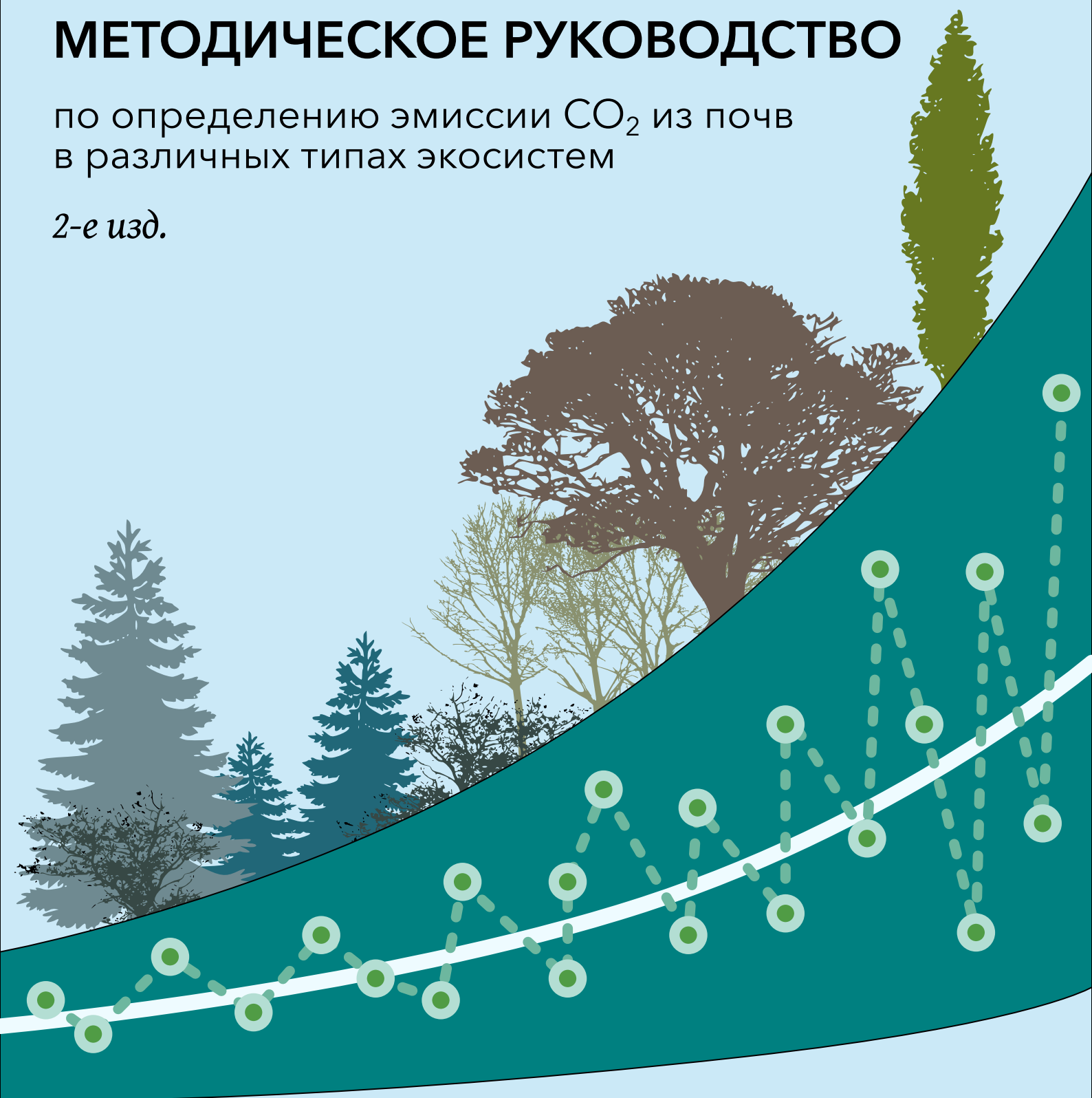


МЕТОДИЧЕСКОЕ РУКОВОДСТВО

по определению эмиссии CO_2 из почв
в различных типах экосистем

2-е изд.



ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|---|----|
| Предисловие | 3 |
| 1. Теоретические предпосылки..... | 5 |
| 1.1. Биогенный цикл углерода..... | 5 |
| 1.2. Эмиссия CO ₂ из почв..... | 8 |
| 2. Краткий обзор основных методов определения эмиссии CO ₂ из почв.... | 11 |
| 3. Проведение измерений эмиссии CO ₂ из почв камерным методом с использованием разной технической базы..... | 16 |
| 3.1. Выбор участка и частота измерений | 16 |
| 3.2. Абсорбционный метод | 18 |
| Общие представления | 18 |
| Методика определения среднесуточной скорости продуцирования CO ₂ почвой в полевых условиях | 20 |
| 3.3. Метод закрытых камер с отбором газовых проб с помощью шприца в герметичные флаконы | 22 |
| 3.4. Метод закрытых камер с использованием инфракрасных газоанализаторов..... | 27 |
| Автоматические газоанализаторы фирмы LiCor (США) | 27 |
| Анализаторы на основе прибора фирмы AZ Instrument (Тайвань) | 30 |
| Сравнение разных формул расчета скорости эмиссии CO ₂ из почв | 33 |
| Оценка сезонных величин эмиссии CO ₂ из почв при невысокой частоте измерений. | 33 |
| Некоторые полезные советы | 35 |
| 4. Особенности измерения эмиссии CO ₂ из почв в различных экосистемах (болотные, тундровые, лесные, степные, луговые, агроценозы) | 37 |
| 4.1. Рекомендации к методике проведения наблюдений за эмиссией CO ₂ /CH ₄ в болотных экосистемах | 37 |
| 4.2. Рекомендации к методике проведения наблюдений за эмиссией CO ₂ /CH ₄ в тундровых экосистемах | 38 |
| 4.3. Рекомендации к методике проведения наблюдений за эмиссией CO ₂ в лесных экосистемах | 41 |

| | |
|---|----|
| 4.4. Рекомендации к методике проведения наблюдений за эмиссией CO ₂ в луговых и степных экосистемах | 44 |
| 4.5. Рекомендации к методике проведения наблюдений за эмиссией CO ₂ в агроценозах и объектах животноводства..... | 47 |
| 5. Определение микробной компоненты в общем эмиссионном потоке CO ₂ из почв | 50 |
| 6. Определение сопутствующих гидротермических характеристик почвы | 53 |
| 7. Подходы к оценке годовых потоков CO ₂ из почв | 54 |
| Заключение..... | 57 |
| Литература..... | 58 |
| Глоссарий | 63 |
| Приложение..... | 65 |
| 1. Пример расчета объема воздуха в камере со снегом | 65 |
| 2. Формулы расчета скорости эмиссии CO ₂ из почв по разным формулам и оценка | 66 |
| 3. Рекомендуемое измерительное оборудование | 69 |
| Камеры-изоляторы | 69 |
| Газовые анализаторы | 69 |
| Камеры-изоляторы для измерения эмиссии CO ₂ с поверхности почвы | 71 |
| Электронный термометр | 71 |
| Электронный полевой влагомер (рефлектометр) | 71 |
| 4. Инструкции по проведению измерения с помощью инфракрасного сенсора AZ7752 | 72 |
| Пример заполнения таблицы для записи результатов при измерении эмиссии CO ₂ из почвы с помощью газоанализатора AZ в полевых условиях | 73 |
| Структура представления данных | 74 |
| Структура мировой базы данных по дыханию почв 2021 г. | 79 |

Экспериментальное определение эмиссии CO_2 из почв имеет почти вековую историю. Так, еще в 1924 г. немецкий исследователь Люндегордт предложил использовать для этой цели камерный метод, основанный на определении скорости выделения углекислого газа из почв по его накоплению в камерах-изоляторах. Сегодня этот метод имеет множество модификаций и является среди исследователей самым популярным в силу своей простоты и удобства. Для его использования нет крайней необходимости иметь дорогостоящее оборудование, поскольку это может быть всего-навсего раствор щелочи с четко рассчитанной концентрацией, помещенный в бюксы определенного объема в камеру-изолятор на сутки для поглощения всего выделяющегося за это время углекислого газа. Можно также использовать технику отбора серии газовых проб из камер-изоляторов шприцами через равные промежутки времени с последующим определением в них концентрации CO_2 в лаборатории. Однако в последние годы наиболее популярным становится использование инфракрасных газоанализаторов, которые подсоединяются к почвенным камерам и с их помощью за несколько минут в автоматическом режиме можно определить скорость выделения CO_2 .

