

УДК 631.417.1:631.433.3

ОЦЕНКА БАЛАНСА УГЛЕРОДА В ПОЧВАХ НА ОСНОВЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭМИССИИ CO₂[§]

© 2024 г. И. Н. Шарков^{1,*}, А. С. Чумбаев¹, В. А. Андроханов¹¹Институт почвоведения и агрохимии СО РАН
630090 Новосибирск, просп. Лаврентьева, 8/2, Россия

*E-mail: humus3@yandex.ru

Повышенный интерес в настоящее время к количественной оценке дыхания почвы во многом обусловлен исследованиями роли различных наземных экосистем в изменении в атмосфере концентрации важнейшего парникового газа – CO₂. В обзоре рассмотрены методические аспекты определения фактической эмиссии CO₂ из почв с помощью камерного и абсорбционного методов, а также использования полученных данных для оценки складывающегося в почвах баланса углерода. Успешная разработка данной темы позволит оперативно получать ответ на главный вопрос этой злободневной экологической проблемы: чем является почва той или иной экосистемы для атмосферного CO₂ – нетто-источником или нетто-стоком? В статье проведен анализ результатов работ, посвященных сравнительному определению эмиссии CO₂ из почв данными методами. Показано, что распространенное мнение о получении абсорбционным методом заниженных данных зачастую основывается на исследованиях, в которых были нарушены базовые принципы этого метода. Сделан вывод о необходимости проведения углубленных сравнительных исследований по определению среднесуточных показателей эмиссии CO₂ из почвы камерным и абсорбционным методами. Признано, что, независимо от метода, главной проблемой использования данных продуцирования CO₂ для оценки баланса углерода в почве является адекватное разделение общего дыхания на гетеротрофную и автотрофную составляющие, соотношение между которыми изменяется в широких пределах в зависимости от состояния почвы и растительного покрова. Из-за несовершенства и трудоемкости существующих методов это разделение может обуславливать значительные ошибки в определении годовой минерализации органического вещества почвы. Для их снижения рассмотрен подход к определению минерализационных потерь CO₂ в парующихся почвах. Он естественен для почв агроценозов, но как методический прием, вероятно, может использоваться и в природных травяных экосистемах. Уменьшение ошибок может обеспечиваться благодаря тому, что различия в фактической минерализации органического вещества в парующихся и занятых растениями почвах кратно меньше, чем изменение соотношения между гетеротрофной и автотрофной составляющими дыхания почвы в различных биогеоценозах.

Ключевые слова: дыхание почвы, камерный метод, абсорбционный метод, баланс углерода в почве.

DOI: 10.31857/S0002188124090095, **EDN:** CCHBES

ВВЕДЕНИЕ

Эмиссия углекислого газа из почвы (дыхание почвы) является следствием происходящих в ней биологических процессов, связанных с разложением микроорганизмами органического вещества и жизнедеятельностью корней растений. Скорость эмиссии CO₂ издавна считается наиболее общим показателем биологической активности почвы и в последние десятилетия широко используется в почвенно-агрохимических и экологических исследованиях для оценки потоков и баланса углерода в естественных и антропогенно преобразованных экосистемах [1–7].

Согласно современным представлениям, общее дыхание почвы включает 3 основные составляющие: 1 – дыхание гетеротрофных микроорганизмов и почвенной фауны, 2 – дыхание автотрофов, 3 – дыхание ризосферных микроорганизмов [8–10]. Первая из них характеризует аэробные и анаэробные процессы минерализации собственно органического вещества почвы (*SOM*), т.е. гумуса и растительных остатков разной степени разложения. Эту составляющую иногда называют базальным дыханием, ее определяют в отсутствие живых корней растений и без добавления в почву питательных веществ [10–12]. Основным продуцентом CO₂ 2-й составляющей являются корни растений, использующие для своей

[§] Работа выполнена в рамках госзадания 122111000005-7.

жизнедеятельности текущие продукты фотосинтеза, транспортируемые по стеблю в почву. Часть этих продуктов в виде корневых выделений и отмирающих корневых волосков служит пищей для ризосферных микроорганизмов, представляющих 3-ю составляющую дыхания почвы. По справедливому замечанию [13], углекислый газ, который генерируется ризосферными микроорганизмами, следует также считать “автотрофным”, поскольку его происхождение, как и CO_2 живых корней, обусловлено текущей фотосинтетической деятельностью растений. По обобщенным данным [10], вклад ризосферных микроорганизмов в эмиссию CO_2 из почвы может быть довольно большим и превышать собственно корневое дыхание в 1.5 раза.

Таким образом, по источникам происхождения выделяющийся из почвы CO_2 , по большому счету, можно разделить на 2 главные составляющие: 1 – органическое вещество почвы, и 2 – текущие продукты фотосинтеза растений, обеспечивающие жизнедеятельность корней и ризосферных микроорганизмов.

При оценке баланса углерода в почве в расходную часть уравнения должно включать только CO_2 , который выделяется вследствие минерализации *SOM*. Углекислый газ, продуцируемый корнями растений и ризосферными микроорганизмами, имеет другой источник – CO_2 атмосферы. Включение его в расходную часть данного уравнения будет необоснованно завышать минерализационные потери *SOM*. Экспериментальное разделение общего дыхания почвы на гетеротрофную и автотрофную составляющие представляет главную проблему, возникающую при использовании показателя эмиссии CO_2 для оценки баланса углерода в почве. Поиск путей ее решения – одна из основных причин, которая побуждает исследователей разрабатывать методики для количественной оценки этих составляющих в общем дыхании почвы [13–19].

В настоящем обзоре освещена проблема использования показателя эмиссии CO_2 для оценки баланса углерода в почвах. Для почв биогеоценозов и агроценозов методические подходы могут различаться. Дело в том, что в отличие от естественных ценозов, где почва и растительный покров неразделимы, почва в агроценозах используется в полях севооборотов, каждое из которых с определенной периодичностью обычно поддерживается в парующем состоянии в течение всего вегетационного периода. Если измерять дыхание почвы в таком поле, то решение данной проблемы упрощается, поскольку практически весь выделяющийся CO_2 является продуктом минерализации *SOM*. Однако в почве без растений складываются особые условия для деятельности почвенных микроорганизмов, что затрудняет перенос полученных данных на другие (с растениями) поля севооборота. Этот аспект проблемы также рассмотрен в обзоре.

ТРЕБОВАНИЯ К МЕТОДАМ ОЦЕНКИ ЭМИССИИ CO_2 ИЗ ПОЧВЫ

Можно обозначить несколько требований к методу, чтобы полученные с его помощью данные эмиссии CO_2 из почвы можно было использовать для оценки баланса углерода в системе “почва–растительность–атмосфера” за длительный период – месяц, сезон или год. Во-первых, метод должен быть количественным, т.е. обеспечивать измерение фактической скорости потока CO_2 из почвы. Во-вторых, в процессе измерения не должны существенно изменяться факторы, влияющие на биологическую активность почвы. В противном случае фактическая скорость эмиссии CO_2 может отличаться от скорости продуцирования CO_2 , характерной в данное время для естественного (не нарушенного) состояния почвы. Наиболее важно, чтобы под влиянием процедуры измерения, особенно при длительных (несколько часов) экспозициях, существенно не изменялась температура почвы, поскольку она оказывает наиболее сильное влияние на активность почвенных микроорганизмов. Как показали результаты исследований [20–23], повышение температуры почвы на 1°C в диапазоне $5\text{--}30^\circ\text{C}$ интенсифицирует продуцирование ею CO_2 примерно на 7% (при $Q_{10} = 2$). В-третьих, поскольку в течение суток дыхание почвы, как правило, достаточно динамично [8, 24–27], метод должен позволять измерять (или рассчитывать) среднесуточную скорость эмиссии CO_2 из почвы, в том числе в холодные периоды, когда температура воздуха может опускаться $<0^\circ\text{C}$. Проводя измерения среднесуточной скорости с заданной частотой (например, 1 раз в неделю), можно путем линейного интерполирования рассчитывать суммарные за период наблюдения потери углерода из почвы в виде CO_2 [28, 29]. Наконец, в-четвертых, учитывая весьма высокую пространственную вариабельность скорости продуцирования CO_2 почвой, метод должен позволять одновременно вести измерения в различных вариантах опыта или площадках с достаточной повторностью.

МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ЭМИССИИ CO_2 ИЗ ПОЧВЫ

До настоящего времени не разработано общепризнанного стандартного метода определения дыхания почвы в полевых условиях. Многие десятилетия для этой цели используют в основном 2 группы методов, довольно давно получивших названия обогащения и абсорбции [1, 30]. В настоящее время метод обогащения чаще называют методом закрытых камер либо просто – камерным методом [23, 24, 31]. Суть его заключается в том, что камеру, чаще всего в форме цилиндра, врезают на определенную глубину в почву и на период экспозиции закрывают крышкой. Диффундирующий из почвы CO_2 накапливается

в надпочвенном пространстве камеры и по изменению концентрации газа, определяемой в настоящее время чаще всего с помощью портативных инфракрасных газоанализаторов, рассчитывают скорость его эмиссии. Иногда в процессе измерения с помощью миниатюрного насоса воздух прокачивают между камерой и газоанализатором либо просто пропускают через надпочвенную часть камеры, такой метод называют динамическим камерным методом [13, 32, 33]. Значительный толчок развитию камерного метода дало появление на рынке компактных высокоточных инфракрасных газоанализаторов [34], позволивших проводить измерения дыхания почвы при очень малых экспозициях — 1–2 мин, фиксируя посекундные изменения концентрации CO_2 в воздухе камеры [32, 35–37]. Благодаря таким газоанализаторам (например, LI COR 8100, США) со встроенными специальными программами появилась возможность рассчитывать скорость эмиссии углекислого газа из почвы, используя линейный интервал изменения его концентрации в воздухе камеры. Этим, по сути дела, был преодолен основной недостаток традиционного камерного метода — замедление скорости диффузии CO_2 из почвы по мере обогащения им надпочвенного пространства камеры. Налаженное зарубежными фирмами производство стандартного оборудования сделало камерный метод наиболее используемым в настоящее время для определения дыхания почвы в полевых условиях [38–42]. Тем не менее, разработка данного метода продолжается и поныне, в том числе с целью более глубокого понимания механизмов возникновения ошибок, обусловленных искажением естественного потока CO_2 из почвы в процессе измерения [23, 36, 42, 43].

В абсорбционном методе проблема накопления CO_2 в камере, которую по традиции будем называть сосудом-изолятором, или кратко — изолятором [44], решается путем использования поглотителя газа, которым чаще всего является раствор щелочи. При измерении в полевых условиях сосуд-изолятор врезают на небольшую глубину в почву, на ее поверхность помещают чашечку с раствором щелочи, и на период экспозиции изолятор закрывают крышкой. После экспозиции остаток щелочи в лаборатории оттитровывают кислотой и с учетом холостого определения рассчитывают количество выделившегося из почвы CO_2 . Титрование может быть либо ручным, с использованием индикатора фенолфталеина, либо автоматическим, с помощью потенциометрического титратора. Количество поглощенного CO_2 можно также определять кондуктометрическим методом по изменению электропроводности раствора щелочи, но при этом требуется высокоточный контроль его температуры [37]. В России абсорбционный метод стал широко известным после появления методики определения биологической активности почвы по Штатнову [44, 45]. В целом этот метод отличается

простотой, использованием недорогого лабораторного оборудования, возможностью проведения определений с достаточной повторностью, что сделало его весьма популярным среди исследователей и объектом непрекращающегося по сей день совершенствования [1, 28, 30, 32, 33, 37, 46, 47].

К сожалению, ни камерный, ни абсорбционный методы полностью не удовлетворяют выше обозначенным требованиям. Можно полагать, что камерный метод при использовании современных инфракрасных газоанализаторов наиболее точно измеряет фактическую скорость эмиссии CO_2 из почвы в данный момент времени, поскольку в течение непродолжительных экспозиций (1–2 мин), когда камера закрыта крышкой, вряд ли могут существенно изменяться факторы, влияющие на биологическую активность почвы. Однако этим методом затруднительно определять среднесуточную скорость продуцирования CO_2 почвой (чтобы рассчитывать суммарные потери углерода за длительный период), а также одновременно вести наблюдения за эмиссией CO_2 при большом числе вариантов и повторностей. Для расчета на основе камерного метода среднесуточной скорости продуцирования CO_2 рекомендуется проводить измерения в определенные часы суток [24, 39, 48–50] или вносить поправки, учитывающие зависимость эмиссии CO_2 в течение суток от температуры почвы или воздуха [51, 52]. Разумеется, наиболее правильным решением является непосредственное экспериментальное определение внутрисуточной динамики дыхания почвы либо в ручном режиме [33], либо с помощью автоматических систем измерения [35].

Часть методик, разработанных на основе абсорбционного метода, рассчитана на проведение определений в том числе и при 24-часовой экспозиции, что позволяет рассчитывать месячную и сезонную эмиссию CO_2 из почвы, проводя измерения с определенной частотой, обычно не чаще 1 раза в неделю [28, 46, 53, 54]. При этом следует подчеркнуть одно важное преимущество абсорбционного метода, заключающееся в том, что один сотрудник может одновременно измерять среднесуточную скорость эмиссии CO_2 на различных почвенных фонах, используя 40–50 сосудов. Это позволяет проводить определения дыхания почвы в одно и то же время на многих площадках (вариантах опыта) при достаточной повторности. Однако этот метод нельзя использовать для измерения дыхания почвы при отрицательных температурах воздуха из-за возможного замерзания раствора щелочи. Поэтому при оценке баланса углерода в почве в целом за год эмиссию CO_2 в холодный период (ноябрь–апрель) следует определять либо камерным методом, либо рассчитывать на основе уравнений [25, 40], описывающих зависимость дыхания почвы от температуры.

У абсорбционного метода существует и другая проблема. Дело в том, что фактически этим методом измеряется не скорость продуцирования (образования) углекислого газа в почве, а скорость его поглощения раствором щелочи. Условием соответствия получаемых данных фактическому образованию CO_2 в почве является обеспечение в течение экспозиции равновесия потоков продуцирования и поглощения CO_2 , что в сущности равнозначно сохранению в сосуде-изоляторе естественного градиента концентрации CO_2 в системе “почвенный воздух–надпочвенный воздух” [23, 55]. Выполнение этого условия осложняется по нескольким причинам. Во-первых, для установления равновесия потоков в сосуде-изоляторе требуется определенное время, названное переходным периодом [55]. Он тем продолжительнее, чем больше объем надземной части изолятора и меньше поглотительная поверхность раствора щелочи. Задача сводится к подбору таких параметров сосуда-изолятора и поглотителя, при которых продолжительность этого периода в сравнении с экспозицией будет пренебрежимо малой. Во-вторых, под влиянием сосуда-изолятора может изменяться температура почвы [23, 55, 56], что, как уже отмечено, может оказывать влияние на скорость образования CO_2 . Наконец, в-третьих, практически сразу после начала измерения способность раствора щелочи поглощать углекислый газ начинает постепенно уменьшаться, что может приводить к его накоплению в надпочвенной части изолятора, т.е. занижению результатов, в том числе и за счет снижения скорости диффузии CO_2 из почвы [23, 36, 54, 57, 58].

