

УДК 631.433.3:631.417.1

<https://doi.org/10.31251/pos.v8i3.334>**Методика количественного определения дыхания почвы в полевых условиях**© 2025 И. Н. Шарков 

ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН, проспект Академика Лаврентьева, 8/2,
г. Новосибирск, 630090, Россия. E-mail: humus3@yandex.ru

Цель исследования. Разработка усовершенствованной методики определения фактической среднесуточной скорости эмиссии CO_2 из почвы в полевых условиях.

Место и время проведения. Апробация методики проведена в 2024 г. на темно-серой лесной почве ((Luvic Greyzemis Phaeozem (Siltic)) в правобережной части пригорода Новосибирска (район Академгородка) с координатами 54°51'03" с.ш., 83°11'00" в.д.

Метод. Методика представляет собой одну из модификаций абсорбционного метода определения дыхания почвы. Он основан на поглощении раствором щелочи диоксида углерода, диффузно выделяющегося из почвы. В полевых условиях чашечку с раствором щелочи помещают на поверхность почвы в сосуд-изолятор и закрывают его крышкой. После экспозиции, которая в зависимости от интенсивности дыхания и цели исследования может составлять несколько часов, сутки или быть кратной суткам, остаток щелочи оттитровывают кислотой и рассчитывают количество выделившегося из почвы CO_2 с учетом холостого определения.

Основные результаты. Усовершенствование методики связано с изменением конструкции сосуда-изолятора, параметров поглотителя и процедуры определения, что сделало ее более доступной и удобной для массового использования, а также позволило значительно повысить производительность работы. В качестве сосуда-изолятора используется тонкостенная ПВХ труба белого цвета с внутренним диаметром 10 см (площадь сечения 78,5 см²) и высотой 15 см, которая врезается в почву на 5–8 см и на период экспозиции закрывается крышкой. Поглотителем является 10 мл 1 н. раствора NaOH в пластиковой чашечке диаметром 6,2 см, что обеспечивает сорбционную поверхность раствора 30 см² – 38% накрываемой сосудом-изолятором поверхности почвы. Поглотитель рассчитан на улавливание в сосуде-изоляторе при суточной экспозиции 20–220 мг CO_2 , что позволяет измерять интенсивность дыхания почвы в диапазоне ~100–1200 мг $\text{CO}_2/\text{м}^2\cdot\text{ч}$. За счет увеличения экспозиции до 96 ч нижний предел можно понизить до 25 мг $\text{CO}_2/\text{м}^2\cdot\text{ч}$, а верхний – значительно увеличить благодаря двухступенчатому измерению, т.е. замене в сосуде-изоляторе раствора щелочи на новый раствор спустя 6–12 ч после начала экспозиции. В результате апробации методики были получены достоверные различия в месячной эмиссии C- CO_2 из почвы как в связи с состоянием растительности (залежь – чистый пар), так и по месяцам вегетационного периода – май – октябрь. Коэффициент вариации месячных значений эмиссии в большинстве случаев не превышал 10%, что объясняется небольшой площадью (около 25 м²) экспериментальных делянок и 4-кратной повторностью определения. За период май – октябрь темно-серая лесная почва под многолетней залежью потеряла 5,87 т/га C- CO_2 , а под чистым паром – 4,04. Использование методики в зимний период ограничивается замерзанием раствора щелочи при –3°С.

Заключение. Представлена методика количественного определения среднесуточной интенсивности дыхания почвы, разработанная на основании метода абсорбции. Обоснованы параметры сосуда-изолятора и поглотителя, а также процедура измерения, при которых возможно определение интенсивности дыхания почвы в широком диапазоне – от 25 до 1200 мг $\text{CO}_2/\text{м}^2\cdot\text{ч}$ и более. Представлены аргументы в пользу соответствия измеряемых с помощью методики данных фактической эмиссии CO_2 из почвы. Привлекательность методики для исследователей определяется высокой точностью (предел чувствительности $\pm 2\text{--}3$ мг CO_2) и производительностью определений (один сотрудник ежедневно может выполнять до 50 измерений), возможностью проведения определений в одно и то же время для большого числа вариантов опыта, отсутствием необходимости в титровании растворов щелочи сразу после экспозиции (это можно делать один раз в одну-две недели), возможностью перевозки до лаборатории герметично закрытых чашечек со щелочью автотранспортом, минимальным временем нахождения сотрудника в полевых условиях (только для расстановки и сбора чашечек), дешевой организацией оборудования и его доступностью, что важно для быстрой организации измерений; а также простотой и удобством работы (в частности, растворы щелочи титруются непосредственно в чашечках).

Ключевые слова: эмиссия CO_2 из почвы; камерный метод; абсорбционный метод; составляющие дыхания почвы; баланс углерода в почве.

Цитирование: Шарков И.Н. Методика количественного определения дыхания почвы в полевых условиях // Почвы и окружающая среда. 2025. Том 8. № 3. е334. DOI: [10.31251/pos.v8i3.334](https://doi.org/10.31251/pos.v8i3.334)

ВВЕДЕНИЕ

Процесс образования CO_2 в почве обуславливается в основном активностью ее обитателей – микроорганизмов и микрофауны, разлагающих **почвенное органическое вещество (ПОВ)**, и жизнедеятельностью корней растений. Интенсивность продуцирования CO_2 (дыхания почвы) включает, таким образом, гетеротрофную и автотрофную составляющие; в совокупности они характеризуют общую биологическую активность почвы. Для ее оценки, в связи с действием различных факторов, были разработаны первые методики определения дыхания почвы (Штатнов, 1952; Мина и др., 1963; Lundegardh, 1927).

Под количественной оценкой дыхания почвы в полевых условиях понимается определение фактической скорости эмиссии CO_2 из почвы в данное время. Безусловная необходимость в такой оценке возникает, если этот показатель используют в уравнениях расчета баланса углерода в почве. При этом требуется, как правило, знание потерь CO_2 из ПОВ за определенный период – месяц, сезон или год. Чтобы их рассчитать необходима методика, позволяющая, во-первых, количественно определять среднесуточную скорость эмиссии CO_2 из почвы и, во-вторых, вычленивать в общем дыхании гетеротрофную составляющую. Некоторые методические подходы к решению этой задачи были описаны нами ранее (Шарков и др., 2024).