Настоящее методическое руководство посвящено вопросам использования разных модификаций исключительно *камерного метода* определения эмиссии CO_2 из почв. Его подготовка объединила усилия исследователей-экспертов, имеющих большой практический опыт определения эмиссии CO_2 из почв в различных типах экосистем (лесных, луговых, болотных, тундровых и др.), в которых корректное использование камерного метода имеет свои особенности. Основное содержание методического руководства включает краткий теоретический обзор, детальный анализ разных модификаций камерного метода и используемого оборудования, инструкции по выбору ключевых участков и проведению измерений эмиссии CO_2 из почв в полевых условиях, включая алгоритмы расчета. Руководство содержит также анализ подходов для оценки сезонных и годовых потоков CO_2 из почв.

Создание настоящего Методического руководства продиктовано необходимостью унифицировать метод измерения эмиссии CO_2 из почв в разных исследовательских группах в рамках создаваемой Национальной системы мониторинга пулов и потоков парниковых газов на территории Российской Федерации, которая является одной из магистральных задач Важнейшего Инновационного Проекта Государственного Значения (ВИП ГЗ), предусмотренного для реализации в 2022–2024 гг.

Пособие предназначено для всех интересующихся проблемами измерения эмиссии CO_2 из почв, включая как новичков, так и именитых экспертов. Оно будет полезно для студентов, магистрантов, аспирантов и научных работников в области почвоведения и экологии.

В работе над изданием принимали участие:

д.б.н. И.Н. Курганова (ИФХиБПП РАН, г. Пущино);
к.б.н. О.Ю. Гончарова (МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва);
к.б.н. Д.В. Ильясов (ЮГУ, г. Ханты Мансийск);
д.б.н. Д.Г. Замолодчиков (ЦЭПЛ РАН, г. Москва);
д.б.н. Д.В. Карелин (ИГ РАН, г. Москва);
к.т.н. В.О. Лопес де Гереню (ИФХиБПП РАН, г. Пущино);
к.б.н. Г.В. Матышак (МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва);
к.б.н. М.Н. Мигловец (ИБ Коми НЦ УрО РАН, г. Сыктывкар);
к.с.-х.н. Е.В. Мошкина (ИЛ Кар НЦ РАН, г. Петрозаводск);
к.б.н. А.Ф. Осипов (ИБ Коми НЦ УрО РАН, г. Сыктывкар);
к.б.н. Д.А. Хорошаев (ИФХиБПП РАН, г. Пущино);
д.с.-х.н. И.Н. Шарков (ИПА СО РАН, г. Новосибирск).

1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ

1.1. Биогенный цикл углерода

В соответствии с определениями, приведенными в монографии Н.И. Базилевич и А.А. Титляновой (2008), биогенный цикл углерода (С) (или круговорот органического углерода) представляет собой совокупность продукционных и деструкционных процессов, а также процессов депонирования и ресинтеза органических соединений (рис. 1).

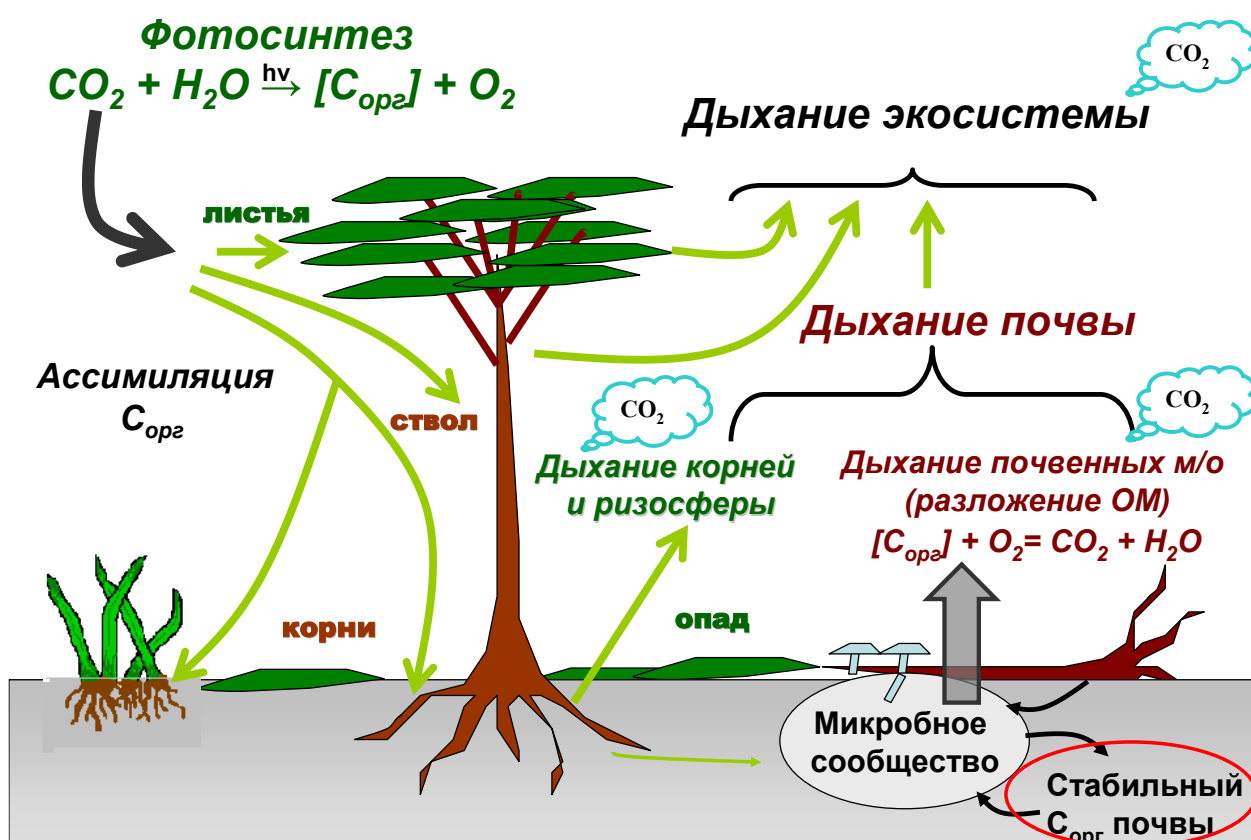


Рисунок 1. Биогенный цикл углерода в наземной экосистеме (схема)

Продукционная составляющая цикла органического углерода (C_{org}) — это сочетание всех процессов, которые приводят к созданию растительного органического вещества. Деструкционная ветвь цикла C_{org} более сложная, ее конечным продуктом является углекислый газ, замыкающий цикл C_{org} и связывающий его с циклами неорганического углерода и кислорода (Заварзин, 2003). Деструкционные процессы включают в себя процессы отмирания растений или их отдельных частей, образования мертвой фитомассы и ее распада до простых минеральных веществ. Благодаря

участию в этих процессах микроорганизмов почвы, как деструктивного звена, совершается циклическое превращение вещества и энергии в биосфере (Звягинцев и др., 2005). Углекислый газ, выделяющийся из почвы, — это совокупный продукт деструкционных процессов, дыхания корней растений и небиологических (физических и/или химических) источников (Кобак, 1988; Xu and Shang, 2016). Под *депонированием углерода* понимается процесс его закрепления в долгосуществующих компонентах экосистемы: деревьях, торфе, почвенном гумусе, а *ресинтез* представляет собой совокупность процессов, приводящих к образованию новых органических соединений из продуктов переработки растительного вещества (Базилевич и Титлянова, 2008). В последние годы часто употребляемым, но не всегда грамотно, стал термин «*секвестрация углерода почвами*», под которым понимают «перевод атмосферного углекислого газа в живое органическое вещество растений с последующей трансформацией формирующейся мортмассы в почвенное органическое вещество (ОВ) и его долговременное сохранение в почвенном резервуаре за счет стабилизации с минимальным риском возврата в атмосферу» (Семенов и Когут, 2015; Когут и др., 2021).

Весь углерод, поглощаемый во время фотосинтеза, представляет собой валовую *первичную продукцию* (*Gross Primary Production, GPP*) и определяется по убыли CO_2 в камерах с растениями или по фотосинтетическому связыванию $^{14}\text{CO}_2$ (Карелин и Замолотчиков, 2008; Кудяров и др., 2007). В продукционном звене создается первичная продукция экосистемы как результат процессов фотосинтеза и дыхания растений:

$$\text{NPP} = \text{GPP} - \text{AR} \quad (1)$$

где: NPP — чистая первичная продукция, GPP — валовая первичная продукция (интенсивность фотосинтеза), AR (*autotrophic respiration* или *plant respiration*) — интенсивность дыхания подземных (RR, *root respiration*) и надземных (APR, *above phytomass respiration*) органов растений (рис. 2).