Факт постепенного замедления скорости поглощения углекислого газа раствором щелочи хорошо

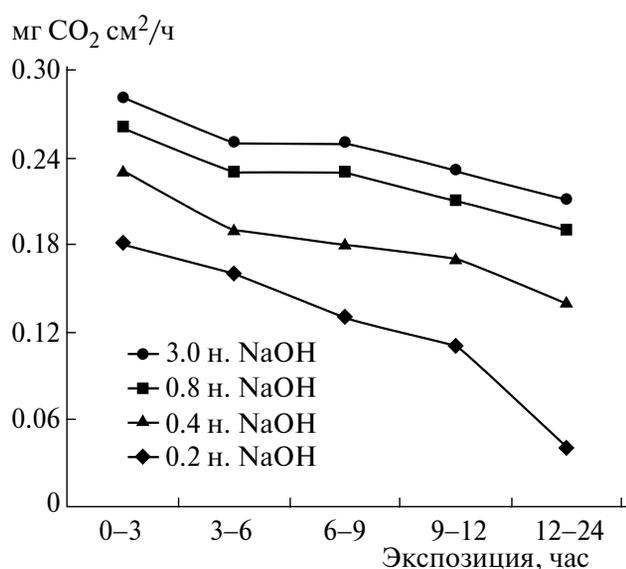


Рис. 1. Динамика поглощения CO_2 из воздуха растворами щелочи разной концентрации [57].

иллюстрируется при неограниченном к нему притоке CO_2 из воздуха (рис. 1).

Видно, что это замедление наблюдается на всем протяжении суточного периода и более выражено при меньших концентрациях раствора щелочи. Например, по отношению к экспозиции 0–3 ч скорость поглощения CO_2 0.8 н. NaOH в период 12–24 ч составила только 73, 0.4 н. NaOH — 61%. Следовательно, для измерения фактической эмиссии CO_2 в широком диапазоне биологической активности почвы диаметр сосуда-изолятора и экспозиция, определяющие количество диффундирующего CO_2 , должны определенным образом соответствовать параметрам поглотителя — поверхности, концентрации и объему раствора щелочи.

Таким образом, хотя некоторые модификации абсорбционного метода рассчитаны на определение среднесуточной скорости продуцирования CO_2 почвой, при этом возникают вопросы о соответствии получаемых данных фактическому дыханию почвы. Ответы на них можно получить только при проведении специальных исследований. Определенный интерес в этом отношении представляет аналитическое сравнение результатов измерения с данными других методов.

СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ, ПОЛУЧЕННЫХ РАЗНЫМИ МЕТОДАМИ

На основе камерного и абсорбционного методов предложено немало методик (модификаций) определения продуцирования CO_2 почвой, поэтому, говоря о сравнении методов, следует иметь в виду, что на самом деле сравниваются различные их модификации. Это важно, поскольку существуют, на наш взгляд, не вполне удачные методики, и они не должны ассоциироваться с методом в целом.

Непосредственное сравнение результатов камерного и абсорбционного методов по скорости эмиссии CO_2 из почвы может быть затруднено из-за разницы в продолжительности экспозиции: в первом из них, как уже отмечено, она составляет от десятков секунд до нескольких минут, во втором — от 2–3 ч до 24 ч. Однако это затруднение легко преодолевается, если полученные данные использовать для оценки эмиссии углерода либо за сутки, либо за какой-либо период — месяц, сезон и т.д., и методы сравнивать между собой по этой суммарной эмиссии.

Наиболее часто в литературе встречается мнение, что данные, полученные абсорбционным методом, занижены [33, 46, 53, 59], значительно реже — завышены [32] либо соответствуют показателям камерного метода [37]. Также подчеркивают [27, 33, 36, 60], что заниженные показатели обычно регистрируются при повышенных уровнях дыхания почвы.

Результаты многих исследований свидетельствуют о том, что основная причина получения абсорбционным методом заниженных данных связана с неполным поглощением CO_2 раствором щелочи [23, 28, 54, 61–63]. Способность щелочи поглощать CO_2 при неизменных концентрации и объеме раствора определяется активной поверхностью последнего, или кратко – площадью поглотителя. Для обеспечения полноты абсорбции CO_2 , в особенности при повышенной интенсивности дыхания почвы, рекомендуется, чтобы площадь поглотителя находилась в пределах 20–25% от площади изоляции – поверхности почвы, накрываемой сосудом-изолятором [37, 53, 64, 65]. Также на основе анализа многих модификаций абсорбционного метода рекомендовано использовать 0.5–1.0 М растворы щелочи (NaOH или KOH), причем ее расход за экспозицию не должен превышать 35–40% [23, 61].

Сказанное позволяет более предметно анализировать причины различий данных, полученных разными методами при сравнительных исследованиях. В частности, в работе [33] авторы сравнивали абсорбционный и динамический камерный методы, причем в последнем воздухе не циркулировал между камерой и газоанализатором, а его пропускали с небольшой скоростью через надземную часть камеры. Определения проводили в штате Флорида (США) на слабо дренированной песчаной почве. В феврале, при сравнительно низкой скорости эмиссии CO_2 из почвы ($\approx 200 \text{ мг CO}_2/\text{м}^2/\text{ч}$), результаты обоих методов были близкими. Однако при повышении биологической активности почвы в весенне-летний период результаты абсорбционного метода оказались меньше, чем камерного, примерно в 2 раза (табл. 1).

По мнению самих авторов, эти различия могли быть обусловлены дополнительным выделением CO_2 из почвенного воздуха в камерном методе под влиянием движения воздуха через надпочвенное пространство камеры. Однако обращает на себя внимание не вполне удачная, по нашему мнению, модификация абсорбционного метода, которую использовали авторы. Во-первых, площадь поглотителя составляла всего лишь 9.6% от накрываемой сосудом площади поверхности почвы. Во-вторых, использовали слишком большой сосуд-изолятор (12.5 л), причем объем его надземной части в процессе измерения

составлял 9.2 л против 0.4–1.0 л в большинстве других модификаций абсорбционного метода. Можно полагать, что при низкой интенсивности дыхания почвы ($\approx 200 \text{ мг CO}_2/\text{м}^2/\text{ч}$) концентрация CO_2 в надпочвенной части изолятора примерно соответствовала равновесной концентрации, при которой потоки “выделения CO_2 из почвы” и “поглощения CO_2 раствором щелочи” были уравновешены (оба метода показали близкие результаты). При увеличении интенсивности дыхания (табл. 1) в весенне-летний период в 3.2–4.3 раза (судя по камерному методу) для уравнивания этих потоков равновесная концентрация CO_2 в надпочвенной части сосуда-изолятора должна повыситься, как минимум, во столько же раз. По нашему мнению, это и явилось основной причиной занижения результатов. Во-первых, для достижения такой концентрации CO_2 в сосуде требуется определенное время, причем из-за достаточно большого объема изолятора оно оказалось, по-видимому, существенным для применявшейся авторами не слишком большой экспозиции – 6 ч. Во-вторых, кратное увеличение концентрации CO_2 в надпочвенном воздухе изолятора, безусловно, снизило скорость диффузии газа, о чем свидетельствовали исследования других авторов [58, 66].

В аналогичном исследовании [46] также сравнивали результаты, полученные динамическим камерным и абсорбционным методами. При этом площадь поглотителя – 2.0 М раствора NaOH в последнем составляла всего лишь 4% от площади почвы, накрытой изолятором. Столь маленькая поглотительная способность абсорбента CO_2 явилась, по-видимому, основной причиной получения данной модификацией заниженных данных, причем как при низкой, так и повышенной интенсивности дыхания почвы. Вполне ожидаемо, что при такой малой площади поглотителя абсолютные и относительные различия между методами увеличивались при повышении биологической активности почвы, например: камерный метод – 158, 475 и 790 $\text{мг CO}_2/\text{м}^2/\text{ч}$, абсорбционный – 100, 200 и 316 $\text{мг CO}_2/\text{м}^2/\text{ч}$ соответственно.