Хотя методы определения дыхания почвы разрабатываются многие десятилетия, до настоящего времени нет общепризнанной стандартной методики количественного определения потерь CO_2 из почвы в полевых условиях (Федоров и др., 2021; Шарков и др., 2024). Это затрудняет сравнение данных, полученных разными исследователями, и значительно ограничивает возможности для оперативного решения вопросов, связанных с оценкой баланса углерода в почвах в связи с действием природных и антропогенных факторов. Такая оценка важна для разработки и совершенствования мероприятий по управлению плодородием почвы в агроценозах, а также поиска решений актуальной климатической проблемы – повышения способности природных и антропогенно преобразованных экосистем по связыванию атмосферного CO_2 с целью ослабления парникового эффекта.

В настоящее время наибольшее развитие получили методики определения дыхания почвы, относящиеся к двум методам – камерному и абсорбционному. Сегодняшний камерный метод ранее назывался более предметно – методом обогащения (Mina и др., 1963; Singh, Gupta, 1977). Суть его заключается в том, что камерой, обычно в форме цилиндра, накрывают поверхность почвы и на период экспозиции (обычно 1–5 мин) камеру закрывают крышкой. Диффундирующий из почвы диоксид углерода накапливается в надпочвенной части камеры и по изменению его концентрации рассчитывают скорость эмиссии газа. Благодаря появлению высокоточных портативных ИК-газоанализаторов, с помощью которых обогащение воздуха камеры диоксидом углерода измеряют непосредственно в поле, камерный метод стал особенно популярным среди исследователей (Муравьева, Кулакова, 2022; Курганова и др., 2023; Fiedler et al., 2022). Однако сложность в том, что такие газоанализаторы достаточно дорогие и в настоящее время выпускаются только зарубежными фирмами. Кроме этого, из-за внутрисуточной динамики дыхания почвы, чтобы при минутных экспозициях достаточно точно определить среднесуточную скорость эмиссии CO_2 , измерения необходимо проводить несколько раз в сутки. Это значительно усложняет методику. Поэтому было предложено измерять дыхание почвы один раз в сутки, но в период, когда оно примерно соответствует среднесуточной скорости выделения CO_2 из почвы. Таким периодом одни исследователи (Ларионова, Розанова, 1993) считают с 9 до 10 ч утра, другие (Головацкая, Дюкарев, 2011) – с 10 до 13 ч, а ряд авторов (Алферов и др., 2017) полагает, что среднесуточную скорость эмиссии CO_2 можно определить, проводя измерения с 11 до 19 ч. Ясно, что увеличение этого периода делает работу более удобной. Однако следует иметь в виду сделанный по этому поводу вывод (Головацкая, Дюкарев, 2011): расчет годовой эмиссии CO_2 только на основе дневных измерений может зависть потери углерода на 20–50%. На наш взгляд, вопрос о соответствии скорости выделения CO_2 из почвы, измеренной в течение 1–5 минут камерным методом, фактической среднесуточной интенсивности дыхания почвы требует специального углубленного исследования. Поскольку внутрисуточная динамика почвенного дыхания обуславливается, в основном, изменением температуры, этот вопрос должен решаться, прежде всего, с учетом варьирования данного фактора в день измерения. Например, полагают (Головацкая, Дюкарев, 2011), что осенью, вследствие малой изменчивости температуры почвы, измерения эмиссии CO_2 камерным методом могут выполняться в любое дневное время. Итак, несмотря на высокую точность (1–2%) измерения концентрации CO_2 в камере с помощью современных ИК-газоанализаторов, использование данного метода может приводить к значительным ошибкам определения среднесуточной интенсивности дыхания почвы и, как следствие, расчета суммарных потерь CO_2 за период исследования.

Абсорбционный метод прост и не предполагает использования дорогостоящего оборудования, поэтому перспективен для широкого использования в почвенно-агрохимических и экологических исследованиях. Он основан на поглощении раствором щелочи диффузно выделяющегося из почвы диоксида углерода. В полевых условиях чашечку с раствором щелочи помещают на поверхность почвы в сосуд-изолятор и закрывают его крышкой. После экспозиции, которая в зависимости от интенсивности дыхания почвы и цели исследования может составлять несколько часов, сутки или быть кратной суткам, остаток щелочи оттитровывают кислотой и рассчитывают количество выделившегося из почвы CO_2 с учетом холостого определения.

Основная проблема абсорбционного метода – снижение поглотительной способности раствора щелочи во времени, что может приводить к неполному улавливанию выделяющегося из почвы CO_2 . На этом основании в литературе иногда делается вывод о получении абсорбционным методом заниженных данных (Головацкая, 2013; Алферов и др., 2017). Однако, по нашему мнению, претензии в данном случае следует предъявлять не к методу в целом, а к тем методикам, на основании которых этот вывод сделан. Так, авторы (Алферов и др., 2017), акцентируя внимание на данной проблеме абсорбционного метода, ссылаются на методику Л.О. Карпачевского (1977), которая якобы должна обеспечить получение более корректных результатов полевых измерений. Отметим, эта методика не предполагает использования сосуда-изолятора, что противоречит базовому принципу абсорбционного метода – обеспечению в экспозицию равновесия скоростей выделения CO_2 из почвы и поглощения его щелочью. Это равновесие обеспечивается за счет соответствующего изменения концентрации CO_2 в надпочвенной части сосуда-изолятора. К тому же в данной методике (Карпачевский, 1977) неправильно рассчитывается количество поглощенного раствором щелочи CO_2 – результат занижается в 2 раза, что было показано нами ранее (Шарков, 1987а). Е.А. Головацкая (2013), отмечая занижение в 2,5 раза получаемых абсорбционным методом данных, использовала методику В.И. Штатнова (1952), которая появилась за 2–3 десятилетия до того, как были проведены специальные исследования абсорбционного метода и изучены сорбционные свойства раствора щелочи (Шарков, 1983, 1984, 1987а, 1987б; Иванникова, 1992; Kirita, 1971; Coleman, 1973; Minderman, Vulto, 1973; Gupta, Singh, 1977). Поэтому изначально методика В.И. Штатнова (1952) была рассчитана на получение только сравнительных данных по биологической активности почвы, но не на количественное определение скорости эмиссии CO_2 , тем более, ее среднесуточных значений.

Перечисленные исследования инициировали разработку рекомендаций по выбору параметров раствора щелочи (концентрация, объем, площадь поверхности) и сосуда-изолятора (диаметр, высота, глубина врезания в почву), при которых должно обеспечиваться полное улавливание выделяющегося из почвы CO_2 . На основании этих работ нами была разработана методика, которая позволяет при суточной экспозиции определять скорость выделения CO_2 из почвы вплоть до $1000 \text{ мг } \text{CO}_2/\text{м}^2\cdot\text{ч}$ (Шарков, 1987б). В последние годы она была значительно усовершенствована, что сделало ее более доступной и удобной для массового использования. Усовершенствование связано с изменением конструкции сосуда-изолятора, параметров поглотителя и процедуры определения, что позволило значительно повысить производительность работы.

