным затвором, заглубленные в почву на 20 см, и стальные короба 32x32x15 см. При выпадении снега основания-изоляторы наращивались специальными секциями высотой 20 см, чтобы исключить нарушение снежного покрова при отборе газовых проб.

Отбор газовых проб на содержание CO<sub>2</sub> в камерах производили шприцем в герметично закрытые вакуумированные стеклянные флаконы (объем 15 мл) в утренние часы (с 9 до 11), когда ИДП наиболее близка к среднесуточной (Ларионова и др., 1993). Время экспозиции в бесснежный период года составляло 30-45 минут с отбором контрольных проб через 10-15 минут. Зимой время экспозиции увеличивалось до 60-120 минут с отбором контрольных проб через 30-60 минут. Анализ газовых проб проводили с использованием газового хроматографа Chrom-5 на колонках, заполненных Porapak Q.

На выбранных для изучения эмиссии CO<sub>2</sub> площадках в течение всего периода измерений параллельно с отбором газовых проб определялись температура и влажность верхнего (0-5 см) слоя почвы, температура воздуха, а в зимний период также фиксировалась высота снежного покрова и глубина промерзания почв. Температура почвы измерялась при помощи почвенных термометров, заглубленных на 5 см. Влажность почвы определяли весовым методом.

Расчет эмиссии диоксида углерода из почв производился по формуле (Larionova et al., 1998):

$$E_{CO_2} = (C_2 - C_1) \cdot H \cdot t^{-1} \quad (1)$$

где  $E_{CO_2}$  - эмиссия CO<sub>2</sub>, мг C · м<sup>-2</sup> · час<sup>-1</sup>;  
 $C_2$  и  $C_1$  - конечная и начальная концентрации CO<sub>2</sub> внутри изолятора, мг C · м<sup>-3</sup>;  
 $H$  - высота изолятора над поверхностью почвы, м;  
 $t$  - время экспозиции, час.

Суммарные месячные потоки CO<sub>2</sub> почв (г C · м<sup>-2</sup> · мес<sup>-1</sup>) рассчитывались с использованием среднемесячных значений эмиссии CO<sub>2</sub> (г C · м<sup>-2</sup> · сут<sup>-1</sup>) и продолжительности соответствующего месяца. Сезонные и годовые потоки были получены суммированием соответствующих месячных потоков.

Предложенная нами модификация камерного метода, основанная на использовании врезанных в почву прямоугольных стальных оснований, высота которых наращивалась с ростом высоты снежного покрова, способствовала получению более достоверных результатов и позволила практически избежать нарушений снежного покрова и изменений в температурном режиме почвы во время замеров ИДП, которые имели место в первый год исследований, когда во время замеров снег над основаниями удаляли. Описанная выше процедура определения зимнего дыхания почв, безусловно, не безупречна и в какой-то мере искажает величину реальных потоков диоксида углерода из почв.

Так, например, в конце зимы - начале весны в изолирующих основаниях под слоем снега происходило накопление льда, толщиной 5-7 см. Этот слой образовывался после продолжительных оттепелей и был настолько плотен и монолитен, что практически полностью перекрывал выход углекислому газу. В естественных условиях в снежном покрове подобного явления не наблюдалось, хотя имели место небольшие корочки льда на снегу после оттепелей. Данный артефакт привел к некоторому занижению реальных потоков диоксида углерода из почв. Еще более сложная ситуация складывалась с наступлением зимы в почвах агроценоза. После влажной осени в 1997 и 1999 годах почва была сильно переувлажнена и на ее поверхности в изолирующих основаниях стоял слой воды 2-3 см. Насыщенная влагой тяжелосуглинистая почва с нарушенной структурой при промерзании превращалась в единый льдистый монолит, препятствующий газообмену почвы с атмосферой. Это явление также приводило к занижению реальных потоков углекислого газа из почв агроценозов в холодный период года. Реальная эмиссия  $\text{CO}_2$  из пахотных почв в холодный период, по всей видимости, характеризуется более высокими значениями, поскольку в естественных условиях почвы агроценозов имеют лучший дренаж за счет неровностей рельефа, различных трещин и неоднородностей почвы.