Чистая *первичная продукция* (*Net Primary Production, NPP* — в англоязычной литературе) представляет собой количество органического вещества, созданного фитоценозом за единицу времени, и является

важнейшей характеристикой экосистемы, запасом свободной энергии, которая обеспечивает протекание биотического круговорота углерода. Соотношение $GPP:NPP$ меняется в зависимости от условий, но в большинстве случаев оно составляет 2:1, т.е. $GPP = 2 NPP$ (Кудеяров и др., 2007; IGBP Terrestrial Carbon Working Group et al., 1998).

Изучение и описание биотического круговорота углерода также подразумевает точное определение таких понятий, как (рис. 2):

Экосистемное дыхание (или *ecosystem respiration*, ER) — это суммарный поток, объединяющий деструкционную составляющую углеродного цикла и дыхание растений (надземной и подземной частей);

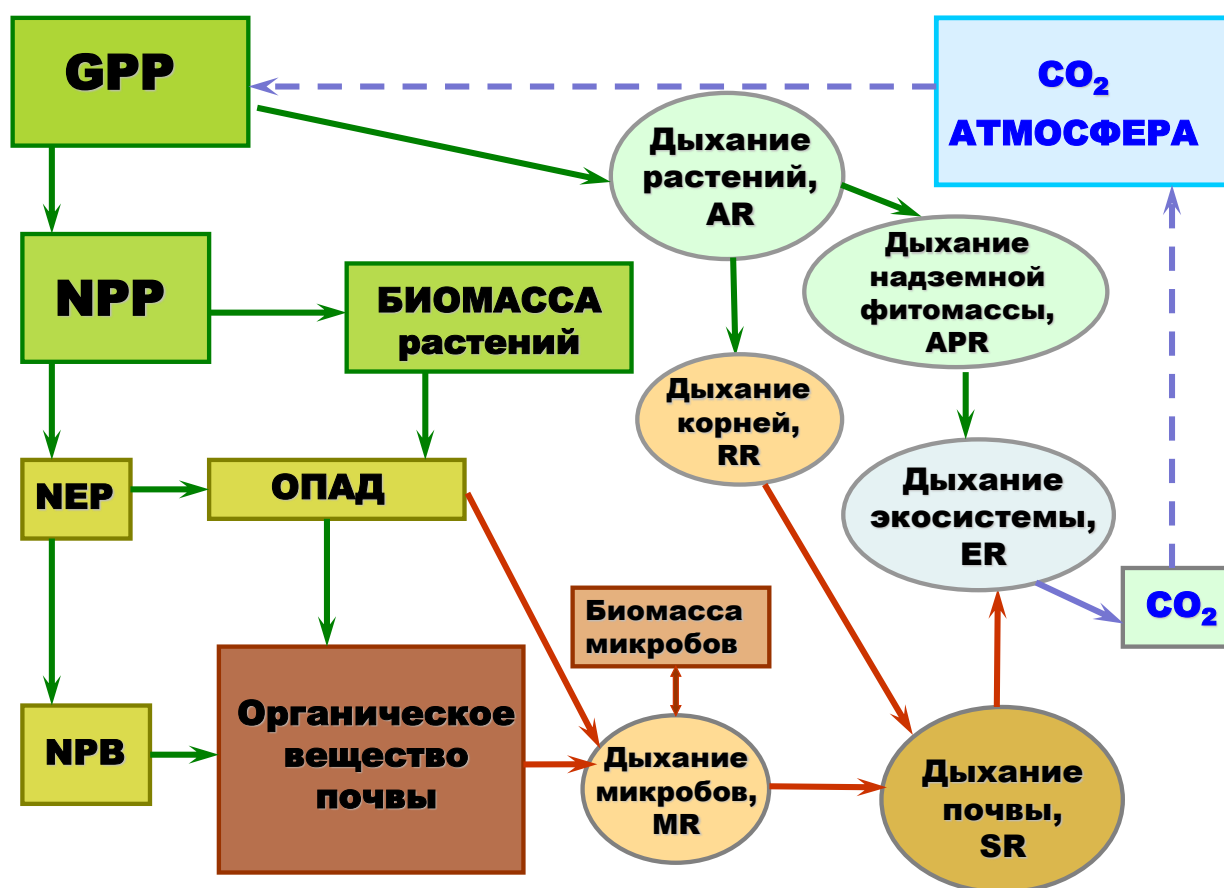


Рисунок 2. Потoki, пулы и резервуары органического углерода в экосистеме

Чистая экосистемная продукция (*Net Ecosystem Production*, NEP) — результат годового цикла функционирования экосистемы (часто используют для оценки баланса органического углерода в экосистемах), представляет составляющую продукционных и деструкционных процессов (Кудеяров и др., 2007):

$$NEP = NPP - \text{дыхание гетеротрофов (MR)} \quad (2)$$

Эта величина имеет первостепенное значение и для биосферных балансовых расчетов.

Чистый экосистемный обмен (*Net Ecosystem Exchange, NEE*) — разность между количеством углекислого газа, выделенным в атмосферу при дыхании экосистемы (почва + растения), и количеством углекислого газа, поглощенным системой в процессе фотосинтеза:

$$NEE = ER - GPP \quad (3)$$

Отрицательный знак при количественной оценке NEE означает поглощение углерода экосистемой, положительный — выделение. В полевых исследованиях NEE определяется с помощью микрометеорологического метода турбулентной ковариации (*eddy-covariance*) или методом прозрачных камер. С некоторыми допущениями, можно принять, что на эквивалентных временных масштабах NEP и NEE — равнозначные величины, однако, имеющие противоположные знаки: $NEP = -NEE$.

Чистая биомная продукция (*Net Biome Production, NBP*) — это сумма органического углерода, накопленного в экосистеме в течение длительного периода, порядка десятилетий (IGBP Terrestrial Carbon Working Group et al., 1998). В нее кроме растительной биомассы входят устойчивые органические формы углерода — торф и гумус почвы, время пребывания которых в сезонном климате составляет: для вегетативных частей растений — 1 год, древесных частей — 100 лет, для гумуса — около 1000 лет и для торфа — несколько тысяч лет (Кудеяров и др., 2007).

1.2. Эмиссия CO₂ из почв

Всю совокупность процессов деструкции органических материалов, происходящих в почве и приводящих, в конечном счете, к выделению углекислого газа, воды и энергии, запасенной в органических соединениях, характеризует «дыхание почвы», которое является одной из

ее наиважнейших функций (Кобак, 1988; Кудеяров, 2006, 1999, 1994). *Общее дыхание почвы (Soil respiration, SR)* можно условно разделить на два основных компонента: (1) *дыхание корней (Root respiration (RR))* и связанное с ним *дыхание ризосферной микрофлоры (Rhizomicrobial respiration, RMR)* и (2) *дыхание почвенных микроорганизмов, (Microbial respiration, MR)*, которые разлагают почвенное органическое вещество (Кудеяров, 1994; Ларионова, 1988; Bond-Lamberty et al., 2004). Считается, что на долю дыхания почвенных микроорганизмов приходится от 2/3 до 1/2 общего потока CO_2 из почв (Кудеяров и др., 2007; Soil microbiology, ecology, and biochemistry, 2007; Hanson et al., 2000; Kuzyakov, 2002; Kuzyakov and Larionova, 2005).

В литературе термин «дыхание почвы» используется для обозначения разнообразных по своей природе процессов и явлений, а именно: воздухообмена между почвой и атмосферой, суммарного выделения (эмиссии) углекислого газа с поверхности почвы, скорости минерализации органического вещества и интегрального показателя ее биологической активности (Наумов, 2004; Смагин, 2005, 2000). Такое многообразие толкований термина «дыхание почвы» требует определенных уточнений в понятийном аппарате. Следует отметить, что при рассмотрении вопросов о потоках углекислого газа из почв авторы часто смешивают такие понятия как «эмиссия CO_2 », «продуцирование CO_2 » и «дыхание почвы», в то время как они характеризуют далеко не равнозначные явления. Так под «эмиссией» углекислого газа следует понимать процесс выделения CO_2 с поверхности почвы в атмосферу. «Продуцирование CO_2 » означает образование этого газа в результате биогенных и абиогенных процессов, а «дыхание почвы» — это суммарная продукция CO_2 в результате дыхания корней растений, почвенных микроорганизмов и животных. В то же время, анализ опубликованных работ по экспериментальному определению дыхания почвы позволяет заключить, что в большинстве случаев авторы, оценивая дыхание почвы, определяли общую эмиссию CO_2 с поверхности почвы в атмосферу. Поэтому, в дальнейшем такие понятия как *дыхание почвы, эмиссия (выделение) CO_2 и поток CO_2 из почв* будут употребляться нами в качестве синонимов. В зарубежной литературе перечисленные выше термины также

отождествляются (Raich and Schlesinger, 1992; Rustad et al., 2000; Schlesinger and Andrews, 2000).