Целью наших исследований была разработка усовершенствованной методики количественного определения среднесуточной скорости выделения CO_2 из почвы в полевых условиях. Реализация данной цели будет способствовать проведению сравнительных определений дыхания почвы разными методами, что, надо полагать, ускорит разработку единой методики определения эмиссии CO_2 почвами в различных экосистемах.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Как уже отмечалось, методика абсорбционного определения дыхания почвы весьма простая и не требует использования сколько-нибудь дорогостоящего оборудования. Более того, сегодня все составные части прибора – сосуд-изолятор, крышка к нему, герметично закрывающиеся пластиковые чашечки для раствора щелочи, а также контейнеры для их хранения и перевозки могут быть свободно приобретены в торговой сети либо на маркетплейсах (рис. 1).

Оборудование. Сосуд-изолятор (сосуд) представляет собой цилиндр высотой 15 см с внутренним диаметром 10 см, изготовленный из тонкостенных (1,5 мм) труб ПВХ белого цвета. Изготовление сводится к разрезанию на токарном станке труб на части длиной 15 см. Важно, чтобы срез был гладким для обеспечения герметичности при закрывании сосуда крышкой.



Рисунок 1. Основные составляющие комплекта для измерения дыхания почвы в полевых условиях: 1 – сосуд-изолятор, 2 – крышка к сосуду, 3 – чашечка для раствора щелочи, 4 – крышка к чашечке, 5 – пипетка на 10 мл, 6 – мини-контейнер для хранения и перевозки чашечек. Фото автора.

Нами используются трубы для воздуховодов (ПВХ 10ВП, ТУ 4863-002-96059883-11), производимые фирмой «Эра», г. Рязань. Они прочные и не утрачивают своих свойств, по крайней мере, после 3 лет использования в полевых условиях. Крышки к сосудам-изоляторам белого цвета (артикул STR 100) приобретаются в фирме «МИНИВОРКС» (г. Санкт-Петербург). Они изготовлены из качественного эластичного пластика и также не утрачивают своих свойств при длительном использовании в поле.

Чашечки из пластика высотой 35 мм и диаметром основания 6,2 см имеют слегка коническую форму и при заливке 10 мл 1 н. раствора NaOH обеспечивают площадь поглотителя 30 см^2 , что составляет 38% от накрываемой сосудом-изолятором площади поверхности почвы. Они изготовлены из пластика толщиной 0,5 мм и имеют плоское дно, что удобно при титровании. Чашечки реализуются в торговой сети как «соусник 80 мл с неразъемной крышкой». Перед использованием крышка от чашечки аккуратно отрезается.

Герметически закрывающийся пластиковый мини-контейнер используют для хранения чашечек. Удобно иметь контейнеры разной вместимости – на 15–25 чашечек в зависимости от количества вариантов и повторностей в опытах. Мини-контейнеры помещают в пластмассовый ящик, который также закрывается крышкой. Такая система изоляции растворов щелочи в чашечках от воздуха исключает необходимость немедленного титрования растворов, что удобно при выполнении исследований в экспедициях или удаленных от лабораторий местах. Чашечки с раствором можно накапливать, перевозить в автомобиле, а титрование осуществлять один раз в одну-две недели.

Кроме перечисленного, для работы необходима автоматическая пипетка на 10 мл, обычная бюретка объемом 25 или 50 мл с автоматическим нулем (или современная цифровая бюретка) и магнитная мешалка.

Методика. Эмиссию CO_2 из почвы можно измерять на участке (рис. 2) с произрастающими растениями (общее дыхание) или на парующейся делянке (гетеротрофное дыхание); разница будет примерно соответствовать дыханию корней и ризосферных микроорганизмов, если оба фона расположены рядом и специально подготовлены. Перед определением из сосуда-изолятора всегда удаляют надземную часть растений, чтобы исключить влияние ее дыхания на результаты. Измерения выполняют обычно один раз в неделю и затем рассчитывают суммарные потери CO_2 из почвы за период исследования.



Рисунок 2. Определение дыхания почвы на залежном и парующемся участках. Фото автора.

Сосуд-изолятор врезают в почву на глубину, при которой обеспечивается его неподвижность при закрывании и снятии крышки. Было установлено (Шарков, 19876), что врезание нижнего края сосуда в почву на 5 и 10 см практически не сказывается на результатах определения дыхания почвы; в случае плотной почвы или на целинном (залежном) участке заглубление сосуда может составлять 5 см, на рыхлой пашне – 7–8 см. Для облегчения врезания можно воспользоваться ножом, которым по окружности сосуда в почве делаются проколы; затем легкими постукиваниями через дощечку по его верхнему краю достигается требуемое заглубление. Установленные сосуды-изоляторы обычно оставляют на одних и тех же местах в течение всего периода исследования.

С помощью автоматической пипетки в чашечку заливают 10 мл 1 н. раствора NaOH, устанавливают ее строго горизонтально на поверхность почвы в сосуде и закрывают его крышкой. Новые, не приработавшиеся крышки можно слегка увлажнить водой. Для холостого определения точно такое же количество раствора щелочи заливают в 3 чашечки (повторности), которые закрывают крышками и сразу же помещают в мини-контейнер. Опыт работы показал, что оставлять их в специальном сосуде в поле, как это практиковалось ранее (Шарков, 1984), нет необходимости. При сорбционной поверхности 30 см^2 раствор щелочи с такими параметрами обеспечивает практически полное улавливание за 24-часовую экспозицию до 220 мг CO_2 . Это позволяет при диаметре сосуда-изолятора 10 см измерять при суточной экспозиции интенсивность дыхания почвы до $1200 \text{ мг CO}_2/\text{м}^2\cdot\text{ч}$.

Изредка дыхание почвы может превышать данную величину, что становится понятным при первом же измерении. В таком случае дыхание определяют при двух последовательных экспозициях (двухступенчатое определение); например, 0–6 ч и 6–24 ч, т. е. спустя 6 ч чашечку в сосуде заменяют на новую. Первая экспозиция может быть и больше – 6–12 ч, если это удобно для принятого режима работы. Напротив, при низкой интенсивности дыхания ($< 100 \text{ мг CO}_2/\text{м}^2\cdot\text{ч}$), что может иметь место при пониженных температурах почвы ранней весной или поздней осенью, экспозицию следуеткратно увеличить – до 48–96 ч, чтобы раствор щелочи поглотил не менее 20 мг CO_2 . Это обуславливается повышением точности измерения с учетом предельной чувствительности метода, о чем будет сказано

ниже. Таким образом, возможный диапазон измерения эмиссии диоксида углерода за суточную экспозицию составляет 20–220 мг CO₂/сосуд (~100–1200 мг CO₂/м²·ч). Однако за счет увеличения экспозиции до 96 ч нижний предел можно понизить до 25 мг CO₂/м²·ч, а верхний – значительно повысить благодаря двухступенчатому определению.