#### Месячные, сезонные и годовые потоки $\text{CO}_2$ из почв и их межгодовая вариабельность

Временной период, охваченный исследованиями, характеризовался близкими величинами среднегодовых температур воздуха (отклонения от средней многолетней не превышали  $0.8^\circ\text{C}$ ) и контрастными условиями увлажнения. Так, 1998 год был экстремально влажным, осадков выпало на 127 мм больше среднемноголетнего; 2001 и 2002 годы были, напротив, очень засушливыми - годовое количество осадков было на 64 и 78 мм меньше, чем в среднем за последние 15 лет.

Наши исследования показали, что годовая динамика эмиссии  $\text{CO}_2$  из почв определялась, главным образом, погодными условиями года исследований и имела вид либо одновершинных кривых с максимальными значениями в летние месяцы, либо носила "пилообразный" характер. В холодный период года (ноябрь-апрель) скорость продуцирования  $\text{CO}_2$  на изучаемых объектах была всегда выше нуля но, как правило, не превышала  $100 \text{ мг С} \cdot \text{ м}^{-2} \cdot \text{ час}^{-1}$ . Наиболее активным, в отношении выделения  $\text{CO}_2$  в холодный период был луговой ценоз на дерново-слабоподзолистых почвах, где эмиссия  $\text{CO}_2$  временами могла до-

стигать  $130-150 \text{ мг С} \cdot \text{ м}^{-2} \cdot \text{ час}^{-1}$ . В теплое время года (май-октябрь) скорость выделения  $\text{CO}_2$  из почв Южного Подмосковья была в среднем в 3,5-4,5 раза выше, чем в холодный период, и в большей степени, чем зимой, зависела от погодных условий. За все годы наблюдений значения скорости эмиссии  $\text{CO}_2$  в теплое время года практически не опускались ниже  $100 \text{ мг С} \cdot \text{ м}^{-2} \cdot \text{ час}^{-1}$ , достигая иногда весьма значительных величин -  $300-330 \text{ мг С} \cdot \text{ м}^{-2} \cdot \text{ час}^{-1}$ . Дерново-слабоподзолистая почва, как правило, характеризовалась более высокой скоростью эмиссии углекислого газа, чем серая лесная почва, что, на наш взгляд, обусловлено лучшими условиями аэрирования и большим количеством свежего органического материала и корней в песчаной дерново-слабоподзолистой почве заповедника по сравнению с тяжелосуглинистой серой лесной почвой.

Базируясь на еженедельных измерениях, были рассчитаны среднемесячные, среднесезонные и среднегодовые потоки  $\text{CO}_2$  из изучаемых почв (табл. 2). Динамика суммарных среднемесячных потоков диоксида углерода из почв представляла собой сглаженную картину годовой эмиссии, полученной из еженедельных измерений (рис.2).

Таблица 2. Сезонные и годовые потоки  $\text{CO}_2$  из почв различных экосистем Южного Подмосковья (среднее  $\pm$  SE, n=6)

Период	Поток $\text{CO}_2$ , ( $\text{г С} \cdot \text{ м}^{-2} \cdot \text{ период}^{-1}$ )				
	Дерново-подзолистая почва		Серая лесная почва		
	Лес	Луг	Лес	Луг	Агроценоз
Зима (декабрь-февраль)	69 $\pm$ 14	77 $\pm$ 18	52 $\pm$ 9	49 $\pm$ 9	17 $\pm$ 1
Весна (март-май)	114 $\pm$ 16	163 $\pm$ 27	114 $\pm$ 17	101 $\pm$ 19	61 $\pm$ 6
Лето (июнь-август)	281 $\pm$ 33	379 $\pm$ 41	234 $\pm$ 31	255 $\pm$ 32	179 $\pm$ 32
Осень (сентябрь-ноябрь)	170 $\pm$ 15	187 $\pm$ 19	161 $\pm$ 22	115 $\pm$ 19	104 $\pm$ 25
Холодный сезон (ноябрь-апрель)	159 $\pm$ 26	189 $\pm$ 36	142 $\pm$ 20	112 $\pm$ 17	60 $\pm$ 8
Теплый сезон (май-октябрь)	474 $\pm$ 50	617 $\pm$ 67	418 $\pm$ 54	408 $\pm$ 56	301 $\pm$ 55
Годовой поток	634 $\pm$ 63	806 $\pm$ 86	561 $\pm$ 63	521 $\pm$ 69	361 $\pm$ 55