Дыхание почв отличается высокая пространственная неоднородность как в пределах одной биоклиматической зоны (Махныкина и др., 2020; Lopes de Gerenyu et al., 2005; Бобрик и др., 2018), так и на территории России в целом, которая характеризуется значительным разнообразием природно-климатических условий (Kudeyarov and Kurganova, 2005; Mukhortova et al., 2021). Пространственная вариабельность почвенного дыхания в пределах одной биоклиматической зоны или участка исследования будет в значительной степени определяться почвенно-растительными условиями (тип ценоза, особенности расположения и тип корневых систем растений, физико-химические характеристики почв), т.е. биотическими факторами (Han et al., 2007). Дыхание почвы также чутко реагирует на смену погодных условий через изменение гидротермического режима почв, что определяет ее значительную временную изменчивость (Goncharova et al., 2020; Karelin et al., 2021; Kurganova et al., 2020, 2011). Поэтому для получения адекватных оценок суммарной годовой величины дыхания почвы требуется проведение многолетних круглогодичных наблюдений.

Как уже отмечалось выше, дыхание почв является одним из главных потоков в глобальном цикле углерода, представляя собой основную расходную часть при оценке баланса углерода в наземных экосистемах. В упрощённом виде баланс углерода (или *Net Ecosystem Production, NEP*) в экосистеме определяют по разности между величиной чистой первичной продукции и выделением CO₂ при разложении органического вещества почвы, которое оценивают по величине микробного дыхания:

$$NEP = NPP - MR \quad (4)$$

Положительная величина NEP свидетельствует о стоке углерода в экосистему, отрицательная — о потерях углерода из экосистемы.

2. КРАТКИЙ ОБЗОР ОСНОВНЫХ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭМИССИИ CO₂ ИЗ ПОЧВ

Методы определения эмиссии CO₂ из почв или дыхания почвы можно разделить на прямые и косвенные (Ларионова и др., 1993). Косвенные методы позволяют грубо оценить эмиссию диоксида углерода за большие периоды времени и основаны на определении потерь органического углерода из почв и подстилки, с последующим расчетом выделившегося CO₂ (Ведрова, 1996, 1997a; Singh and Gupta, 1977; Vedrova et al., 2006). К методам прямого определения почвенного дыхания относятся диффузионные (Смагин, 2005; Jong and Schappert, 1972; Rolston, 1978) и камерные (Ларионова и др., 1993; Макаров, 1977; Смагин, 2005; Штатнов, 1952; Lundegårdh, 1927). Наиболее часто применяемой разновидностью диффузионного метода является профильный метод, который позволяет определять интенсивность дыхания почв по градиенту концентрации и коэффициенту диффузии CO₂ в почве (Каспаров и др., 1986; Ларионова, 1988; Смагин, 1991; Смагин и др., 1992). Другой разновидностью диффузионного метода является аэродинамический метод (Kimball and Lemon, 1970; Lemon, 1967; Nakayama and Kimball, 1988), используемый в лесных биогеоценозах, где турбулентный обмен не является основной движущей силой газообмена в воздухе. При использовании этого метода скорость эмиссии CO₂ из почвы также рассчитывается на основе законов диффузии, а градиент концентрации CO₂ определяется при помощи высокоточных инфракрасных газоанализаторов. Диффузионные методы предпочтительны при стационарных исследованиях, поскольку позволяют определить скорость эмиссии CO₂ из почв, не нарушая растительного покрова. В зимний период, например, диффузионный метод позволяет оценить, сколько газа «запечаталось» в почве, т.е. оценить истинную продукцию CO₂ в промерзшей почве и учесть ее в годовом обмене. Вместе с тем, эти методы имеют существенные ограничения, а именно: необходимость определения дополнительных переменных — коэффициента диффузии CO₂ в почве и коэффициента турбулентного обмена в атмосфере.

Камерный метод, основанный на определении скорости эмиссии CO_2 из почвы по накоплению диоксида углерода в камере-изоляторе и предложенный *Люндегордтом* ещё в 1924 году, имеет множество модификаций и является в настоящее время самым популярным в силу своей простоты и удобства (Кудеяров и др., 1995; Ларионова и др., 1993; Лопес де Гереню и др., 2005). Камерный метод имеет закрытую и открытую модификации, а закрытые камеры могут быть проточными, подразумевающими измерение равновесной концентрации CO_2 в токе воздуха, проходящем через камеру, и непроточными, в которых расчет скорости выделения CO_2 проводят с учетом времени его накопления за определенный промежуток времени (Pumpanen et al., 2003). Сравнение этих двух разновидностей метода закрытых камер показало, что использование проточных камер дает величины потока CO_2 из почв на 50% выше, чем при применении непроточной модификации. При этом, если измерения велись с известными концентрациями CO_2 , было выявлено, что метод непроточных камер занижал результаты на 30%, а при использовании проточных камер, результаты получались на 20% выше контрольных значений (Pumpanen et al., 2003).

В России наиболее распространено применение закрытых (непроточных) камер, хотя результаты, полученные при их применении, дают недооценку величины потоков CO_2 из почвы по сравнению с открытыми камерами в среднем на 10% (Rayment, 2000). Ранние модификации камерного метода получили название «абсорбционного метода», поскольку выделяющийся из почвы углекислый газ абсорбировался щелочью, которую после определенного времени экспозиции подвергали титриметрическому анализу (Ларионова и др., 1993). В современных модификациях камерного метода изменение концентрации углекислого газа в камерах определяют при помощи портативных инфракрасных газоанализаторов (Смагин, 2005) или стационарными хроматографами после отбора газовых проб через определенные промежутки времени (Лопес де Гереню и др., 2001). Большинство данных по оценке потоков CO_2 из почв различных экосистем, опубликованных в отечественной и зарубежной литературе, получены именно камерным методом (Курганова и Кудеяров, 1998).

Для корректного применения метода закрытых камер, как в полевых, так и в лабораторных условиях, прежде всего, необходимо правильно подобрать время экспозиции, в течение которого концентрация CO_2 в камере-изоляторе будет возрастать линейно (Смагин, 2005). Очевидными ограничениями при использовании этого метода являются трудоемкость и точечность (отсутствие непрерывности) проводимых измерений, малый размер пробных площадей и невозможность прямой оценки балансовых потоков в лесных и некоторых других типах экосистем (Лопес де Гереню и др., 2005). В солнечную погоду температура в камере в течение часа может подниматься на $10\text{--}15^\circ\text{C}$, что вносит значительные погрешности в измерения. Поэтому камеры должны быть светлоокрашенными и защищенными от прямого солнечного света (рис. 3).



Рисунок 3. Виды закрытых камер: непроточные ПВХ-камера (слева) и камера из нержавеющей стали (центр), автоматические проточные непрозрачные и прозрачные камеры (справа). Фото И.Н. Кургановой, Д.В. Сапронова (ИФХиБПП РАН, Московская область)

В снежный и морозный период применение камерного метода также имеет свои трудности. Во-первых, отрицательные температуры воздуха исключают использование абсорбционного метода из-за замерзания раствора щёлочи. Во-вторых, скорость эмиссии углекислого газа в зимний период снижается в $5\text{--}10$ раз, что приводит к значительному увеличению времени экспозиции. В-третьих, при нарушении снежного покрова происходит мгновенный выброс углекислого газа, а затем нарушенный снег начинает активно сорбировать CO_2 , выделяющийся из почв, занижая реальную скорость его эмиссии (Лопес де Гереню и др., 2001). И если в начале зимы рыхлый снежный покров практически не оказывает сопротивления потоку углекислого газа из почвы, то во время оттепелей

или к концу зимы в нем образуются ледяные прослойки, он уплотняется и затрудняет газообмен между почвой и атмосферой. Если зимой осадки выпадают в виде дождя, то на поверхности снега образуется ледяная глазурь. Всё это требует от исследователя в зимний период предельной аккуратности и точности.

Анализ литературы показал, что зимние потоки CO_2 из почв определяют либо по скорости деструкции органического вещества почв и мортмассы (Ведрова, 1997b, 1995; Смагин и др., 1992), либо модифицированным абсорбционным методом (Adam и Stahr, 1997), либо используя концентрационный и диффузионный коэффициенты (Burton and Beauchamp, 1994; Zimov et al., 1993), либо кюветным методом (*Cuvette method*) (Pajari, 1995) с окончанием на инфракрасном газоанализаторе.