В лаборатории раствор щелочи оттитровывают по фенолфталеину непосредственно в чашечке титрованным раствором 0,2 н. HCl. Хотя и редко, но на внутренней стороне крышки чашечки могут быть капли раствора, что является следствием неаккуратной транспортировки. Перед титрованием такие капли смывают в чашечку тонкой струей дистиллированной воды в количестве не более 20 мл. Если капли отсутствуют, воду в чашечку лучше не добавлять, поскольку на титрование будет израсходовано не менее 25 мл 0,2 н. раствора кислоты. В процессе титрования раствор в чашечке должен достаточно интенсивно перемешиваться с помощью магнитной мешалки. В холостом определении исчезновение малиновой окраски раствора четко фиксируется от одной капли 0,2 н. HCl. В рабочих определениях переход окраски менее четкий, но при достаточных навыках работы окончание титрования можно четко фиксировать от 1–3 капель титранта. Возможно также потенциометрическое титрование раствора до pH 8,3 с помощью автоматических титраторов. Однако при ручном титровании может быть выигрыш во времени за счет ускорения титрования повторностей (знание объема титранта в первой повторности позволяет другие растворы титровать быстрее). Практика работы показала, что на титрование по фенолфталеину 2-х холостых и 20-ти рабочих растворов (эксперимент из 5-ти вариантов в 4-кратной повторности) опытный оператор затрачивает около 1 часа. Поэтому один сотрудник вполне может ежедневно выполнять измерения с помощью 50-ти сосудов-изоляторов: расставлять и собирать чашечки, титровать растворы в лаборатории.

При обоих вариантах титрования количество выделившегося из почвы за экспозицию CO₂ (К, мг) рассчитывают по одной и той же формуле:

$$K = (a - b) \cdot n \cdot 44, \quad (1)$$

где а, б – количество титрованного (~0,2 н.) раствора HCl, пошедшее на титрование в холостом и рабочем определениях, соответственно, мл; n – точная нормальность раствора HCl; 44 – количество CO₂, эквивалентное 1 мл 1 н. HCl, мг. Для приготовления растворов NaOH и HCl используют реактивы класса не ниже «ч.д.а.».

Скорость выделения CO₂ из почвы за сутки (В, кг/га за 24 ч) рассчитывают по формуле:

$$B = \frac{K \cdot 24 \cdot 10^8}{\Xi \cdot 78,5 \cdot 10^6}, \quad (2)$$

где 24 – пересчет за сутки, ч; 10⁸ – пересчет см² в га; Ξ – экспозиция (при низкой скорости выделения CO₂ из почвы может быть кратной суткам), ч; 78,5 – накрываемая сосудом-изолятором площадь почвы, см²; 10⁶ – пересчет мг CO₂ в кг CO₂.

Суммарные потери CO₂ из почвы за период исследования (А, кг/га) рассчитывают по формуле:

$$A = \frac{(B_1 + B_2) \cdot t_1}{2} + \frac{(B_2 + B_3) \cdot t_2}{2} + \dots + \frac{(B_{n-1} + B_n) \cdot t_{n-1}}{2}, \quad (3)$$

где B₁, B₂, ..., B_n – величины первого, второго, n-ного измерений суточной скорости выделения CO₂ из почвы, соответственно, кг/га; t₁, t₂, t_{n-1} – периоды времени между измерениями, сутки. Чтобы результат выразить в С-CO₂, величину А умножают на коэффициент 0,273.

Апробация методики. Дыхание почвы определяли в 2024 г. на расположенных рядом площадках – многолетней разнотравно-злаковой залежи и чистом пару (см. рис. 2). Площадка чистого пара размером 5×5 (м) была создана путем срезания триммером надземной части растений 1 раз в неделю, начиная с середины мая 2023 г. Появляющиеся на площадке в 2024 г. проростки удаляли механически также один раз в неделю. Место проведения измерений – правобережная часть пригорода Новосибирска (район Академгородка) с координатами 54°51'03" с.ш., 83°11'00" в.д. Почва – темно-серая лесная (*Luvic Greyzemic Phaeozem (Siltic)*) среднесуглинистого гранулометрического состава. Дыхание почвы определяли с мая по октябрь один раз в неделю в 4-кратной повторности. Суммарные потери С-CO₂ из почвы по месяцам рассчитывали по формуле 3 (но в т/га) для каждой повторности определения и затем находили статистические характеристики массива данных с помощью пакета компьютерных программ (Сорокин, 2008).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Каков же предел чувствительности данной методики? Он определяется, в основном, точностью заливки в чашечку 10 мл раствора щелочи и отмеривания объема титранта при холостом и рабочем определениях. Современные автоматические пипетки обеспечивают точность дозирования раствора на уровне 0,5–0,7% (Механические дозаторы ..., 2025), а определение точки эквивалентности при титровании щелочи по фенолфталеину достигается, как уже отмечалось, от 1–3 капель раствора кислоты. Суммарно это может обеспечить ошибку определения $\pm 0,2$ – $0,3$ мл 0,2 н. НСІ, что, согласно уравнению (1), будет соответствовать ± 2 – 3 мг CO_2 . По нашему мнению, эти значения характеризуют предел чувствительности методики, т. е., если за экспозицию выделится такое количество CO_2 , оно не сможет быть зарегистрировано. Поэтому, как уже отмечалось, в случае очень низкой интенсивности дыхания почвы экспозицию следует увеличить, чтобы выделение диоксида углерода за этот период составило не менее 20 мг (более простой ориентир – разница между холостым и рабочим титрованиями должна быть не менее 2 мл 0,2 н. НСІ). Если эта разница увеличивается до 25 мл (т.е. за экспозицию поглощается максимально возможное количество CO_2 – 220 мг) – это сигнал для возможного перехода к двухступенчатому измерению среднесуточной скорости дыхания почвы, о чем говорилось выше.