Она в значительной степени зависела от комплекса погодных и гидротермических условий, которые в свою очередь определяли особенности функционирования микробных сообществ. Коэффициент временной вариабельности (КВ) в пределах отдельных месяцев изменялся от 0,7 до 110%. Самая высокая временная изменчивость была обнаружена для большинства изучаемых экосистем в марте (КВ=78-110%). Как правило, в почвах естественных экосистем межгодовая вариабельность месячных потоков  $\text{CO}_2$  в пределах теплого периода (апрель-октябрь) была ниже, чем в пределах холодного и редко превышала 50%. Самый стабильный поток  $\text{CO}_2$  из этих почв наблюдался в июне-июле (КВ=15-27%), а самый нестабильный - в декабре и марте (КВ=68-89%). В пахотных почвах напротив, зимние потоки были более стабильными из-за их невысоких абсолютных значений, а в сентябре-октябре наблюдалась самая высокая вариабельность месячных потоков  $\text{CO}_2$  (КВ=77-81%).

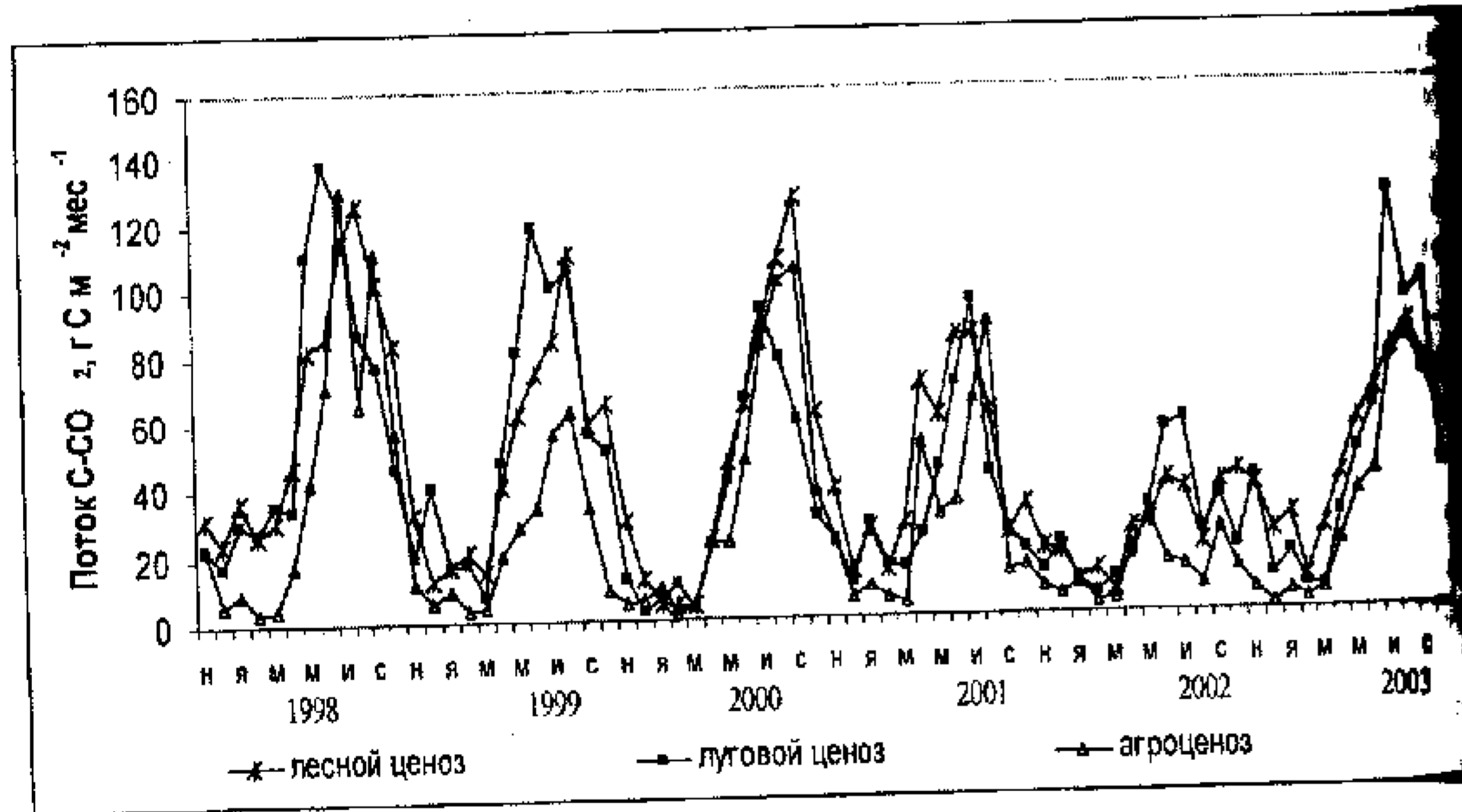


Рис. 2. Многолетняя динамика месячных потоков  $\text{CO}_2$  из серой лесной почвы под различными ценозами

Величина средних сезонных потоков  $\text{CO}_2$  из почв убывала в следующей последовательности ЛЕТО > ОСЕНЬ  $\geq$  ВЕСНА > ЗИМА (табл. 2). При этом среднелетние потоки были значимо выше осенних и весенних в почвах всех экосистем, а осенние потоки достоверно превышали весенние только в почвах лесных экосистем, что мы связываем с более активным разложением свежего растительного опада в лесу

в осенний период по сравнению с весенним. В течение зимы этот опад продолжает активно разлагаться и, поэтому весной поток  $\text{CO}_2$  из лесных почв уменьшается. В почвах луговых ценозов отмирание и разложение растительных остатков происходит более равномерно. Сезонные потоки углекислого газа из почв варьировали слабее, чем месячные: коэффициенты межгодовой вариабельности составляли в зависимости от типа экосистемы 5-58% для зимы, 25-48% - для весны, 29-50% - для лета и 22-68% для осени.