В последние десятилетия для определения потоков CO_2 в сочетании с камерами-изоляторами применяются портативные и весьма чувствительные инфракрасные газоанализаторы, например LI-COR 6200 (Замолодчиков и Карелин, 1999; Замолодчиков и др., 2003, 2000; Oechel et al., 1997) и их более поздние модификации, напр. LI-COR 8100 (и LI-COR 8200). Их использование позволяет уменьшить время экспозиции (до 1–5 минут в зависимости от сезона измерений) и тем самым избежать увеличения температуры воздуха внутри камеры. Однако инфракрасные анализаторы не могут работать на морозе и требуют обогрева.

Во время единичного измерения с использованием LI-COR пробный участок размером около 40x40 см герметично накрывается камерой, прозрачной для фотосинтетически активной солнечной радиации. По изменению концентрации углекислого газа в объеме камеры за время экспозиции рассчитывается величина его потока (Замолодчиков, 2003). Значения эмиссии CO_2 при естественном освещении служат оценкой балансового потока углерода (NEE), а использование непрозрачных камер позволяет оценить валовое дыхание экосистемы (ER). Разность этих величин представляет собой оценку валовой первичной продукции (GPP). Таким образом, применение прозрачных и затемненных камер позволяет использовать метод закрытых камер не только для измерения эмиссии CO_2 из почв, но и для оценки баланса углерода в экосистеме.

В литературе неоднократно указывалось на несовпадение данных по определению интенсивности дыхания почвы, полученных разными методами (Курганова и Кудеяров, 1998; Наумов, 2004; Шарков, 1987; Freijer and Bouten, 1991; Rayment, 2000). Было показано, что титриметрическое окончание определения концентрации CO_2 при использовании камерного метода по точности не уступает газохроматографическому. Сравнительный анализ методов количественной оценки определения эмиссии углекислого газа из почв, проведенный нами на основе литературных данных, показал, что на 5% уровне значимости достоверно различаются между собой оценки потоков диоксида углерода, полученные методом Люндегордта и абсорбции, камерным и профильным, а наиболее близкие оценки эмиссии CO_2 из почв получаются при использовании методов Штатнова (1952) и Макарова (1977), которые и являются наиболее часто используемыми среди исследователей (Курганова и Кудеяров, 1998).

Проведенный нами ранее (Курганова, 2010) анализ методов количественного определения эмиссии углекислого газа из почв, показал, что идеального метода её определения не существует: подавляющая часть используемых техник далеко не безупречны — они либо трудоемки, либо плохо подходят к использованию в зимних условиях, либо весьма дорогостоящи. Поэтому, на наш взгляд, наиболее приемлемым методом для проведения круглогодичных мониторинговых наблюдений за эмиссией CO_2 из почв в различных экосистемах остается камерный статический метод Макарова, модифицированный для условий морозных и снежных зим (Лопес де Гереню и др., 2001; Kurganova et al., 2003).

3. ПРОВЕДЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ ЭМИССИИ CO₂ ИЗ ПОЧВ КАМЕРНЫМ МЕТОДОМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАЗНОЙ ТЕХНИЧЕСКОЙ БАЗЫ

3.1. Выбор участка и частота измерений

Место для проведения наблюдений за эмиссией CO₂ из почвы (далее — площадка) выбирают в центре наиболее репрезентативного участка той площади (экосистемы), где планируется проводить наблюдения. Площадка должна быть относительно ровной и довольно типичной в отношении растительного покрова, для того чтобы охарактеризовать экосистему в целом. Учитывая высокую пространственную неоднородность эмиссии CO₂ из почв (Курганова и др., 2022 (Вестник), 2020) на каждой отдельной площадке наблюдений рекомендуем установить не менее 5 камер. Их можно расположить по трансекте 10–20 или более метров, с расстоянием 2–4 м (или более) между камерами (рис. 4). Площадка наблюдений может соответствовать определенному типу экосистемы или разным элементам микрорельефа в пределах одной экосистемы, например, болотной или тундровой. Подразумевается, что измеряемый эмиссионный поток CO₂ из почв характеризуют общее дыхание с поверхности почвы, за исключением дыхания зеленых частей растений. Поэтому, установка камер будет зависеть от типа экосистемы. Если возможно, то камеры устанавливают между растениями травянистого яруса, а при необходимости зеленые части травы перед установкой камер срезают. Лесную подстилку (или свежий опад в осенний период) с поверхности почвы не удаляют.

Следующий важный вопрос — когда проводить измерения эмиссии CO₂ из почв. Поскольку далеко не всегда получается организовать круглосуточные измерения, следует проводить замеры в такое время суток, когда мгновенные потоки близки к среднесуточным значениям эмиссии. При выраженной внутрисуточной динамике эмиссии CO₂ в отдельных точках это происходит дважды в сутки — утром и вечером. Точное время переходов зависит от широты местности и сезона. В тундровой зоне, согласно многолетним данным измерений (Карелин и Замолодчиков, 2008), можно принять, что в мае — июле измерения оптимально проводить в районе 8 и 19 час по местному времени, а в июле — октябре измерения более корректно делать в 9 и 20 час. В умеренных

широтах эмиссию CO_2 из почв следует измерять в утренние часы (с 9 до 11), когда её скорость наиболее близка к среднесуточной (Ларионова и Розанова, 1993). В холодный период года внутрисуточной динамики дыхания почвы почти не отмечается, поэтому время измерений в этот период не играет существенного значения.



Рисунок 4. Расположение камер на площадках исследований под луговой и лесной растительностью на серой лесной почве. Фото И.Н. Кургановой, Д.В. Сапронов (ИФХиБПП РАН, Московская область)

Оптимальным решением для выбора времени отбора проб следует признать проведение круглосуточных измерений эмиссии CO_2 из почв в ясные дни (каждые 2–4 часа), с тем чтобы выбрать те часы, в которые интенсивность выделения CO_2 из почв будет наиболее близка к среднесуточным значениям этого параметра. Эти часы, как было показано выше, могут различаться, поскольку зависят от внутрисуточной динамики температуры почвы, а также от особенностей ассимиляции углерода растениями в течение суток.

Многолетний опыт проведения измерений в различных экосистемах показал, что определение эмиссии CO_2 из почв на открытых площадках (агроценозы, луговые и степные экосистемы) в течение вегетационного сезона желательно проводить в более ранние часы (8–9 час), чем в лесных насаждениях, поскольку ближе к полудню на открытых пространствах наблюдается заметный прогрев почвы, который может сильно повлиять на интенсивность эмиссии CO_2 из почв. В пасмурные дни и в лесных

насаждениях с проективным покрытием более 70% измерения эмиссии углекислого газа из почв можно проводить в течение всего светового дня (Сморкалов, личное сообщение).

Анализ данных по определению ежедневной динамики эмиссии CO_2 из почв, проведенной в ИФХиБПП РАН А.А. Ларионовой в конце 1980-х годов (Ларионова и др., 1993) показал, что еженедельное проведение измерений эмиссии CO_2 из почв является оптимальной, но малореализуемой частотой для получения адекватных оценок месячных и сезонных потоков CO_2 из почв (Курганова и Кудеяров, 1998). Наши расчеты показали, что измерений эмиссии CO_2 из почв еженедельно или подекадно (3–5 раз в месяц) позволяет получить реалистичные оценки среднемесячных значений эмиссии CO_2 из почв.

3.2. Абсорбционный метод

Общие представления

Абсорбционный метод определения эмиссии CO_2 почвой привлекает исследователей своей простотой и несложностью используемого оборудования. Он основан на поглощении щелочью диффузно выделяющегося из почвы CO_2 . При измерении в полевых условиях чашечку с раствором щелочи ставят на поверхность почвы в установленный сосуд-изолятор, который на период экспозиции закрывают крышкой. После экспозиции остаток щелочи оттитровывают кислотой и с учетом холостого определения (раствор щелочи выдерживают в герметичном сосуде, объем которого соответствует объему надземной части сосуда-изолятора), рассчитывают количество выделившегося из почвы CO_2 .