В работе [37] абсорбционный метод сравнивали с динамическим камерным методом, причем у последнего камера функционировала в автоматическом режиме, измеряя поток CO_2 из почвы каждые 20 мин при экспозиции 2 мин. Площадь поглотителя

Таблица 1. Сравнительное определение эмиссии CO_2 из почвы камерным и абсорбционным методами, $\text{мг CO}_2/\text{м}^2/\text{ч}$ [33]

Срок определения	Камерный метод	Абсорбционный метод	Абсорбционный метод по отношению к камерному, %
24 февраля	238	257	108
17 мая	854	374	43
16 июня	648	357	55
14 июля	864	423	49

в использованной модификации абсорбционного метода составляла 19% от площади изоляции почвы. Оба метода показали близкие результаты, однако при повышенной скорости эмиссии CO_2 из почвы ($670 \text{ мг CO}_2/\text{м}^2/\text{ч}$) и экспозиции 24 ч абсорбционный метод показал занижение результата примерно на 11%. Авторы предположили, что увеличение площади поглотителя позволит уменьшить эту разницу.

О полноте поглощения CO_2 раствором щелочи можно судить не только на основании сравнения данных абсорбционного и камерного методов. В работе [28] это сделано на основании сопоставления результатов дыхания почвы, полученных при экспозиции 0–24 ч и в сумме при экспозициях 0–8 ч, 8–16 ч, 16–24 ч. В качестве изолятора использовали тонкостенную дюралюминиевую трубу с внутренним диаметром 10 см и высотой 15 см, заглубленную в почву на 5 см. Поглотителем CO_2 являлись 10 мл 1 н. раствора NaOH в бюксе диаметром 5 см, т.е. площадь поглотителя составляла 25% от площади изоляции почвы. Определения проводили после внесения в почву измельченных растительных остатков. Со временем, вследствие их частичной минерализации, интенсивность дыхания почвы уменьшалась, что позволило провести измерения при разных скоростях эмиссии CO_2 . В начале измерения суммарное поглощение CO_2 раствором щелочи при экспозиции 0–24 ч было примерно в 2 раза меньше суммы показателей, зарегистрированных при 0–8, 8–16 и 16–24 ч (рис. 2).

В дальнейшем различия сглаживались, и, начиная с интенсивности дыхания $\approx 220 \text{ мг CO}_2/24 \text{ ч}$, когда было израсходовано $\approx 50\%$ щелочи, исчезали.

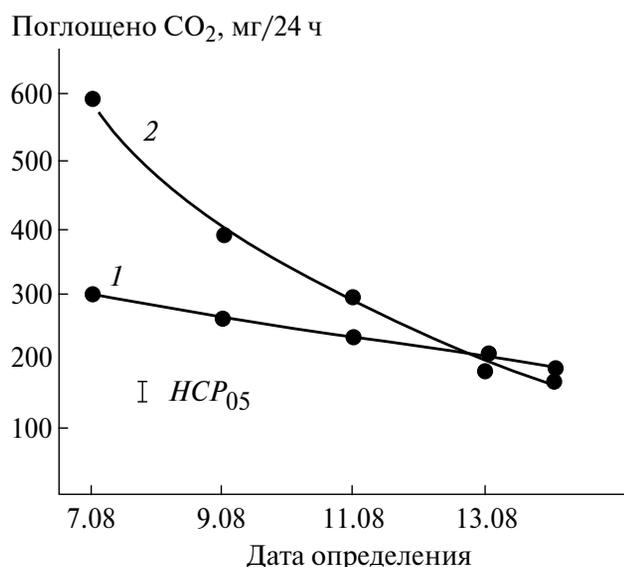


Рис. 2. Динамика поглощения CO_2 10 мл 1 н. NaOH при определении дыхания почвы при экспозиции 0–24 ч (1) и в сумме при экспозициях 0–8, 8–16 и 16–24 ч (2) [28].

Следовательно, величина 220 мг CO_2 характеризует верхний предел интенсивности продуцирования CO_2 , которую можно измерить при 24-часовой экспозиции, применяя в качестве поглотителя 10 мл 1 н. NaOH в бюксе диаметром 5 см. При диаметре сосуда-изолятора 10 см это соответствует скорости эмиссии $1150 \text{ мг CO}_2/\text{м}^2/\text{ч}$. Если скорость эмиссии больше, измерения рекомендуется проводить при 2-х последовательных экспозициях, например, 0–12 и 12–24 ч, для замены бюкса с раствором щелочи после разгерметизации изолятора требуется не более 10–15 с.

Однако не следует полагать, что проблема получения фактических показателей скорости эмиссии CO_2 из почвы абсорбционным методом кроется только в использовании достаточно большой площади поглотителя. В работе [32] измерения дыхания почвы проводили с помощью 25 мл раствора 1 н. КОН, который для повышения площади абсорбции был нанесен на пористый материал – губку. Результат оказался примерно на 30% больше в сравнении с камерным методом, что авторы объяснили повышением активности микроорганизмов вследствие понижения под влиянием поглотителя исходной концентрации CO_2 в воздухе камеры до 20–250 ppm.

Также требует более детального прояснения вопрос о влиянии на эмиссию CO_2 изменений температуры почвы и воздуха под изолятором. В целом для биологически активного слоя почвы, например 0–25 см, изменение температуры почвы в процессе экспозиции, по-видимому, будет не столь значительным, чтобы существенно повлиять на деятельность почвенных микроорганизмов. Было показано [55], что при суточной экспозиции в солнечные дни температура почвы на глубине 10 см под влиянием тонкостенного дюралюминиевого сосуда повышалась на $0.5\text{--}1.5^\circ\text{C}$. Однако ночью почва под сосудом охлаждалась быстрее, поэтому ее среднесуточная температура либо не изменялась, либо повышалась на 0.5°C , что гипотетически может интенсифицировать продуцирование почвой CO_2 не более чем на 5%. Однако показано [23], что температура воздуха в надпочвенной части сосуда-изолятора, в зависимости от материала его изготовления, может повышаться значительно сильнее – на $15\text{--}27^\circ\text{C}$, что может нарушать диффузию CO_2 из почвы за счет увеличения давления. Иногда для его компенсации в камерах используют специальные вентиляционные трубки [43]. Полагаем, что требуются дополнительные исследования, чтобы прояснить вопрос о необходимости таких трубок для сосудов-изоляторов в случае измерения дыхания почвы при суточной экспозиции.

Таким образом, оценивая ту или иную модификацию абсорбционного метода, необходимо вначале выяснить, способна ли она обеспечить полное улавливание CO_2 , который может выделиться из почвы в данных условиях. Далее следует понять, насколько сильно при этом будет нарушен естественный

градиент концентрации CO_2 в системе “почвенный воздух—надпочвенный воздух”. Как уже отмечали, этого нарушения трудно избежать, поскольку невозможно заранее предсказать, при какой концентрации CO_2 в надпочвенной части изолятора будут уравновешены потоки “выделения CO_2 из почвы—поглощения CO_2 щелочью”. Однако хорошо то, что при правильно подобранных параметрах (площадь изоляции почвы, объем, концентрация и площадь поверхности раствора щелочи, объем надпочвенной части изолятора) и обоснованной процедуре измерения (экспозиция, глубина врезания изолятора в почву) нарушенный градиент концентрации CO_2 способен частично или полностью восстанавливаться за счет соответствующего изменения концентрации CO_2 в почвенном воздухе. Для этого требуется определенное время – переходный период, и важно, чтобы его продолжительность была возможно меньшей в сравнении с экспозицией.

Проведенные разными исследователями определения дыхания почвы позволяют в первом приближении обозначить оптимальные параметры изолятора (внутренний диаметр 10 см, высота 15 см, врезание в почву на глубину 5–7 см) и поглотителя (1 н. раствор NaOH или KOH , объем 10 мл, внутренний диаметр бюкса 5.0–5.5 см, расход щелочи не более 50%) для измерения при суточной экспозиции скорости эмиссии до 1100 мг $\text{CO}_2/\text{м}^2/\text{ч}$. На наш взгляд, необходимы дополнительные исследования, чтобы выяснить, насколько полученные при таких параметрах сосуда-изолятора и поглотителя данные будут соответствовать фактической скорости эмиссии CO_2 из почвы. Также следует иметь в виду, что сравнение данных абсорбционного и камерного методов необходимо проводить либо по среднесуточной скорости эмиссии CO_2 из почвы, либо по суммарным потерям углекислого газа в целом за какой-либо период.