Среднегодовая эмиссия  $\text{CO}_2$  была максимальной ( $806 \pm 86 \text{ г C} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$ ) на дерново-слабоподзолистой почве под луговым ценозом. Она значимо превышала годовые потоки углекислого газа из почв других экосистем ( $P < 0.01$ ), что на наш взгляд, объясняется более богатым видовым составом трав, их более высокой надземной и подземной продуктивностью, и как следствие этого, значительной долей корневого дыхания в общем потоке  $\text{CO}_2$  из песчаной дерново-слабоподзолистой почвы под луговой растительностью. Минимальная величина суммарной за год эмиссии  $\text{CO}_2$  была зарегистрирована на пахотной серой лесной почве ( $361 \pm 55 \text{ г C} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$ ). Она была значимо ниже ( $P < 0,05$ ), чем в почвах остальных ценозов. Достоверно не различались между собой суммарные количества  $\text{CO}_2$ , выделяющиеся за год с поверхности почв лесных ценозов и с поверхности серых лесных почв под луговой и лесной растительностью. Межгодовая изменчивость суммарных годовых потоков углекислого газа из почв различных экосистем Южного Подмосквья в среднем составляла 30% и была самой высокой в агроценозе (37%), а самой низкой - в лесном и луговом ценозах на дерново-слабоподзолистых почвах (25-26%). Другими словами, почвы агроэкосистем являются более подверженными изменению погодных условий по сравнению с почвами естественных ценозов. Для почв естественных экосистем нами была обнаружена тесная позитивная связь между годовыми потоками  $\text{CO}_2$  и суммарным количеством осадков за год: коэффициенты корреляции составили 0,81-0,94,  $P < 0.01$ . Достоверных корреляционных связей между годовыми потоками  $\text{CO}_2$  и среднегодовой температурой почвы воздуха не найдено.