Основной недостаток абсорбционного метода — неполное поглощение раствором щелочи выделяющегося из почвы CO_2 из-за несоответствия между возможностями поглотителя, диаметром сосуда-изолятора и экспозицией. В результате метод часто дает заниженные результаты, в том числе вследствие падения градиента концентрации CO_2 в системе «почвенный — надпочвенный воздух». Для преодоления этого недостатка нами в специальном эксперименте было установлено, что 10 мл 1 н. раствора NaOH в бюксе диаметром 5 см (площадь активной поверхности раствора около 20 см^2) поглощают за 24 часа из воздуха при

концентрации в нем 0,06% CO₂ и температуре 20°C примерно 180 мг CO₂. Как показали наблюдения в поле (Макаров, 1988), концентрация CO₂ в приземном слое воздуха достигает такой величины при повышенных уровнях эмиссии CO₂ из почвы или в ночное время. На основании результатов этого эксперимента и учета обобщенных литературных данных по эмиссии CO₂ почвами (Singh and Gupta, 1977), нами были установлены оптимальные параметры сосуда-изолятора для измерения потоков углекислого газа при экспозиции 24 часа. Так, оптимальный внутренний диаметр сосуда-изолятора составил 10 см (площадь сечения 78.5 см²), высота – 15 см. Был сделан вывод: если при использовании такого сосуда-изолятора 10 мл 1 н. раствора NaOH в чашечке диаметром 5 см поглотят за 24-часовую экспозицию не более 180 мг CO₂, то средняя концентрация CO₂ в надпочвенном воздухе не превысит 0.06%, то есть накопления углекислого газа в приборе не произойдет. Таким образом, используя названные параметры сосуда-изолятора и поглотителя, можно при суточной экспозиции измерять скорость продуцирования CO₂ примерно до 950 мг / м² ч — величины, которая, судя по обобщенным данным (Singh and Gupta, 1977), близка к верхнему пределу эмиссии CO₂ почвами. Можно измерять и более высокую скорость выделения CO₂, но в этом случае следует поменять раствор щелочи в сосуда-изоляторе на новый спустя 8–12 часов экспозиции. В дальнейшем было установлено, что 5 мл 2 н. раствора NaOH обеспечивают такую же эффективность поглощения CO₂, как 10 мл 1 н. NaOH. Работа с меньшим объемом раствора щелочи может быть более удобной, особенно при использовании автоматических пипеток-дозаторов.

В процессе отработки методики также было установлено, что в ходе измерения сосуд-изолятор существенно не изменяет факторы (прежде всего температуру верхнего слоя), влияющие на биологическую активность в почве. Следовательно, при полном улавливании CO₂ раствором щелочи регистрируемая скорость выделения углекислого газа соответствует фактической скорости продуцирования CO₂ почвой. Также было показано, что для расчета суммарных потерь CO₂ из почвы за вегетационный период достаточно снимать отсчеты среднесуточной скорости продуцирования CO₂ 1 раз в неделю.

Методика определения среднесуточной скорости продуцирования CO_2 почвой в полевых условиях

Сосуд-изолятор представляет собой заостренный снизу тонкостенный (толщина 3 мм) дюралюминиевый цилиндр высотой 15 см и внутренним диаметром 10 см, закрывающийся сверху крышкой. Сосуд-изолятор и крышка выкрашиваются краской на основе алюминиевой пудры, чтобы исключить существенное повышение температуры почвы в процессе измерения. Сосуд-изолятор врезается в почву на глубину 5 см и оставляется в таком положении на протяжении всего периода измерений (рис. 5).

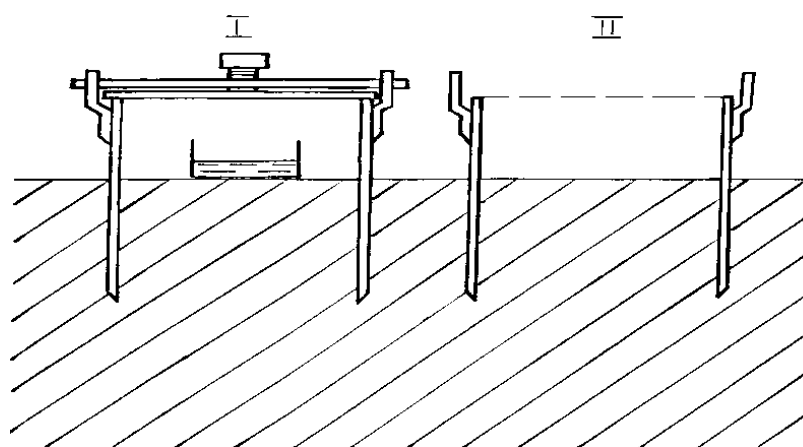


Рисунок 5. Схема определения продуцирования CO_2 почвой в полевых условиях. I — снаряженный сосуд-изолятор в процессе измерения, II — сосуд-изолятор со снятой крышкой в промежутках между измерениями

Для определения скорости продуцирования CO_2 на поверхность почвы ставится бюкс диаметром 5 см с 10 мл 1 н. раствора NaOH (или 5 мл 2 н. раствора). Изолятор закрывается крышкой. После 24-часовой экспозиции крышку изолятора снимают до следующего измерения, раствор щелочи доставляют в лабораторию и титруют 0,2 н. раствором HCl до pH 8,4 с учетом холостого определения (раствор щелочи на период экспозиции помещается в отдельную герметичную камеру без почвы) рассчитывают количество выделившегося из почвы CO_2 по формуле:

$$K = (a - b) \times n \times 44 \quad (5)$$

где K — количество CO_2 , выделившееся из почвы за экспозицию, мг; a и b — количество раствора HCl , пошедшее на титрование соответственно в холостом и рабочем определениях, мл; n — нормальность раствора кислоты, 44 — коэффициент, характеризующий количество CO_2 , эквивалентное 1 мл 1н. HCl , мг.

Среднесуточную скорость продуцирования CO_2 почвой (B , кг/га за 24 ч) рассчитывают по формуле:

$$B = \frac{K \times 24 \times 10^8}{\Delta \times S \times 10^6} \quad (6)$$

где Δ — экспозиция (при низкой скорости выделения CO_2 из почвы может быть кратной 24 ч), час; S — площадь сосуда-изолятора, см^2 ; 10^8 — коэффициент для пересчета см^2 в га; 10^6 — коэффициент для пересчета мг CO_2 в кг.

Суммарные потери углерода в виде CO_2 из почвы за период наблюдения рассчитывают по формуле:

$$A = \frac{(B_1+B_2) \times t_1}{2} + \frac{(B_2+B_3) \times t_2}{2} + \dots + \frac{(B_{n-1}+B_n) \times t_{n-1}}{2} \times 0.273 \quad (7)$$

где A — суммарное количество углерода CO_2 , выделившееся из почвы за период наблюдения, кг/га; B_1, B_2, \dots, B_n — соответственно величины первого, второго, n -ого измерений среднесуточной скорости продуцирования CO_2 почвой, кг/га; t_1, t_2, t_{n-1} — периоды времени между измерениями, сутки; 0,273 — коэффициент для пересчета массы углерода в эквивалентном количестве CO_2 .

Таким образом, количественное определение среднесуточной скорости эмиссии CO_2 почвой в полевых условиях может быть осуществлено с помощью сосуда-изолятора диаметром 10 см и высотой 15 см, врезаемого в почву на глубину 5 см. При использовании в качестве поглотителя CO_2 10 мл 1 н. (или 5 мл 2 н.) раствора NaOH в чашечках диаметром 5 см полное улавливание CO_2 щелочью обеспечивается при его

выделении за 24-часовую экспозиции в количестве не более 180 мг. Для выделения в общем потоке CO_2 из почв вклада дыхания корней растений и ризосферной микрофлоры, измерения можно проводить на специально подготовленных площадках с живыми корнями растений и без них.

3.3. Метод закрытых камер с отбором газовых проб с помощью шприца в герметичные флаконы

Эта модификация камерного метода вот уже 25 лет используется сотрудниками лаборатории почвенных циклов азота и углерода ИФХиБПП РАН (Пущино) для круглогодичного определения эмиссии CO_2 из почв. Календарный год исследований условно разделен на два периода: *бесснежный (теплый)* — с мая по октябрь и *снежный (холодный)* — с ноября по апрель.



Рисунок 6. Установка измерительных камер в лесном, луговом и агроценозах. Фото И.Н. Кургановой, В.О. Лопес де Гереню (ИФХиБПП РАН, Московская область).

В бесснежный (теплый) период года в качестве камер на протяжении всего периода исследований использовали небольшие стальные цилиндрические сосуды-изоляторы, высотой и диаметром по 10 см (повторность 5-кратная). Сосуды врезали на глубину 4 см непосредственно перед определением интенсивности дыхания почв. И в агроценозе, и в лесу сосуды — изоляторы помещали между растениями, а в луговом ценозе перед установкой камер надземную часть растений срезали на уровне почвы (рис. 6). Таким образом, определяемый поток CO_2 представлял собой суммарное дыхание почвенной микрофлоры, листового опада, корней и мортмассы травянистой растительности без учета дыхания надземного яруса фитомассы.

В снежный (холодный) период камеры врезали в почву заранее, до наступления морозов и установления снежного покрова и использовали их

вплоть до весеннего оттаивания почвы. В этом случае имеется возможность оперировать только крышкой изолятора, что предотвращает нарушение почвенного и снежного покрова. В течение первых 20 лет измерений в ИФХиБПП РАН в холодный период года использовали стационарные стальные основания — изоляторы размером 32×32 см с водяным затвором, заглубленные в почву на 20 см, и стальные коробки 32×32×15 см (рис.7). При выпадении снега изоляторы наращивали специальными секциями, чтобы исключить нарушение снежного покрова при отборе газовых проб.