ОЦЕНКА БАЛАНСА УГЛЕРОДА В ПОЧВЕ

Традиционно баланс органического углерода в почвах агроценозов определяют по изменению его запасов в верхнем слое на делянках многолетних полевых опытов или производственных полях, которые длительное время подвергали различным агротехнологическим воздействиям [67–70]. Этот метод считается наиболее надежным, хотя он и не лишен недостатков. Основной из них заключается в том, что требуется слишком продолжительный период (как правило, более 10 лет) наблюдения, чтобы произошедшие в почве изменения в содержании $\text{C}_{\text{орг}}$ могли быть подтверждены с помощью методов математической статистики. Например, статистическая обработка данных анализов многолетних опытов, проведенных на Долгопрудной опытной станции, показала [71], что достоверными были лишь те различия в содержании $\text{C}_{\text{орг}}$ между вариантами, которые

составляли не менее 13% от количества элемента в почве. Понятно, что для почв биогеоценозов, обычно функционирующих в режимах близких к стационарному, такой подход неприемлем.

С этой точки зрения метод оценки баланса $\text{C}_{\text{орг}}$ в почве, основанный на сопоставлении ежегодных потерь $\text{C}-\text{CO}_2$ из SOM и прихода углерода в почву в виде надземной и подземной растительной биомассы, является более привлекательным, поскольку потенциально позволяет определять направленность изменения запаса $\text{C}_{\text{орг}}$ в почве всего лишь за один год. Метод основан на допущении [72], что бездефицитный баланс углерода в почве обеспечивается при равенстве среднегодовых величин поступления элемента в почву с надземной и подземной растительной массой и его потерь в виде CO_2 вследствие процессов минерализации SOM .

Однако использование этого метода таит в себе немалые сложности. Главная из них, как уже отмечали, заключается в вычленении в общем дыхании почвы гетеротрофной составляющей, т.е. минерализационных потерь SOM в виде CO_2 . Пока методы разделения общего дыхания почвы на гетеротрофную и автотрофную составляющие весьма несовершенные и трудоемкие [17–19, 73], и, по сути дела, само это разделение равнозначно проведению специального исследования. К тому же следует учитывать, что соотношение между автотрофным и гетеротрофным дыханием почвы изменяется в течение года, и для определения средней его величины в той или иной экосистеме необходимо проводить оценку хотя бы 3 раза в год, что весьма сложно. Экспертное же определение доли гетеротрофной составляющей в общем дыхании чревато значительными ошибками, поскольку, как показывают результаты исследований [14, 73], вклад дыхания корней в эмиссию CO_2 из почвы может изменяться в очень широких пределах – от 10 до 90%.

Не менее сложно дать точную оценку и среднегодового прихода углерода в почву. Создаваемая в экосистемах чистая первичная продукция (NPP) в виде надземной и подземной биомассы поступает в почву либо частично (агроценозы), либо полностью (биогеоценозы). По мнению специалистов [72], при определении NPP на одних и тех же площадках травяной экосистемы существующие методы могут давать 2–3-кратные различия. Поэтому подход к оценке баланса углерода на основании сравнения среднегодовых величин прихода элемента в почву и эмиссии $\text{C}-\text{CO}_2$ из SOM хотя и является оперативным, но при сегодняшнем уровне разработанности методик, к сожалению, может приводить к значительным ошибкам.

Однако эти ошибки можно уменьшить, а сам метод заметно упростить, если среднегодовую минерализацию SOM оценивать в паровом поле, исключив

таким образом необходимость разделения общего дыхания почвы на автотрофную и гетеротрофную составляющие. Как уже отмечали, наличие паровых полей в структуре пашни вполне естественно для большинства почв агроценозов. Однако возникает вопрос: насколько среднегодовые масштабы минерализации органического вещества в паровом поле отличаются от таковых в почве под растениями. Давно установлено, что средняя температура почвы в паровом поле на 1–2°C выше, чем в почве под растениями [74], что, как уже отмечалось, при $Q_{10} = 2$ может интенсифицировать процесс минерализации на 7–14%. Можно полагать, что различия во влажности между парующейся и занятой растениями почвой будут менее заметно сказываться на масштабах минерализации *SOM*. Дело в том, что почва под растениями более сильно и чаще иссушается, и, разумеется, это должно способствовать торможению процесса минерализации. Однако, согласно эффекту Бирча [46], после увлажнения почва выделяет тем больше CO_2 , чем сильнее была иссушена, и это должно сглаживать различия в минерализации *SOM* в пару и под покровом растений. Прямые 3-летние наблюдения за минерализацией меченой ^{14}C пшеничной соломы показали [76], что в занятой растениями почве процесс разложения проходил менее интенсивно, чем в почве пара, причем в первый год различие составило 17.3, во 2-й – 14.0, в 3-й – 12.0% (рис. 3).

Таким образом, ориентировочно можно принять, что количество минерализующегося *SOM* в почве под покровом растений на 10–15% меньше, чем в парующейся почве. Можно полагать, что, используя такую поправку для определения минерализации *SOM* под растениями, мы потенциально рискуем сделать ошибку значительно меньшую, чем при экспертном либо экспериментальном разделении общего

дыхания почвы на гетеротрофную и автотрофную составляющие.

О складывающемся в почве балансе углерода удобно судить на основании определения на парующейся площадке дозы растительного вещества (органического удобрения), обеспечивающей поддержание в почве бездефицитного баланса элемента [76]. Эта доза сравнивается с фактическим количеством органического вещества, которое поступает в почву в условиях агроценоза, и делается вывод о складывающемся в ней балансе углерода. Коротко процедура определения дозы удобрения сводится к следующему. Весной, сразу после достижения парующейся почвой физической спелости, на микроделянках размером 30 × 30 (см) в почву вносят возрастающие дозы измельченного органического удобрения (растительного материала), например, из расчета 3.0, 6.0 и 9.0 т воздушно-сухого вещества/га. В центр каждой микроделянки, в том числе без внесения материала, врезают сосуд-изолятор (рис. 4) и путем определения 1 раз в неделю среднесуточной скорости продуцирования CO_2 почвой рассчитывают суммарную за теплый период (май–октябрь) эмиссию CO_2 из почвы.

Она включает минерализационные потери собственно органического вещества почвы и внесенного удобрения (растительного вещества), а также учитывает возможное изменение под влиянием последнего минерализационно-иммобилизационных процессов (priming effect). Доза органического материала, обеспечивающая в почве бездефицитный баланс углерода, находится с помощью графика. Для его построения по осям абсцисс и ординат в одинаковом масштабе откладывают соответственно приход углерода в почву и его расход (эмиссию) за период наблюдения. Затем проводят биссектрису координатного угла. Точка ее пересечения с графиком соответствует дозе удобрения, при которой в почве

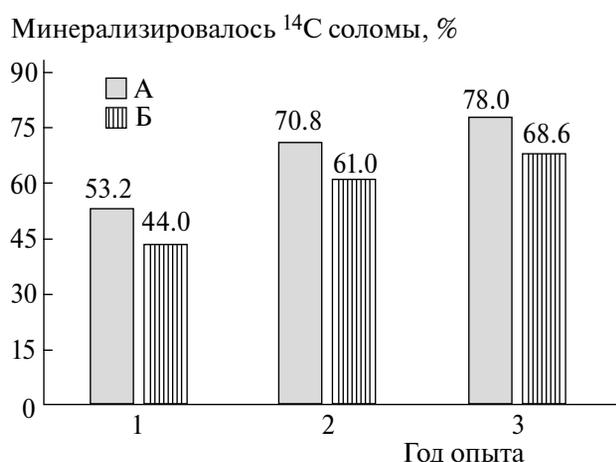


Рис. 3. Сравнительное определение степени минерализации меченой ^{14}C пшеничной соломы в парующейся (А) и занятой растениями (Б) почве [76].