#### Вклад различных сезонов года в суммарные потоки $\text{CO}_2$ из почв

Расчеты показали, что вклад отдельных месяцев в годовой поток углекислого газа из почв варьирует от 1.5% до 20.6% и зависит от типа экосистемы. Летние потоки  $\text{CO}_2$  составляли в среднем 42-49% от суммарного годового потока, зимние 5-11%, осенние 22-29%, а весен-

ние 17-20%. Эти характеристики заметно варьировали в зависимости от типа почвы и ценоза, а так же от сочетания погодных условий (табл. 3). Наименьшая изменчивость величины сезонных вкладов в годовой поток была характерна для летнего сезона (8-27%), а наибольшая - для зимы (32-53%). В почвах естественных экосистем величина вкладов отдельных сезонов в годовой поток более стабильна, чем в пахотных почвах.

Таблица 3. Вклад различных периодов (%) в годовой поток CO<sub>2</sub> из почв различных экосистем Южного Подмосковья (среднее за 6 лет наблюдений)

Период	Дерново-слабоподзолистая почва				Серая лесная почва					
	Лес		Луг		Лес		Луг		Агроценоз	
	Доля	КВ*	Доля	КВ	Доля	КВ	Доля	КВ	Доля	КВ
Зима	11	50	10	46	9	41	9	32	5	5
Весна	18	20	20	22	20	28	19	15	17	4
Лето	44	9	47	8	42	13	49	8	49	2
Осень	27	23	23	24	29	27	22	14	29	3
Холодный сезон	25	38	24	36	25	32	22	25	17	4
Теплый сезон	75	13	76	11	75	11	78	7	83	1

\*КВ - коэффициент вариации, %

Доля холодного периода (ноябрь-апрель) в годовом потоке диоксида углерода из почв Южного Подмосковья была весьма значительной и составляла в зависимости от типа экосистемы 17-25 % (в среднем за 6 лет наблюдений). В зависимости от сочетания погодных условий в различные временные периоды доля холодного периода в годовом потоке изменялась от 11-15% (в 1999-2000 гг. с теплым, влажным летом и холодной зимой) до 33-41% (в 2000-2001 гг. с жарким и очень засушливым летом и умеренно холодной зимой). Таким образом, наши исследования показали, что на долю зимнего и холодного периодов приходится существенная часть в суммарном годовом потоке CO<sub>2</sub> из почв Южного Подмосковья и ее недоучет может привести к существенным искажениям в оценке годового баланса углерода в почвах.

В соответствии с оценками других исследователей зимнее дыхание почв оценивается близкими величинами: больше 10% от годового потока CO<sub>2</sub> в тундровых экосистемах (Федоров-Давыдов, 1998).

Oechel et al., 1997; Замолодчиков и др., 2000; Zamolodchikov and Karelin, 2001) и больше 20% - в экосистемах бореальной зоны (Pajuga, 1995; Alm et al., 1999).

Таким образом, многолетние мониторинговые наблюдения за эмиссией CO<sub>2</sub> из почв различных экосистем лесной зоны показали, что:

- Среднегодовая эмиссия CO<sub>2</sub> из почв Южного Подмосковья изменялась от 361±55 до 806±86 г С м<sup>-2</sup> год<sup>-1</sup> в зависимости от типа почвы и ценоза. Для почв естественных экосистем была обнаружена тесная позитивная связь между годовыми потоками CO<sub>2</sub> и суммарным количеством осадков год.
- Межгодовая изменчивость суммарных годовых потоков углекислого газа из почв различных экосистем Южного Подмосковья в среднем составляла 30% и была самой высокой в агроценозе (37%), а самой низкой - в лесном и луговом ценозах на дерново-слабоподзолистой почве (25-26%).
- Доля холодного периода (ноябрь-апрель) в годовом потоке диоксида углерода из почв Южного Подмосковья была весьма значительной и составляла в среднем за 6 лет наблюдений в зависимости от типа экосистемы 17-25 %. Наиболее стабильным показателем, характеризующим особенности эмиссии CO<sub>2</sub> из почв, является вклад суммарной летней эмиссии в годовой поток CO<sub>2</sub> из почв;
- Агроценоз представляет собой наиболее подверженную к изменению погодных условий экосистему - варибельность величины как самих потоков CO<sub>2</sub>, так и вклада отдельных сезонов в суммарную годовую эмиссию углекислого газа в этих почвах самая высокая.
- Для получения реальных оценок годовых потоков CO<sub>2</sub> из почв необходимо проведение многолетних круглогодичных наблюдений за эмиссией CO<sub>2</sub> из почв.