Рисунок 7. Два типа измерительных камер для определения эмиссии CO₂ из почвы в зимний период. Фото И.Н. Кургановой, Д.В. Сапронова (ИФХиБПП РАН, Московская область).

В последние годы в качестве камер в зимний период стали использовать ПВХ трубы диаметром 110 мм и высотой 40 см, которые при необходимости (по мере увеличения высоты снежного покрова) также удлиняют дополнительными секциями по 20 см. Соединение крышек с телом трубы уплотняется с помощью пенополиуретана или слоя силикона.

Отбор газовых проб на содержание CO₂ в камерах производят медицинским пластиковым шприцем с притертым поршнем (объемом 20 мл) в герметично закрытые вакуумированные стеклянные («пенициллиновые») флаконы (объем 15 мл) с металлическими зажимами специальной конструкции, позволяющими многократное использование резиновых крышек. Вакуумирование флакона производят путем 2-х кратного отсасывания воздуха из флакона шприцем, непосредственно перед взятием газовой пробы из камеры-изолятора. Возможно

использование полуавтомата закатоного для укупоривания пенициллиновых флаконов или одноразовых вакутейнеров. Иногда для перевозки газовых проб в лабораторию из удаленных мест используют солевые растворы, но они очень нежелательны, поскольку пары раствора могут оказывать негативное влияние на работу хроматографа. Если пробу предполагается перевозить или переносить, шприц нужно закрыть с помощью специальных трехходовых кранов для шприцов и Недолгое хранение газовых проб допускается и в шприцах без снятия иглы, если предполагается измерение концентрации CO_2 с помощью ИК анализатора. Для обеспечения изоляции кончика иглы можно использовать небольшой кусочек резины, помещенный в окончание предохранительного колпачка иглы.

Непосредственно перед забором газовой фазы необходимо сделать несколько прокачиваний (3–5 раз) внутрикамерного воздуха через шприц, равномерно забирая воздух из камеры и затем возвращая его, не вытаскивая шприца. Возможно также использование вентиляторов, встроенных в крышку камеры. Общее время экспозиции и интервал отбора газовых проб надо устанавливать опытным путем. Они будут зависеть от многих причин — времени года, типа экосистемы, почвенной текстуры и др. Так в регионе южного Подмоскoвья, в теплый (безморозный) период года общее время экспозиции составляет 30–45 минут с отбором контрольных проб через 10–15 минут. По причине невысоких скоростей эмиссии CO_2 в холодный период года, время экспозиции увеличивают до 60–120 минут с отбором контрольных проб через 30–45 минут.

Анализ газовых проб проводят на газовом хроматографе (например, Chrom-5, Кристалл-2000 и др.) с использованием колонок, заполненных Porapak Q или с помощью ИК-газоанализаторов (например, LI-COR 820). Определение концентрации CO_2 во флаконах (или шприцах) желательно проводить в день отбора проб. Для введения газовых проб в хроматограф обычно используют инсулиновый шприц на 1 мл.

Для расчета интенсивности выделения CO_2 из почвы используют формулу (Panikov и Gorbenko, 1992; Kurganova et al., 2003):

$$\text{ЭМ}_{\text{CO}_2} = (C_2 - C_1) \times H / t \quad (8)$$

где ЭМ_{CO_2} — эмиссия CO_2 , мг С / м² час; C_2 и C_1 — конечная и начальная концентрации CO_2 внутри камеры-изолятора, мг С / м³; H — высота камеры-изолятора над поверхностью почвы, м; t — время экспозиции, час.

Для расчета скорости эмиссии CO_2 необходимо использовать линейный участок прироста концентрации CO_2 в камере-изоляторе. В теплую погоду и при достаточной влажности почвы, насыщение камеры диоксидом углерода может наступать очень быстро. В этом случае для расчета используют нулевую и первую точку отбора газовых проб.

Определение эмиссии CO_2 из почв в зимний период вызывает много сложностей, и поэтому были проведены специальные исследования по усовершенствованию методики отбора газовых проб в условиях морозной и снежной зимы. Так, например, использование в качестве камер врезанных в почву стеклянных сосудов, расположенных под снегом и снабженных выходящими наружу шлангами для отбора газовых проб, оказалось малоприменимым в зимних условиях. Из-за недостаточной вентиляции этих сосудов результаты по определению эмиссии CO_2 недостоверно отражали реальную скорость продуцирования углекислого газа почвами (Лопес де Гереню и др., 2001).

Предложенная нами модификация камерного метода, основанная на использовании врезанных в почву прямоугольных стальных или ПВХ оснований, высота которых наращивалась с ростом высоты снежного покрова, способствовала получению более достоверных результатов и позволила практически избежать нарушений снежного покрова и изменений в температурном режиме почвы во время замеров эмиссии CO_2 из почвы, которые имели место в первый год исследований, когда во время замеров снег над основаниями удаляли. Описанная выше процедура определения зимнего дыхания почв, безусловно, не безупречна и в какой-то мере искажает величину реальных потоков диоксида углерода из почв. Так, например, в конце зимы — начале весны в изолирующих основаниях

под слоем снега может происходить накопление льда, толщиной 5–7 см. Этот слой образовывается после продолжительных оттепелей и в сосудах-изоляторах он может быть настолько плотен и монолитен, что способен практически полностью перекрыть выход углекислому газу. В естественных условиях в снежном покрове подобные явления также имеют место, когда после оттепелей или ледяных дождей образуется довольно плотная корка льда на поверхности снега. Данный артефакт может привести к некоторому занижению реальных потоков диоксида углерода из почв. Еще более сложная ситуация складывалась с наступлением зимы в почвах агроценоза. После влажной осени почва может быть сильно переувлажнена, и на ее поверхности в изолирующих основаниях образуется слой воды 2–3 см. Насыщенная влагой тяжелосуглинистая почва с нарушенной структурой при промерзании превращается в единый льдистый монолит, препятствующий газообмену почвы с атмосферой. Это явление также может приводить к занижению реальных потоков углекислого газа из почв агроценозов в холодный период года. Реальная эмиссия CO_2 из пахотных почв в холодный период, по всей видимости, характеризуется более высокими значениями, поскольку в естественных условиях почвы агроценозов имеют лучший дренаж за счет неровностей рельефа, различных трещин и неоднородностей в почве (Лопес де Гереню и др., 2001).

Измерение потоков CO_2 в зимний период зачастую осложняется наличием высокого снежного покрова. Проблема заключается в том, что в течение зимнего периода содержание твердой фазы (льда) в снеге может изменяться в широких пределах: от 10 до 60 объемных процентов, хотя обычно находится в пределах от 15 до 35% об. Таким образом, если мы не учитываем при расчете скорости эмиссии CO_2 наличие снега, а он полностью заполнил камеру, неточность определения объема камеры, а значит, и скорости эмиссии углекислого газа может быть довольно существенной (15–35%). Чтобы избежать подобной ошибки при расчетах необходимо учитывать плотность и высоту снежного покрова в камере (она обычно ниже, чем уровень снега вне камеры). Для этого необходимо периодически брать пробы снега (керны на всю высоту покрова) и, либо взвешивать, либо плавить снег и определять объем талой воды. При

определении высоты снега в камере необходимо измерить расстояние от верхнего края камеры до снега четыре раза у стенок камеры и один раз в центре, так как снег в камере обычно имеет либо выпуклую (куполообразную), либо вогнутую поверхность. Эта процедура поможет избежать неточностей при оценке скорости эмиссии CO_2 при наличии высокого снежного покрова в камерах. Пример расчета объема воздуха в камерах со снегом приведен в Приложении (п.1, стр. 65).

Следует заключить, что описанный выше способ определения эмиссии CO_2 из почв не требует дорогостоящего оборудования, прошел многолетнюю апробацию для почв разной текстуры и разного землепользования, пригоден для измерений в круглогодичном режиме и позволяет получать качественные и сравнимые данные. Поскольку интенсивность выделения CO_2 из почв в разных регионах различается, то необходимо подбирать индивидуально оптимальное время экспозиции и интервал отбора газовых проб.