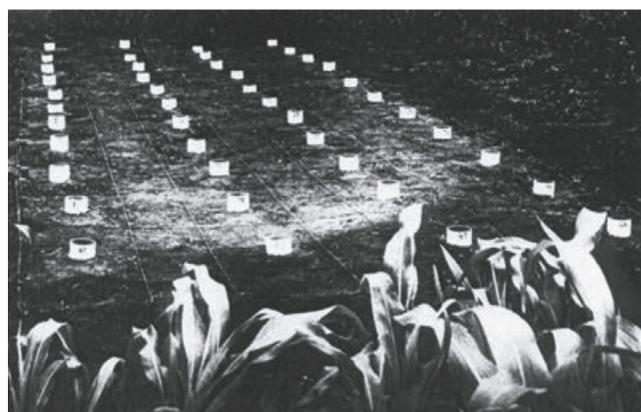


Рис. 4. Общий вид площадки для определения эмиссии CO_2 парующейся почвой на микроделянках (сосуды-изоляторы со снятыми крышками в промежутках между измерениями) [76].

обеспечивается бездефицитный баланс углерода. При поступлении в почву органического вещества в количествах меньших или больших этой дозы в почве будет складываться, соответственно, отрицательный или положительный баланс $C_{орг}$.

Подход к определению на парующейся площадке минерализационных потерь углерода и доз органических удобрений (растительных остатков), обеспечивающих поддержание в почве бездефицитного баланса SOM , может рассматриваться в качестве более простой альтернативы традиционному методу, основанному на вычлениении тем или иным способом гетеротрофной составляющей из общей эмиссии CO_2 из почвы. В качестве методического приема этот подход, по-видимому, можно использовать и в естественных травяных биогеоценозах, поддерживая площадки в парующем состоянии на протяжении всего вегетационного периода путем систематического (1–2 раза в неделю) удаления (срезания) надземной части растений. Конечно, для этого необходимо решить ряд методических вопросов, в частности, установить, как быстро происходит отмирание корневой системы в травяных биоценозах при прекращении нисходящего потока ассимилянтов вследствие удаления надземной части растений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ литературных материалов показывает, что для успешного использования показателя эмиссии CO_2 в расчетах баланса углерода в почве предстоит решить ряд достаточно сложных методических задач. Прежде всего, необходимо доработать наиболее часто используемые камерный и абсорбционный методы до уровней, позволяющих определять фактическую среднесуточную скорость эмиссии CO_2 почвой. Движение в этом направлении должно привести к появлению общепризнанных модификаций методов, обеспечивающих получение одинаковых (близких) результатов. Также требуется совершенствование методов количественного разделения общего дыхания почвы на гетеротрофную и автотрофную составляющие, без чего невозможно по показателю эмиссии CO_2 оценивать годовые масштабы минерализации органического вещества почвы. В результате этого совершенствования должна появиться достаточно простая методика, позволяющая оценивать в различных биогеоценозах среднегодовые соотношения между этими составляющими. Возможно, что значительный нереализованный методический потенциал для решения этой задачи кроется в использовании для определения дыхания почвы площадок без растительного покрова, эмиссия CO_2 на которых всецело определяется деятельностью микробного комплекса почвы, минерализующего SOM .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Макаров Б.Н. Газовый режим почвы. М.: Агропромиздат, 1988. 104 с.
2. Кудяров В.Н., Заварзин Г.А., Благодатский С.А., Борисов А.В., Воронин П.Ю., Демкин В.А., Демкина Т.С., Евдокимов И.В., Замолотчиков Д.Г., Карелин Д.В., Комаров А.С., Курганова И.Н., Ларионова А.А., Лопес де Гереню В.О., Уткин А.И., Чертов О.Г. Пулы и потоки углерода в наземных экосистемах России. М.: Наука, 2007. 315 с.
3. Семенов В.М., Козут Б.М. Почвенное органическое вещество. М.: ГЕОС, 2015. 233 с.
4. Курганова И.Н., Лопес де Гереню В.О., Жиенгалиев А.Т., Кудяров В.Н. Углеродный бюджет степных экосистем России // Докл. АН. 2019. Т. 485. С. 732–735.
5. Кудяров В.Н. Влияние удобрений и системы земледелия на секвестрацию углерода в почвах // Агрохимия. 2022. № 12. С. 79–96.
6. Шарков И.Н., Антипина П.В. Некоторые аспекты углерод-секвестрирующей способности пахотных почв // Почвы и окружающая среда. 2022. Т. 5. № 2.
7. Чимитдоржиева Г.Д. Пути секвестрации углерода при землепользовании (обзор литературы) // Сибир. экол. журн. 2023. № 3. С. 238–252.
8. Кудяров В.Н. Дыхание почв и биогенный сток углекислого газа на территории России (аналитический обзор) // Почвоведение. 2018. № 6. С. 643–658.
9. Kelting D.L., Burger J.A., Edwards G.S. Estimating root respiration, microbial respiration in the rhizosphere, and root-free soil respiration in forest soils // Soil Biol. Biochem. 1998. V. 30. № 7. P. 961–968.
10. Кузяков Я.В., Ларионова А.А. Вклад ризомикробного и корневого дыхания в эмиссию CO_2 из почвы (обзор) // Почвоведение. 2006. № 7. С. 842–854.
11. Creamer R.E., Schulte R.P.O., Stone D., Gal A., Krogh P.H., Lo Papa G., Murray Pérès P.J.G., Foerster B., Rutgers M., Sousa J.P., Winding A. Measuring basal soil respiration across Europe: do incubation temperature and incubation period matter? // Ecol. Indic. 2014. V. 36. P. 409–418.
12. Сушко С.В., Ананьева Н.Д., Иващенко К.В., Кудяров В.Н. Эмиссия CO_2 , микробная биомасса и базальное дыхание чернозема при различном землепользовании // Почвоведение. 2019. № 9. С. 1081–1091.
13. Ryan M.G., Law B.E. Interpreting, measuring, and modeling soil respiration // Biogeochemistry. 2005. V. 73. № 1. P. 3–27.
14. Hanson P.G., Edwards N.T., Garten C.T., Andrews J.A. Separating root and soil microbial contribution to soil respiration: A review of methods and observations // Biogeochemistry. 2000. V. 48. № 1. P. 115–146.