#### Благодарности

Работа выполнялась при финансовой поддержке грантов РФФИ (04-04-48653 и 05-04-48441) и программы 13 Президиума РАН. Авторский коллектив весьма признателен дирекции Приокско-Террасного Биосферного Заповедника за возможность проведения режимных наблюдений на территории заповедника и сотрудникам ИФХиБП РАН Л.Н. Розановой, Д.В. Сапронову и Т.Н. Мякшиной за многолетнюю помощь в отборе и анализе газовых проб.



## Литература

Глазовская М.А. Роль и функции педосферы в геохимическом цикле углерода // Почвоведение. 1996. № 2. С. 174-186.

Заварзин Г.А. Цикл углерода в природных экосистемах России // Природа. 1993. № 7. С. 15-18.

Замолодчиков Д.Г., Карелин Д.В. Биогенные углеродные потоки в тундрах и лесотундрах России // Глобальные изменения природной среды и климата. Избранные научные труды. Кружоворот углерода на территории России. - М.: Министерство науки и технологий Российской Федерации, 1999. С. 146-162.

Замолодчиков Д.Г., Лопес де Гереню В.О., Иващенко А.И., Карелин Д.В., Честных О.В. Эмиссия углерода южными тундрами в холодный период года. Доклады РАН. 2000. т. 372. № 5. С. 709-711.

Замолодчиков Д.Г. Баланс углерода в тундровых и лесных экосистемах России // Автореф. дис. докт. биол. наук, Москва, 2003. 61 с.

Карпачевский Л.О., Киселева Н.К. О методике определения некоторых особенностей выделения CO<sub>2</sub> из почв под еловыми широколиственными лесами // Почвоведение. 1969. № 7. С. 32-41.

Каспаров С.В., Мишко О.И., Амосова Я.М., Перова Н.Е. Некоторые подходы к изучению функционирования газового профиля почвы // Почвоведение. 1986. №10. С. 127-130.

Комиссарова И.Ф. Выделение CO<sub>2</sub> из почвы лесных биогеоценозов восточного Сихотэ-Алиня // Почвоведение. 1986. №5. С. 106-108.

Кудяров В.Н. Почвенные источники углекислого газа на территории России // Глобальные изменения природной среды и климата. Избранные научные труды. Кружоворот углерода на территории России. М., 1999. С. 165-201.

Курганова И.Н., Кудяров В.Н. Оценка потоков диоксида углерода из почв таежной зоны России // Почвоведение. 1998. №9. С. 1058-1070.

Ларионова А.А., Розонова Л.Н., Самойлов Т.И. Динамика газообмена в профиле серой лесной почвы // Почвоведение. 1988. № 11. С. 68-74.

Ларионова А.А., Иванникова А.А., Демкина Т.С. Методы определения эмиссии CO<sub>2</sub> из почвы // Дыхание почвы. НЦБИ РАН. Пушкино, 1993. С. 11-26.

Лопес де Гереню В.О., Курганова И.Н., Розонова Л.Н., Кудяров В.Н. Годовые потоки диоксида углерода из некоторых почв южно-таежной зоны России // Почвоведение. 2001. № 9. С. 1045-1059.

Макаров Б.Н. Методы изучения газового режима почв // Методы стационарного изучения почв. М.: Наука, 1977. С. 55-87.