Как часто придется прибегать к такой, не вполне удобной процедуре определения? Выше отмечалось, что поглощение за суточную экспозицию 220 мг CO_2 в сосуде-изоляторе с площадью сечения 78,5 см² соответствует измерению интенсивности дыхания почвы примерно 1200 мг $\text{CO}_2/\text{м}^2\cdot\text{ч}$. Мировая сводка по дыханию почв в различных экосистемах (Singh, Gupta, 1977), насчитывающая 61 определение, показала, что данная величина была превышена только в 9 случаях (15%), причем подавляющее большинство из них относилось к лесным экосистемам. Многочисленные современные определения дыхания почвы в лесных, болотных и травяных экосистемах северо-запада РФ показали (Алферов и др., 2017), что верхний диапазон значений составлял, в основном, 5–6 г $\text{C}/\text{м}^2\cdot\text{сутки}$ или 760–920 мг $\text{CO}_2/\text{м}^2\cdot\text{час}$, т. е. вполне мог быть измерен при суточной экспозиции с помощью данной методики. Таким образом, в подавляющем большинстве случаев дыхание почвы может определяться при обычной (не двухступенчатой) процедуре измерения.

Результаты апробации методики зафиксировали достоверные различия в месячной эмиссии C-CO_2 из почвы как в связи с состоянием растительности (залежь – чистый пар), так и по месяцам вегетационного периода (таблица). Коэффициент вариации значений в большинстве случаев был минимальным и не превышал 10%. По-видимому, основная причина слабо выраженной в данном случае вариабельности дыхания почвы – малый размер площадок (около 25 м²) и 4-кратная повторность определения.

Таблица

Месячные потери C-CO_2 из почвы залежи (1) и парующегося участка (2) и их статистические характеристики

Показатель	Май		Июнь		Июль		Август		Сентябрь		Октябрь		Май – октябрь	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
X	1,04	0,77	1,56	1,09	1,31	0,92	1,10	0,75	0,52	0,33	0,34	0,19	5,87	4,04
S	0,09	0,07	0,15	0,09	0,08	0,12	0,07	0,10	0,03	0,01	0,03	0,02	0,39	0,31
V	9	9	10	8	6	13	7	14	5	3	9	11	7	8
НСР ₀₅	0,14		0,22		0,20		0,15		0,03		0,04		0,60	

Примечание.

X – месячные потери C-CO_2 , т/га; S – стандартное отклонение, т/га; V – коэффициент вариации, %.

Поскольку определения на парующейся делянке проводили не в первый, а во второй год после удаления надземной фитомассы, разницу в дыхании почвы между залежью и паром не следует в полной мере относить на счет дыхания корней и ризосферных микроорганизмов. Дело в том, что ко второму году парования часть корней, вероятно, уже отмерла и могла активно разлагаться, т.е. гетеротрофная составляющая дыхания на парующейся площадке, скорее всего, была больше, чем на залежном участке. Если этим пренебречь, можно ориентировочно рассчитать долю автотрофной составляющей в общем дыхании почвы на залежном участке (%): в мае она составила – 26, июне – 30, июле – 30, августе – 32, сентябре – 37, октябре – 46, в целом за период исследования – 31.

С большей определенностью можно сказать о гетеротрофной составляющей дыхания почвы, которая на парующемся участке за период май – октябрь составила примерно 4 т $\text{C-CO}_2/\text{га}$ (см.

таблицу). Это означает, что для поддержания бездефицитного баланса углерода в такую почву ежегодно должно поступать примерно 10 т/га растительного вещества (при содержании в нем 40% С). При вовлечении такой почвы в зерновой агроценоз и получении традиционных для Сибири урожаев зерна (около 2 т/га) фактическое поступление углерода в почву с остатками будет примерно в 2 раза меньше (Шатохина, 1986). Это приведет к известным событиям (Биологическая продуктивность ..., 2018): залежная почва начнет длительное время (десяtkи лет) функционировать в переходном режиме, теряя органическое вещество до тех пор, пока не будет достигнуто новое стационарное состояние.

На каком основании делается вывод, что получаемые с помощью описанной методики данные соответствуют фактической эмиссии CO_2 из почвы? Во-первых, на основе исследования способности раствора щелочи сорбировать CO_2 (Шарков, 1983; 1987б) определено, что 10 мл 1 н. NaOH при сорбционной поверхности 30 см² обеспечивает полное улавливание за суточную экспозицию до 220 мг CO_2 . Как уже говорилось, это достаточно для измерения дыхания почвы в подавляющем большинстве случаев. Во-вторых, ранее было показано (Шарков, 1984), что в процессе измерения под влиянием сосуда-изолятора (он изготавливался из дюралюминия) существенно не изменяются факторы, влияющие на биологическую активность почвы, – температура и влажность. Определение динамики температуры почвы под сосудом, используемым в настоящей методике (ПВХ белого цвета), подтвердило этот вывод. Среднесуточная температура парующейся почвы на глубине 6 см, измеренная с интервалом 3 ч, без сосуда-изолятора и под сосудом (был заглублен на 7 см) составила 24,2 и 23,8°C, соответственно. Как показал обзор литературы (Шарков и др., 2024), повышение температуры почвы на 1°C в диапазоне 5–30°C интенсифицирует продуцирование ею CO_2 примерно на 7%. Следовательно, изменение температуры почвы под влиянием сосуда-изолятора на 0,4°C не может существенно изменить ее биологическую активность и, следовательно, продуцирование CO_2 . В-третьих, установлено (Шарков, 1987б), что для расчета суммарных потерь CO_2 из почвы за вегетационный период среднесуточную скорость эмиссии CO_2 достаточно определять 1 раз в неделю.

Отметим, что возможности измерения с помощью описанной методики дыхания почвы при пониженных, в том числе отрицательных, температурах воздуха ограничены. Раствор 1 н. NaOH замерзает при температуре примерно –3°C (Методические указания ..., 2025), поэтому ниже этой температуры методику использовать нельзя. Скорость поглощения CO_2 раствором щелочи при свободной диффузии из воздуха зависит от температуры. Наши измерения на высоте 0,8 м от поверхности почвы, проведенные в разное время года, показали, что с понижением температуры воздуха среднесуточная скорость поглощения CO_2 1 н. раствором NaOH снижается, но значительно в меньшей степени, чем падает биологическая активность почвы. Так, если при среднесуточной температуре воздуха 25°C поглощение CO_2 раствором за 24 ч принять за 100%, то при 15, 13, 7 и –1°C оно составит 93, 89, 89 и 81%, соответственно. Отсюда можно заключить, что сосуд-изолятор и поглотитель с рекомендуемыми параметрами вполне могут использоваться для измерения дыхания почвы и при пониженных (до –3°C) температурах воздуха.