15. Сапронов Д.В., Кузяков Я.В. Разделение корневого и микробного дыхания: сравнение трех методов // Почвоведение. 2007. № 7. С. 862–872.
16. Сушко С.В., Ананьева Н.Д., Иващенко К.В., Васенев В.И., Саржанов Д.А. Микробное дыхание почвы в полевых и лабораторных условиях // Агрофизика. 2016. № 4. С. 17–23.
17. Евдокимов И.В., Ларионова А.А., Шмитт М., Лопес де Гереню В.О., Бан М. Экспериментальная оценка вклада дыхания корней растений в эмиссию углекислого газа из почвы // Почвоведение. 2010. № 12. С. 1479–1488.
18. Гончарова О.Ю., Матышак Г.В., Бобрик А.А., Бобрик А.А., Тимофеева М.В., Сефилян А.Р. Оценка вклада корневого и микробного дыхания в общий поток CO₂ из торфяных почв и подзолов севера Западной Сибири методом интеграции компонентов // Почвоведение. 2019. № 2. С. 234–245.
19. Гончарова О.Ю., Матышак Г.В., Тимофеева М.В., Сефилян А.Р., Бобрик А.А., Тархов М.О. Автотрофное и гетеротрофное дыхание почв криолитозоны: оценка вкладов и методические подходы (на примере почв севера Западной Сибири) // Сибир. экол. журн. 2019. № 6. С. 654–667.
20. Громова М.С., Матвиенко А.И., Макаров М.И., Ченг Ш.К., Меняйло О.В. Температурная чувствительность (Q₁₀) базального дыхания как функция количества доступного углеродного субстрата, температуры и влажности // Почвоведение. 2020. № 3. С. 366–371.
21. Ларионова А.А., Квиткина А.К., Евдокимов И.В., Быховец С.С., Стулин А.Ф. Влияние температуры на интенсивность разложения лабильного и устойчивого органического вещества агрочернозема // Почвоведение. 2013. № 7. С. 803–803.
22. Meyer N., Welp G., Amelung W. Effect of sieving and sample storage on soil respiration and its temperature sensitivity (Q₁₀) in mineral soils from Germany // Biol. Fertil. Soils. 2019. V. 55. № 8. P. 825–832.
23. Rochette P., Hutchinson G.L. Measurement of soil respiration in situ: chamber techniques // Micrometeorol. Agricul. Syst. Agron. Monograph. 2005. № 47. P. 247–286.
24. Головацкая Е.А., Дюкарев Е.А. Сезонная и суточная динамика эмиссии CO₂ с поверхности олиготрофной торфяной почвы // Метеорол. и гидрол. 2011. № 6. С. 84–93.
25. Иванов А.В., Замолодчиков Д.Г., Сало М.А., Кондратова А.В., Пилецкая О.А., Брянин С.В. Дыхание почв лесных экосистем юга Дальнего Востока // Почвоведение. 2023. № 9. С. 1023–1033.
26. Саржанов Д.А., Васенев В.И., Сотникова Ю.Л., Тембо А., Васенев И.И., Валентини Р. Краткосрочная динамика и пространственная неоднородность эмиссии CO₂ почвами естественных и городских экосистем Центрально-Черноземного региона // Почвоведение. 2015. № 4. С. 469–478.
27. Yang J., Huang J.H., Zhan X.M., Li X., Du L.H., Li L.H. The diurnal dynamic patterns of soil respiration for different plant communities in the agropastoral ecotone with reference to different measuring methods // Chin. J. Plant Ecol. 2004. V. 28. № 3. P. 318–325.
28. Шарков И.Н. Совершенствование абсорбционного метода определения выделения CO₂ из почвы в полевых условиях // Почвоведение. 1987. № 1. С. 127–133.
29. Шарков И.Н., Шепелев А.Г., Мишина П.В. Продуцирование CO₂ пашней на черноземе выщелоченном в условиях центральной лесостепи Западной Сибири // Агрохимия. 2013. № 5. С. 51–57.
30. Singh J.S., Gupta S.R. Plant decomposition and soil respiration in terrestrial ecosystems // Bot. Rev. 1977. V. 43. № 4. P. 449–528.
31. Курганова И.Н., Лопес де Гереню В.О., Хорошаев Д.А., Мякшина Т.Н., Сапронов Д.В., Жмурин В.А., Кудяров В.Н. Анализ многолетней динамики дыхания почв в лесном и луговом ценозах Приокско-Террасного биосферного заповедника в свете современных климатических трендов // Почвоведение. 2020. № 10. С. 1220–1236.
32. Bekku Y., Koizumi H., Oikawa T., Iwaki H. Examination of four methods for measuring soil respiration // Appl. Soil Ecol. 1997. V. 5. № 3. P. 247–254.
33. Cropper W.P., Ewel K.C., Raich J.W. The measurement of soil CO₂ evolution *in situ* // Pedobiologia. 1985. V. 28. № 1. P. 35–40.
34. Муравьева Е.А., Кулакова Е.С. Обзор приборной базы по контролю парниковых газов // Нанотехнол. в строительстве. 2022. Т. 14. С. 62–69.
35. Дюкарев Е.А., Сабреков А.Ф., Глаголев М.В., Киселев М.В., Филиппов И.В., Дмитриченко А.А., Лапина Е.Д. Оценка эмиссии и поглощения парниковых газов болотными экосистемами территории лицензионных участков Салымской группы месторождений Нефтеюганского района Ханты-Мансийского автономного округа // Сибир. экол. журн. 2022. № 6. С. 728–741.
36. Davidson E.A., Savage K., Verchot L.V., Navarro R. Minimizing artifacts and biases in chamber-based measurements of soil respiration // Agricult. Forest Meteorol. 2002. V. 113. № 1. P. 21–37.
37. Schiedung H., Bauke S., Bornemann L., Welp G., Borchard N., Amelung W. A simple method for in-situ assessment of soil respiration using alkali absorption // Appl. Soil Ecol. 2016. V. 106. P. 33–36.
38. Гончарова О.Ю., Матышак Г.В., Тимофеева М.В., Чуванов С.В., Тархов М.О., Исаева А.В. Эмиссия CO₂ почвами экотонной зоны севера Западной Сибири // Почвоведение. 2023. № 9. С. 1034–1048.
39. Курганова И.Н., Лопес де Гереню В.О., Мякшина Т.Н., Сапронов Д.В., Хорошаев Д.А., Аблеева В.А. Температурная чувствительность дыхания почв