Мина В.Н. Опыт сравнительной оценки методов определения дыхания почв // Почвоведение. 1962. № 10. С. 96-100.

Федоров-Давыдов Д.Г. Дыхательная активность тундровых биогеоценозов и почв Колымской низменности // Почвоведение. 1998. №3. С. 291-301.

Штаннов В.И. К методике определения биологической активности почв // Докл. ВАСХНИЛ. 1952. Вып.6. С. 26-30.

Adam K., Stahr K. CO<sub>2</sub>-Emissionen aus Boden im wuerttembergischen Allgau // Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft. 1997. Vol. 85. II. P. 815-818.

Arneeth A., Schuze E-D., Kolle O., Vygodskaya N., Hollinger D.Y., Knohl A., Kurbatova J., Leuning R., Milukova I., Roser C., Tchebakova N., Valentini R., Shibistova O., Lloyd J. Spatial and temporal variability of CO<sub>2</sub>-fluxes in boreal ecosystems – a comparison of 14 different forests and three bogs located along a west-east transect from European Russia to Eastern Siberia (33°E - 128°E) // Extended Abstracts of 6-th International Carbon dioxide Conference, 2001, Vol. 1. P. 346-349.

Burton D.L. & Beauchamp E.G. Profile nitrous oxide and carbon dioxide concentrations in a soil subject to freezing // Soil Sci. Soc. Am. J., 1994. Vol. 58, P. 115-122.

de Jong E., Schappert H.J.V. Calculation of soil respiration and activity from CO<sub>2</sub> profiles in the soil // Soil.Sci. 1972. V. 113. No. 5. P. 328-333.

Freijer J.I., Bouten W. A comparison of field methods for measurement soil carbon dioxide evolution: experiment and simulation // Plant and Soil. 1991. Vol. 135. N 1. P. 133-142.

Janssens, U.A., Lankreijer, H., Matteucci, G., Kowalsky, A.S., Buchmann, N., Epron, D., Pilegaard, K., Kutsch, W., Longdoz, B., Grunwald, T., Montagnani, L., Dore, S., Rebmanns, C., Moors, E.J., Grelle, A., Oltchev, S., Clement, R., Gudmundson, J., Minerbi, S., Berbigier, P., Ibrom, A., Moncrieff, J., Aubinet, M., Bernhoffer, P., Jensen, O., Vesala, T., Granier, A., Schulze, E.-D., Lindroth, A., Dolman, A.I., Jarvis, P.G., Ceulemans, R. and Valentini, R. Productivity overshadows temperature in determining soil and ecosystem respiration across European forests //Global Change Biology. 2001. Vol. 7. P. 269-278.

Kimball B.A., Lemon E.R. Spectra of air pressure fluctuations at the soil surface // J. Geophys.Res. 1970. Vol. 75. P. 6771-6777.

Kudeyarov, V.N. and I.N. Kurganova Carbon dioxide emission and net primary production of Russian terrestrial ecosystems // Biol. Fertil. Soils: 1998. Vol. 27. P. 246-250.

Kurganova I., Lopes de Gerenyu V., Rozanova L., Sapronov D., Myakshina T., Kudeyarov V. Annual and seasonal CO<sub>2</sub> fluxes from Russian southern taiga soils // Tellus. 2003. Vol. 55B. P. 338-344.

Larionova A.A., Yermolaev A.M., Blagodatsky S.A., Rozanova L.N., Yevdokimov I.V., Orlinsky D.B. Soil respiration and carbon balance of gray forest soils as affected by land use // Biol. Fertil. Soils, 1998. Vol. 27. P. 251-257.

Lemon E. Aerodynamic studies of CO<sub>2</sub> exchange between the atmosphere and the plant // Harvesting the sun. 1967. P. 263-290.

Lundegardh H. Der Kreislauf der Kohlensäure in der Natur. Jena. G Fischer. 1924. 308 s.

Nakayma F.S., Kimbal B.A. Soil carbon dioxide distribution and flux within the open – top chamber // Argon J. 1988. Vol. 80. No. 3. P. 394-398.