Таким образом, разработанный нами вариант методики может широко использоваться для количественного определения эмиссии диоксида углерода из почв природных и антропогенно преобразованных экосистем. Важно сравнивать получаемые данные с другими методами определения дыхания почвы, объективно показывать достоинства и недостатки методик, чтобы успешно двигаться в направлении их дальнейшего совершенствования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлена методика количественного определения среднесуточной интенсивности дыхания почвы, разработанная на основании метода абсорбции. Обоснованы параметры сосуда-изолятора и поглотителя, а также процедура измерения, при которых возможно определение интенсивности дыхания почвы в широком диапазоне – от 25 до 1200 мг $\text{CO}_2/\text{м}^2\cdot\text{ч}$ и более. Представлены аргументы в пользу соответствия измеряемых с помощью методики данных фактической эмиссии CO_2 из почвы. Привлекательность методики для исследователей может определяться: 1) высокой точностью (предел чувствительности $\pm 2\text{--}3$ мг CO_2 при поглощении щелочью до 220 мг CO_2) и производительностью определений (один сотрудник ежедневно может выполнять до 50 измерений); 2) возможностью проведения определений в одно и то же время для большого числа вариантов опыта; 3) отсутствием необходимости в титровании растворов щелочи сразу после экспозиции (это можно делать один раз в одну-две недели); 4) возможностью перевозки на большие расстояния автотранспортом герметично закрытых чашечек со щелочью; 5) минимальным временем нахождения сотрудников в полевых условиях (только для расстановки и сбора чашечек); 6) дешевизной оборудования и его доступностью (что важно для быстрой организации измерений); 7) простотой и удобством работы (в частности,

растворы щелочи титруются непосредственно в чашечках, что значительно повышает производительность).

ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Публикация подготовлена в рамках государственного задания Института почвоведения и агрохимии СО РАН при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (№ проекта 121031700309-1).

ЛИТЕРАТУРА

- Алферов А.М., Блинов В.Г., Гитарский М.Л., Грабар В.А., Замолдчиков Д.Г., Зинченко А.В., Иванова Н.П., Ивахов В.М., Карабань Р.Т., Карелин Д.В., Калужный И.Л., Кашин Ф.В., Конюшков Д.Е., Коротков В.Н., Кровотынцев В.А., Лавров С.А., Марунич А.С., Парамонова Н.Н., Романовская А.А., Юзбеков А.К., Трунов А.А., Шилкин А.В. Мониторинг потоков парниковых газов в природных экосистемах. Саратов: Амирит, 2017. 279 с.
- Головацкая Е.А. Потоки углерода в болотных экосистемах южной тайги Западной Сибири. Автореферат диссертации... д-р биол. наук. Красноярск, 2013. 33 с.
- Головацкая Е.А., Дюкарев Е.А. Сезонная и суточная динамика эмиссии CO₂ с поверхности олиготрофной торфяной почвы // Метеорология и гидрология. 2011. № 6. С. 84–93.
- Иванникова Л.А. Применение абсорбционного метода для определения естественного потока CO₂ из почвы // Почвоведение. 1992. № 6. С. 133–139.
- Карпачевский Л.О. Пестрота почвенного покрова в лесном биогеоценозе. Москва: Изд-во МГУ, 1977. 312 с.
- Курганова И.Н., Ильясов Д.В., Замолдчиков Д.Г., Карелин Д.В., Лопес де Гереню В.О., Матышак Г.В., Мигловец М.Н., Мошкина Е.В., Осипов А.Ф., Хорошаев Д.А., Шарков И.Н. Методическое руководство по определению эмиссии CO₂ из почв в различных типах экосистем. 2-е издание. Пушкино, 2023. 73 с.
- Ларионова А.А., Розанова Л.Н. Суточная, сезонная и годовая динамика выделения CO₂ из почвы // Дыхание почвы. Пушкино: Пушкинский научный центр, 1993. С. 59–68.
- Методические указания по эксплуатации баков серной кислоты и едкого натра на ТЭС [Электронный ресурс]. URL: <https://meganorm.ru/Data2/1/4294817/4294817934.pdf> (дата обращения 05.09.2025).
- Механические дозаторы Sartorius Proline [Электронный ресурс]. URL: <https://pharm-servis.ru/products/laboratory-equipment/pipettes/mechanical-dispensers/proline> (дата обращения 05.09.2025).
- 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.
- Муравьева Е.А., Кулакова Е.С. Обзор приборной базы по контролю парниковых газов // Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал. 2022. Том 14. № 1. С. 62–69. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2022-14-1-62-69>
- Сорокин О.Д. Прикладная статистика на компьютере. Новосибирск: СО РАСХН, 2008. 217 с.
- Биологическая продуктивность травяных экосистем. Географические закономерности и экологические особенности / А.А. Титлянова, Н.И. Базилевич, В.А. Снытко [и др.]. 2-е издание, исправленное и дополненное. Новосибирск: Институт почвоведения и агрохимии СО РАН, 2018. 110 с. <https://doi.org/10.31251/978-5-600-02350-5>
- Федоров Ю.А., Сухоруков В.В., Трубник Р.Г. Аналитический обзор: эмиссия и поглощение парниковых газов почвами. Экологические проблемы // Антропогенная трансформация природной среды. 2021. Том 7. № 1. С. 6–34. <https://doi.org/10.17072/2410-8553-2021-1-6-34>
- Шарков И.Н. Исследование параметров раствора щелочи как абсорбента CO₂ при определении дыхания почвы // Почвоведение. 1983. № 1. С. 132–138.
- Шарков И.Н. Определение интенсивности продуцирования CO₂ почвой абсорбционным методом // Почвоведение. 1984. № 7. С. 136–143.
- Шарков И.Н. Сравнительная характеристика двух модификаций абсорбционного метода определения дыхания почв // Почвоведение. 1987а. № 10. С. 153–157.
- Шарков И.Н. Совершенствование абсорбционного метода определения выделения CO₂ из почвы в полевых условиях // Почвоведение. 1987б. № 1. С. 127–133.
- Шарков И.Н., Чумбаев А.С., Андроханов В.А. Оценка баланса углерода в почвах на основе определения эмиссии CO₂ // Агрохимия. 2024. № 9. С. 78–89. <https://doi.org/10.31857/S0002188124090095>