- луговых ценозов в зоне умеренно-континентального климата: анализ данных 25-летнего мониторинга // Почвоведение. 2023. № 9. С. 1059–1076.
40. *Осинов А.Ф.* Эмиссия CO₂ с поверхности почвы на 10-летней вырубке среднетаежного сосняка черничного на европейском Северо-Востоке России // Почвоведение. 2023. № 9. С. 1049–1058.
 41. *Суховеева О.Э., Карелин Д.В., Золотухин А.Н., Почикалов А.В.* Дыхание почвы в аграрных и природных экосистемах европейской территории России // Почвоведение. 2023. № 9. С. 1077–1088.
 42. *Maier M., Weber T.K., Fiedler J., Fuss R., Glatzel S., Huth V., Jordan S., Jurasinski G., Kutzbach L., Schäfer K., Weymann D., Hagemann U.* Introduction of a guideline for measurements of greenhouse gas fluxes from soils using non-steady-state chambers // J. Plant Nutr. Soil Sci. 2022. V. 185. № 4. P. 447–461.
 43. *Hutchinson G.L., Livingston G.P.* Vents and seals in non-steady-state chambers used for measuring gas exchange between soil and the atmosphere // Eur. J. Soil Sci. 2001. V. 52. № 4. P. 675–682.
 44. *Мина В.Н., Макаров Б.Н., Мацкевич В.Б., Штатнов В.И.* Методы изучения воздушного режима почв при стационарных исследованиях // Почвоведение. 1963. № 6. С. 48–57.
 45. *Штатнов В.И.* К методике определения биологической активности почвы // Докл. ВАСХНИЛ. 1952. Вып. 6. С. 27–30.
 46. *Кноерп J.D., Vose J.M.* Quantitative comparison of *in situ* soil CO₂ flux measurement methods. Resch. Pap. SRS-28. Asheville, NC: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Southern Research Station. 2002. 11 p.
 47. *Minderman G., Vulto I.C.* Comparison of techniques for the measurement of carbon dioxide evolution from soil // Pedobiologia. 1973. V. 13. № 2. P. 73–80.
 48. *Курганова И.Н., Розанова Л.Н., Сапронов Д.В., Мякшина Т.Н., Кудеяров В.Н.* Оценка эмиссии диоксида углерода из пахотных серых лесных почв // Агрохимия. 2002. № 9. С. 52–57.
 49. *Ларионова А.А., Розанова Л.Н.* Суточная, сезонная и годовая динамика выделения CO₂ из почвы. Дыхание почвы. Пушкино: ОНТИ ПНЦ РАН, 1993. С. 59–68.
 50. *Меняйло О.В., Матвиенко А.И., Степанов А.Л., Макаров М.И.* Определение потока CO₂ из почв: роль глубины колец // Экология. 2015. № 2. С. 120–124.
 51. *Головацкая Е.А., Дюкарев Е.А.* Влияние факторов среды на эмиссию CO₂ с поверхности олиготрофных торфяных почв Западной Сибири // Почвоведение. 2012. № 6. С. 658–658.
 52. *Parkin T.B., Kaspar T.C.* Temperature controls on diurnal carbon dioxide flux // Soil Sci. Soc. Amer. J. 2003. V. 67. № 6. P. 1763–1772.
 53. *Coleman D.C.* Soil carbon balance in a successional grassland // Oikos. 1973. V. 24. P. 195–199.
 54. *Gupta S.R., Singh J.S.* Effect of alkali concentration, volume and absorption area on the measurement of soil respiration in a tropical sward // Pedobiologia. 1977. V. 17. P. 233–239.
 55. *Sharkov I.N.* Determination of the rate of soil CO₂ production by the absorption method // Soviet Soil Sci. 1984. V. 16. № 3. P. 102–111.
 56. *Matthias A.D., Blackmer A.M., Bremner J.M.* A simple chamber technique for field measurement of emissions of nitrous oxide from soils // J. Environ. Qual. 1980. V. 9. № 2. P. 251–256.
 57. *Шарков И.Н.* Исследование параметров раствора щелочи как абсорбента CO₂ при определении дыхания почвы // Почвоведение. 1983. № 1. С. 132–138.
 58. *McDermitt D.K., Xu L., Madsen R., Demetriades-Shah T., Garcia R., Furtaw M.* Feedback of ambient air CO₂ concentration on soil CO₂ efflux // Geophys. Res. Abstr. 2007. V. 9. P. 10613.
 59. *Kucera C.L., Kirkham D.R.* Soil respiration studies in tallgrass prairie in Missouri // Ecology. 1971. V. 52. № 5. P. 912–915.
 60. *Jensen L.S., Mueller T., Tate K.R., Ross D.J., Magid J., Nielsen N.E.* Soil surface CO₂ flux as an index of soil respiration *in situ*: A comparison of two chamber methods // Soil Biol. Biochem. 1996. V. 28. № 10–11. P. 1297–1306.
 61. *Иванникова Л.А.* Применение абсорбционного метода для определения естественного потока CO₂ из почвы // Почвоведение. 1992. № 6. С. 133–139.
 62. *Freijer J.I., Bouten W.* A comparison of field methods for measuring soil carbon dioxide evolution: experiments and simulation // Plant and Soil. 1991. V. 135. № 1. P. 133–142.
 63. *Kirita H.* Re-examination of the absorption method of measuring soil respiration under field conditions. II. Effect of the size of the apparatus on CO₂-absorption rates // Jap. J. Ecol. 1971. V. 21. P. 37–42.
 64. *Anderson J.P.E.* Soil respiration // Methods of soil analysis. P. 2. Chemical and microbiological properties / Ed. Page A.L. Madison, WI: Soil Science Society of America, 1982. P. 837–871.
 65. *Mina V.N.* Comparison of methods for determining the intensity of soil respiration // Sov. Soil Sci. 1962. V. 10. P. 1188–1192.
 66. *Golovatskaya E.A., Dyukarev E.A.* CO₂ Emission from oligotrophic peatland soil of Western Siberia // Environ. Dynamic. Global Climate Change. 2010. V. 1. № 2. P. 7.
 67. *Сычев В.Г., Налиухин А.Н., Шевцова Л.К., Рухович О.В., Беличенко М.В.* Влияние систем удобрения на содержание почвенного органического углерода и урожайность сельскохозяйственных культур: результаты длительных полевых опытов Географической сети России // Почвоведение. 2020. № 12. С. 1521–1536.

68. Сычев В.Г., Налиухин А.Н., Ерегин А.В., Шаранова Н.Р., Демидов Д.В. Углерод-секвестрирующая оценка различных систем удобрения и определение эмиссии N_2O в длительном полевом опыте // Плодородие. 2022. № 6. С. 73–77.
69. Prokopyeva K., Romanenkov V., Sidorenkova N., Pavlova V., Siptits S., Krasilnikov P. The Effect of crop rotation and cultivation history on predicted carbon sequestration in soils of two experimental fields in the Moscow region, Russia // Agronomy. 2021. V. 11. P. 226.
70. Titlyanova A.A., Shibareva S.V. Change in the net primary production and carbon stock recovery in fallow soils // Euras. Soil Sci. 2022. V. 55. P. 501–510.
71. Щерба С.В., Юдин Ф.А. Методика полевого опыта с удобрениями // Агрохимические методы исследования почв. М.: Наука, 1975. С. 526–584.
72. Титлянова А.А., Базилиевич Н.И., Шмакова Е.И., Снытко В.А., Дубынина С.С., Магомедова Л.Н., Нефедьева Л.Г., Семенюк Н.В., Тишков А.А., Ти Т., Хакимзянова Ф.И., Шатохина Н.Г., Кыргыз Ч.О., Самбуу А.Д. Биологическая продуктивность травяных экосистем. Географические закономерности и экологические особенности. Новосибирск: ИПА СО РАН, 2018. 110 с.
73. Subke J.A., Ingleton I., Cotrufo M.F. Trends and methodological impacts in soil CO_2 efflux partitioning: A meta-analytical review // Global Change Biol. 2006. V. 12. P. 921–943.
74. Шульгин А.М. Температурный режим почвы. Л.: Гимиз, 1957. 242 с.
75. Birch H.F. The effect of drying on humus decomposition and nitrogen availability // Plant and Soil. 1958. V. 10. P. 9–31.
76. Шарков И.Н. Изучение минерализации и баланса органического вещества в почвах агроценозов // Методы исследований органического вещества почв. М.: Россельхозакадемия–ВНИПТИОУ, 2005. С. 359–376.

Estimation of Soil Carbon Balance Based on CO_2 Emission Determination

I. N. Sharkov^{a,#}, A. S. Chumbaev^a, V. A. Androkhano^a

^a*Institute of Soil Science and Agrochemistry, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, prosp. Lavrenteva 8/2, Novosibirsk 630090, Russia*

[#]*E-mail: humus3@yandex.ru*

The increased interest nowadays in quantitative assessment of soil respiration is largely due to studies of the role of various terrestrial ecosystems in changing the concentration of the most important greenhouse gas, CO_2 , in the atmosphere. The review considers methodological aspects of determining the actual CO_2 emission from soils using chamber and absorption methods, as well as the use of the obtained data to assess the carbon balance in soils. Successful development of this topic will allow to promptly get an answer to the main question of this pressing environmental issue: what is the soil of this or that ecosystem for atmospheric CO_2 – a net source or a net sink? The article analyzes the results of works devoted to comparative determination of CO_2 emission from soils by these methods. It is shown that the widespread opinion about obtaining underreported data by absorption method is often based on studies in which the basic principles of the method were violated. It is concluded that it is necessary to carry out in-depth comparative studies on determination of average daily indicators of CO_2 emission from soil by chamber and absorption methods. It is recognized that, regardless of the method, the main problem in using CO_2 production data to estimate soil C balance is the adequate partitioning of total respiration into heterotrophic and autotrophic components, the ratio between which varies widely depending on soil and vegetation conditions. Due to imperfection and labor intensity of existing methods, this division can cause significant errors in determining the annual mineralization of soil organic matter. To reduce them, the approach to determination of mineralization losses of CO_2 in bare fallow soils is considered. It is natural for soils of agroecosystems, but as a methodological technique can probably be used in natural grass ecosystems as well. Reduction of errors can be ensured due to the fact that differences in actual mineralization of organic matter in bare fallow and plant-occupied soils are several times less than changes in the ratio between heterotrophic and autotrophic components of soil respiration in different biogeocenoses.

Keywords: soil respiration, chamber method, absorption method, soil carbon balance.