Oechel W., Yourlitis G., Hastings S. Cold season CO<sub>2</sub> emissions from arctic soils // Global Biogeochemical Cycles. 1997. Vol. 11. No. 2. P. 163-172.

Pajari B. Soil respiration in a poor upland site of Scots pine stand subjected to elevated temperatures and atmospheric carbon concentration // Plant and soil. 1995. Vol. 168-169. P. 563-570.

Raich, J.W. and W.H. Schlesinger The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate // Tellus. 1992. Vol. 44B. P. 81-89.

Rayment, M.V. Closed chamber systems underestimate soil CO<sub>2</sub> efflux. *European Journal of Soil Science*. 2000. Vol. 51, 107-110.

Rolston D.E. Application of gaseous-diffusion theory to measurement of denitrification // Nitrogen in the environment / Eds: Nielsen D.R., McDonald J.G. 1978. Vol. 1. P. 309-336.

Singh J.S., Gupta S.R. Plant decomposition and soil respiration in terrestrial ecosystems // Botanical Rev. 1977. Vol. 43. N 4. P. 449-528.

Valentini R., Matteucci G., Dolman A.J., Schulze E.D., Rebmann C., Moors E.J., Granier A., Gross P., Jensen N.O., Pilegaard K., Lindrith A., Grelle A., Bernhofer C., Grünwald C., Aubinet M., Ceulemans R., Kowalski A.S., Vesala T., Rannik Ü., Berbigier P., Loustau D., Gudmundsson J., Thorgeirsson H., Ibrom A., Morgerstern K., Clement R., Moncrieff J., Montagnani L., Minerbi S., Jarvis P.G. Respiration as the main determinant of carbon balance in European forests // Nature, 2000. Vol. 404. P. 861-865.

Zamolodchikov, D.G. and D.V. Karelín An empirical model of carbon fluxes in Russian tundra // Global Change Biology, 2001. Vol. 7. P. 147-161.

Zimov S.A., Zimova G.M., Daviudov S.P., Daviudova A.I., Voropaev Y.V., Voropaeva Z.V., Prosiannikov S.F., Prosiannikova O.V., Semiletova I.V., Semiletov I.P. Winter biotic activity and production of CO<sub>2</sub> in Siberian soils: a factor in the greenhouse effect // J. Geophys. Res. 1993. Vol. 98. P. 5017-5023.

УДК 631.417.1.001.57(470)

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПОЧВЕННОГО УГЛЕРОДА В ЗАЛЕЖНЫХ ЗЕМЛЯХ РОССИИ

А. А. Романовская

Почвы играют важную роль в глобальном цикле углерода и могут обуславливать как его поглощение, так и эмиссию в атмосферу. Согласно международным оценкам запас органического углерода в почвах мира составляет около 1350 млрд. тонн [32], что соответствует примерно 80% общего содержания этого элемента во всех компонентах наземных экосистем, включая растительность [34]. Антропогенные воздействия на почву изменяют в ней запас углерода и, таким образом, влияют на его глобальный баланс в биосфере. Одним из основных типов антропогенной активности является изменение вида эксплуатации земель. Так, вырубка леса и распашка целинных земель обуславливают значительные потери почвенного углерода и, соответственно, эмиссию CO<sub>2</sub> в атмосферу, в то время как зарастание брошенных пахотных угодий приводит к постепенному восстановлению естественного состояния почв и накоплению углерода. По оценкам Houghton в течение 90-х годов глобальный ежегодный поток углерода в атмосферу при изменении землепользования был равен  $2.2 \pm 0.8$  млрд. тонн С [33]. При этом основной вклад в эмиссию вносит вырубка лесов в тропических регионах. Поток двуокси углерода в атмосферу, в свою очередь, способен оказывать влияние на глобальное изменение климата, выступая в качестве одного из основных парниковых газов. В соответствии с требованиями Рамочной конвенции ООН об изменении климата и Киотского протокола к ней [6, 45], Российская Федерация обязана ежегодно предоставлять сведения об антропогенных эмиссиях парниковых газов в различных секторах экономики, включая сельское и лесное хозяйства и изменение землепользования [42].