- Шатохина Н.Г. Продукционный процесс в зерновых агроценозах на выщелоченных черноземах Приобья // Плодородие почв и питание растений. Новосибирск: Сибирское отделение ВАСХНИЛ, 1986. С. 25–53.
- Штатнов В.И. К методике определения биологической активности почвы // Доклады ВАСХНИЛ. 1952. Вып. 6. С. 27–30.
- Coleman D.C. Soil carbon balance in a successional grassland // Oikos. 1973. Vol. 24. No. 2. P. 195–199. <https://doi.org/10.2307/3543875>
- Fiedler J., Fuß R., Glatzel S., Hagemann U., Huth V., Jordan S., Jurasinski G., Kutzbach L., Maier M., Schäfer K., Weber T., Weymann D. Best Practice Guideline: Measurement of carbon dioxide, methane and nitrous oxide fluxes between soil-vegetation-systems and the atmosphere using nonsteady state chambers. 2022. <https://doi.org/10.23689/ridgeo-5422>
- 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. Vol. 17. Iss. 4. P. 233–239. [https://doi.org/10.1016/S0031-4056\(23\)00176-2](https://doi.org/10.1016/S0031-4056(23)00176-2)
- 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 // Japanese Journal of Ecology. 1971. Vol. 21. No. 1–2. P. 119–127.
- Lundegardh H. Carbon dioxide evolution of soil and crop growth // Soil Science. 1927. Vol. 23. No. 6. P. 417–453. https://journals.lww.com/soilsci/citation/1927/06000/carbon_dioxide_evolution_of_soil_and_crop_growth.1.aspx
- Minderman G., Vulto I.C. Comparison of techniques for the measurement of carbon dioxide evolution from soil // Pedobiologia. 1973. Vol. 13. No. 2. P. 73–80.
- Singh J.S., Gupta S.R. Plant decomposition and soil respiration in terrestrial ecosystems // The botanical review. 1977. Vol. 43. No. 4. P. 449–528. <https://doi.org/10.1007/BF02860844>

Поступила в редакцию 09.09.2025

Принята 13.10.2025

Опубликована 17.10.2025

Сведения об авторе:

Шарков Иван Николаевич – доктор биологических наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории агрохимии ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН (г. Новосибирск, Россия); humus3@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3961-2672>

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.



Статья доступна по лицензии [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Methodology of quantitative determination of soil respiration in field conditions

© 2025 I. N. Sharkov 

Institute of Soil Science and Agrochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Lavrentieva, 8/2, Novosibirsk, Russia. E-mail: humus3@yandex.ru

The aim of the study was to improve methodology for determining the actual average daily rate of CO₂ emission from soil in field conditions.

Location and time of the study. The method was tested in 2024 on dark gray forest soil ((Luvic Greyzem Phaeozem (Siltic)) in the right-bank part of the Novosibirsk suburbs (Akademgorodok area) with coordinates 54°51'03" N, 83°11'00" E.

Method. The methodology is one of the modifications of the absorption method for measuring soil respiration. It is based on the absorption of carbon dioxide, diffusely released from soil, by an alkali solution. In the field, a cup with an alkali solution is placed on the soil surface in an insulating vessel and closed with a lid. After exposure, which, depending on the intensity of respiration and the purpose of the study, can be several hours, a day, or many days, the alkali residue is titrated with acid and the amount of CO₂, released from soil, is calculated.

Results. The methodology was improved by a change in the design of the isolator vessel, the parameters of the absorber and the measurement procedure, which made it more feasible and convenient for mass use, allowing also to significantly increase the efficacy of the work. A thin-walled PVC pipe with an internal diameter of 10 cm (cross-sectional area of 78,5 cm²) and a height of 15 cm is used as an isolator vessel, which is inserted into soil for 5–8 cm, and then closed with a lid for the exposure period. The absorber is 10 ml of 1N NaOH in a plastic cup with a diameter of 6,2 cm, which provides 30 cm² of solution sorption surface, equal to 38% of the soil surface covered by the isolator vessel. The absorber is designed to capture 20–220 mg CO₂ in the isolator vessel with a daily exposure, which allows measuring the intensity of soil respiration in the range of ~ 100–1200 mg CO₂/m²·h. By increasing the exposure to 96 h, the lower limit can be reduced to 25 mg CO₂/m²·h, and the upper one increased

significantly by the two-stage measurement, i.e. replacing the alkali solution in the isolator vessel with a new solution 6–12 hours after the exposure start. As a result of testing the technique, reliable differences were obtained in the monthly emission of C-CO₂ from the soil both related to the vegetation type (abandoned land vs. fallow) and to the vegetation period, i.e. May – October. The variation coefficient of monthly emission most often did not exceed 10%, which is explained by the small area (about 25 m²) of the experimental plots and 4-fold measurement replication. During the period May – October, the dark gray forest soil under the perennial fallow lost 5.87 and under bare fallow 4.04 t/ha of C-CO₂. The use of the technique in winter is limited by the freezing of the alkali solution at -3°C.

Conclusions. The article presents a methodology for quantitative determination of average daily soil respiration intensity developed on the basis of the absorption method. The parameters of the insulator and absorber vessel, as well as the measurement procedure, are substantiated, which makes it possible to measure soil respiration intensity in a wide range from 25 to 1200 mg CO₂/m²·h and more. Arguments are presented in favor of the correspondence between the data measured using the methodology and the actual CO₂ emissions from the soil. The attractiveness of the method for researchers is determined by high accuracy (sensitivity limit ±2–3 mg CO₂), labour efficiency (one employee can perform up to 50 measurements daily), the ability to carry out determinations at the same time for a large number of experimental treatments, no need to titrate alkali solutions immediately after exposure (this can be done once every one or two weeks), the ability to transport hermetically sealed cups with alkali, shorter time needed for field work (only for placing and collecting cups), lower cost of the equipment and its higher availability (important for rapid organization of measurements), as well as simplicity and ease of use (in particular, alkali solutions are titrated directly in the cups).

Keywords: CO₂ emission from soil; chamber method; absorption method; components of soil respiration; carbon balance in soil.

How to cite: Sharkov I.N. Methodology of quantitative determination of soil respiration in field conditions. *The Journal of Soils and Environment*. 2025. 8(3). e334. DOI: [10.31251/pos.v8i3.334](https://doi.org/10.31251/pos.v8i3.334) (in Russian with English abstract).

FUNDING

The study was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project No. 121031700309-1).

REFERENCES

- Alferov A.M., Blinov V.G., Gitarsky M.L., Grabar V.A., Zamolodchikov D.G., Zinchenko A.V., Ivanova N.P., Ivakhov V.M., Karaban R.T., Karelin D.V., Kalyuzhny I.L., Kashin F.V., Konyushkov D.E., Korotkov V.N., Krovotyntsev V.A., Lavrov S.A., Marunich A.S., Paramonova N.N., Romanovskaya A.A., Yuzbekov A.K., Trunov A.A., Shilkin A.V. Monitoring greenhouse gas fluxes in natural ecosystems. Saratov: Amirit, 2017. 279 p. (in Russian).
- Golovatskaya E.A. Carbon fluxes in wetland ecosystems of the southern taiga of Western Siberia. Abstract of Dissertation ... Dr. of Biol. Sci. Krasnoyarsk, 2013. 33 p. (in Russian).
- Golovatskaya E. A., Dyukarev E. A. Seasonal and diurnal dynamics of CO₂ emission from oligotrophic peat soil surface. *Russian Meteorology and Hydrology*. 2011. Vol. 36. No. 6. P. 413–419. <https://doi.org/10.3103/S1068373911060094>
- Ivannikova L.A. Application of absorption method for measuring of CO₂ natural flow from soil. *Pochvovedenie*. 1992. No. 6. P. 133–139. (in Russian).
- Karpachevsky L.O. Variegation of soil cover in forest biogeocenosis. Moscow: Moscow State University Press, 1977. 312 p. (in Russian).
- Kurganova I.N., Ilyasov D.V., Zamolodchikov D.G., Karelin D.V., Lopez de Guerenyu V.O., Matyshak G.V., Miglovets M.N., Moshkina E.V., Osipov A.F., Khoroshaev D.A., Sharkov I.N. Methodological guidelines for determining CO₂ emissions from soils in various types of ecosystems. 2nd edition. Pushchino, 2023. 73 p. (in Russian).
- Larionova A.A., Rozanova L.N. Daily, seasonal and annual dynamics of CO₂ emission from soil. In book: *Soil respiration*. Pushchino: Pushchino scientific center, 1993. P. 59–68. (in Russian).
- Guidelines for the operation of sulfuric acid and caustic soda tanks at thermal power plants [Electronic resource]. URL: <https://meganorm.ru/Data2/1/4294817/4294817934.pdf> (accessed on 05.09.2025). (in Russian).
- Mechanical dispensers Sartorius Proline [Electronic resource]. URL: <https://pharm-servis.ru/products/laboratory-equipment/pipettes/mechanical-dispensers/proline> (accessed on 05.09.2025). (in Russian).
- Mina V.N., Makarov B.N., Matskevich V.B., Shtatnov V.I. Methods for studying the air regime of soils during stationary studies. *Pochvovedenie*. 1963. No. 6. P. 48–57. (in Russian).
- Muravieva E.A., Kulakova E.S. Overview of the instrumental base for the control of greenhouse gases. *Nanotechnologies in construction: a scientific internet-journal*. 2022. Vol. 14. No. 1. P. 62–69. (in Russian). <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2022-14-1-62-69>

- Sorokin O.D. Applied statistics on the computer. Novosibirsk: SB RAAS, 2008. 217 p. (in Russian).
- Biological productivity of grasslands. Geographical regularities and ecological features / A.A. Titlyanova, N.I. Bazilevich, V.A. Snytko et al. 2nd edition, corrected and amended. Novosibirsk: ISSA SB RAS, 2018. 110 p. (in Russian). <https://doi.org/10.31251/978-5-600-02350-5>
- Fedorov Yu.A., Sukhorukov V.V., Trubnik R.G. Review: Emission and absorption of greenhouse gases by soils. Ecological problems. Anthropogenic Transformation of Nature. 2021. Vol. 7. No. 1. P. 6–34. (in Russian). <https://doi.org/10.17072/2410-8553-2021-1-6-34>
- Sharkov I.N. Study of parameters of alkali solution as CO₂ absorbent in determining soil respiration. Pochvovedenie. 1983. No. 1. P. 132–138. (in Russian).
- Sharkov I.N. Determination of the rate of soil CO₂ production by the absorption method. Soviet Soil Science. 1984. Vol. 16. No. 3. P. 102–111.
- Sharkov I.N. Comparison of two modifications of absorption methods of determination of soil respiration. Pochvovedenie. 1987a. No. 10. 153–157. (in Russian).
- Sharkov I.N. An Improved absorption method for measuring production of soil CO₂ under field conditions. Soviet Soil Science. 1987b. No. 1. P. 102–109.
- Sharkov I.N., Chumbaev A.S., Androkhanov V.A. Estimation of soil carbon balance based on CO₂ emission determination. Agrokhimia. 2024. No. 9. C. 78–89. (in Russian). <https://doi.org/10.31857/S0002188124090095>
- Shatokhina N.G. Production process in grain agrocenoses on leached chernozems of the Ob region. In book: Soil fertility and plant nutrition. Novosibirsk: Siberian branch of VASKhNIL, 1986. P. 25–53. (in Russian).
- Shtatnov V.I. On the methodology for determining the biological activity of soil. Reports of VASKhNIL. 1952. Iss. 6. P. 27–30. (in Russian).
- Coleman D.C. Soil carbon balance in a successional grassland. Oikos. 1973. Vol. 24. No. 2. P. 195–199. <https://doi.org/10.2307/3543875>
- Fiedler J., Fuß R., Glatzel S., Hagemann U., Huth V., Jordan S., Jurasinski G., Kutzbach L., Maier M., Schäfer K., Weber T., Weymann D. Best Practice Guideline: Measurement of carbon dioxide, methane and nitrous oxide fluxes between soil-vegetation-systems and the atmosphere using nonsteady state chambers. 2022. <https://doi.org/10.23689/figeo-5422>
- 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. Vol. 17. Iss. 4. P. 233–239. [https://doi.org/10.1016/S0031-4056\(23\)00176-2](https://doi.org/10.1016/S0031-4056(23)00176-2)
- 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. Japanese Journal of Ecology. 1971. Vol. 21. No. 1–2. P. 119–127.
- Lundegardh H. Carbon dioxide evolution of soil and crop growth. Soil Science. 1927. Vol. 23. No. 6. P. 417–453. https://journals.lww.com/soilsci/citation/1927/06000/carbon_dioxide_evolution_of_soil_and_crop_growth.1.aspx
- Minderman G., Vulto I.C. Comparison of techniques for the measurement of carbon dioxide evolution from soil. Pedobiologia. 1973. Vol. 13. No. 2. P. 73–80.
- Singh J.S., Gupta S.R. Plant decomposition and soil respiration in terrestrial ecosystems. The botanical review. 1977. Vol. 43. No. 4. P. 449–528. <https://doi.org/10.1007/BF02860844>

Received 09 September 2025

Accepted 13 October 2025

Published 17 October 2025

About the author:

Ivan N. Sharkov – Doctor of Biological Sciences, Associate Professor, Leading Researcher in the Laboratory of Agrochemistry in the Institute of Soil Science and Agrochemistry, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russia); humus3@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3961-2672>

The author read and approved the final manuscript



The article is available under [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)