3.4. Метод закрытых камер с использованием инфракрасных газоанализаторов

Автоматические газоанализаторы фирмы LiCor (США)

При измерении эмиссии CO_2 из почв с помощью автоматического инфракрасного газоанализатора LI-COR 8100 (LI-COR Biosciences, США) используется открытая динамическая (принудительной продувки) камера. Компания производит камеры разного диаметра. Она учитывает такие факторы, влияющие на значения эмиссии CO_2 из почвы, как изменение давления внутри измерительной камеры при ее установке, способ перемешивания анализируемой воздушной смеси, рост концентрации CO_2 в камере и эффект растворения газа в водяном паре, влияние водяного пара на величину поглощения инфракрасного излучения в измерительной ячейке. Стационарные основания, на которые устанавливается камера газоанализатора, заранее врезают (обычно за сутки до измерения) в подстилку на глубину 2.5–5 см в 5-кратной повторности (рис. 8).

Местоположение оснований остается постоянным в течение всего сезона и в дальнейшем не меняется. Растительный покров в камерах в случае повторного прорастания срезают на уровне поверхности. Высоту

кольца, находящуюся над поверхностью почвы, в последующем указывают при настройке прибора, что необходимо для расчета объема камеры, в которой происходит измерение эмиссии CO_2 .



Рисунок 8. Использование автоматического инфракрасного газоанализатора LI-COR 8100 (LI-COR Biosciences, США) для определения эмиссии CO_2 из почв в динамических камерах с принудительной продувкой (ИБ Коми НЦ УрО РАН, г. Сыктывкар), Фото А.Ф. Осипова и М.А. Кузнецова.

На каждом основании делают от 3 до 5 циклов измерений скорости эмиссии CO_2 из почвы с последующим усреднением. Каждый цикл измерения состоит из двух фаз. Первая — это непосредственное измерение интенсивности эмиссии CO_2 с поверхности почвы продолжительностью 1.5–2 мин. Когда камера опущена, в ней происходит накопление диоксида углерода и ежесекундно определяется концентрации CO_2 . Далее на основании построенного программой графика прибор рассчитывает скорость выделения CO_2 из почвы (в $\mu\text{моль} / \text{м}^2 \text{сек}$). Согласно рекомендациям завода-изготовителя, продолжительность измерения от 1.5 до 2 мин. является достаточной для достоверной оценки скорости эмиссии CO_2 из почвы. Во время второй фазы, когда камера поднята, происходит её проветривание. Минимальная продолжительность проветривания при отсутствии сильных ветров на участке исследования, рекомендованная заводом-изготовителем, составляет 2 мин. Смена циклов измерения осуществляется в автоматическом режиме и задается настройками прибора перед началом работы. Температура и влажность почвы измеряются датчиками, которыми комплектуется газоанализатор, непосредственно возле оснований.

Также на объектах исследования проводится непрерывное измерение температуры почвы. По этим данным впоследствии моделируется динамика температуры почвы внутри каждого основания.

Для этой цели используется линейная модель зависимости между температурой почвы автономного регистратора (предиктор) и температурой почвы, измеренной газоанализатором во время определения эмиссии CO₂.

Для расчета величины потерь углерода в виде CO₂ с дыханием почвы в течение различных временных интервалов (месяц, лето, вегетационный период, бесснежный период) используются значения среднесуточной скорости эмиссии CO₂ с поверхности почвы, рассчитанные для каждой точки измерения потока CO₂ по смоделированным среднесуточным значениям температуры почвы как правило на глубине до 10 см, используя уравнение Вант-Гоффа:

$$SR_{period} = \sum_{n=1}^n R_{10} \times Q_{10}^{(T-10)/10} \quad (9)$$

где: Q_{10} — температурный коэффициент, показывающий степень увеличения эмиссии CO₂ из почвы при увеличении её температуры (T) на 10 °C, R_{10} — величина дыхания почвы при 10 °C.

Температурный коэффициент Q_{10} рассчитывается на основании данных измерений, проведенных за тот или иной период, используя коэффициент α из уравнения зависимости эмиссии CO₂ от температуры почвы (Davidson et al., 2006):

$$Q_{10} = e^{\alpha \times 10} \quad (10)$$

где: e — значение экспоненты, α — коэффициент уравнения зависимости эмиссии CO₂ от температуры почвы:

$$\ln (SR) = \alpha T + \beta \quad (11)$$

Величина референтного дыхания почвы при 10 °C рассчитывается по уравнению зависимости эмиссии CO₂ от температуры почвы:

$$R_{10} = Q_{10} \times \exp (\beta) \quad (12)$$

Анализаторы на основе прибора фирмы AZ Instrument (Тайвань)

В последние годы наиболее популярным становится использование портативного анализатора закрытого типа, созданного на основе серийного промышленного инфракрасного газоанализатора AZ7752 (AZ Instrument, Тайвань) с диапазоном измерения концентраций от 0 до 5000 ppm (частей на миллион), разрешением 1 ppm и погрешностью в рабочем диапазоне ± 30 ppm. Сенсор прибора AZ7752 вмонтирован в закрытую систему вместе с микропомпой мощностью до 2 л в минуту (напр. Hardgraves technologies, США). Анализатор работает в пределах от -10 до $+35$ °C, а с подогревом в корпусе в виде лампочки и с утеплителем он может работать при температуре до -30 °C. Емкости 12-вольтового аккумулятора (7 Ач) хватает на 24 ч автономной работы. При изготовлении прибора наибольшая сложность состоит в извлечении из AZ7752 собственно сенсора CO₂ и помещении его в небольшую герметичную камеру, обмен воздуха в которой с внешней средой осуществляется под действием помпы. Итоговый прибор относительно дешев и легок (2 кг), а разрешение его достаточно для оценки даже малых (зимних) потоков CO₂, что позволяет широко применять его в самых разнообразных полевых исследованиях эмиссии CO₂ из почв. К настоящему времени в научной литературе опубликовано достаточно много работ с результатами исследований, выполненных с применением данного прибора (Карелин и др., 2014; Mamai et al., 2018; Shorohova et al., 2020).

Измерительная система закрытого типа, представляет собой соединенные непроницаемыми для CO₂ шлангами анализатор и изолятор из ПВХ (рис. 9). Изолятор в рабочем режиме герметично вкопан в почву. Соединение с анализатором обеспечивается крышкой, через которую поток воздуха под действием помпы проходит через изолятор, поступая затем в анализатор (рис. 9).

На внутренней стороне крышки закреплен вентилятор для равномерного перемешивания воздуха во всём объеме изолятора. Опытным путем установлено, что время единичной экспозиции при измерениях потоков CO₂ должно составлять не менее 3 мин. Кроме того, используемые приборы на основе датчика AZ перед каждым циклом полевых измерений проходят обязательную автокалибровку по

окружающему воздуху (400 ppm) и предварительную однократную калибровку по высокоточному анализатору Li-COR 6200 (разрешение 0.1 ppm) в пределах наиболее часто отмечаемых концентраций CO₂ внутри изоляторов (от 400 до 1000 ppm). Помимо самого анализатора, крышки и набора изоляторов, в комплект поставки входит 12-вольтовое зарядное устройство. Сам аккумулятор встроен в корпус прибора. Описание основных операций управления прибором, включая калибровку, приведено в Приложении.



Рисунок 9. Модификация портативного анализатора закрытого типа, созданного на основе серийного промышленного инфракрасного сенсора AZ7752 тайваньского производителя AZ Instrument. Фото из (Карелин и др., 2015).

После установки камер-изоляторов на площадке включаются прибор и помпа. После запуска прибора и стабилизации значений концентрации CO₂ воздуха (дышать необходимо осторожно и не в сторону камер и прибора) помпа выключается, и затем крышка вставляется в базу. Далее следует включить помпу и ждать около 1–2 мин для установления равновесия в измерительной системе. В ходе этой процедуры необходимо визуально проверить герметичность системы. Если по истечении минуты по показаниям прибора концентрация CO₂ внутри системы начала равномерно и без скачков расти, то в полевой дневник нужно записать значение концентрации в нулевой момент времени, одновременно запустив секундомер. Значения концентрации CO₂ необходимо записывать ровно через каждые 60 секунд в течение 4–5 минут. После окончания измерения крышка снимается с камеры с включенной помпой, система

прибора с шлангами проветривается. Затем вся процедура повторяется на других камерах.

Необходимо (и очень важно!) измерить и записать высоту каждой камеры-изолятора, чтобы рассчитать объем измерительной камеры. Несмотря на то, что приборы обладают встроенной памятью, данные всех измерений рекомендуется сразу заносить в таблицу, не полагаясь на электронную память приборов. После целого дня измерений часто бывает трудно согласовать данные, сохраненные в приборах.

Расчет скорости выделения CO_2 из почвы основан на использовании уравнения Менделеева-Клапейрона (Карелин и др., 2015):

$$\text{ЭМ}_{\text{CO}_2}^* = \frac{0.001 \times V \times \Delta C}{0.0821 \times (273 + T)} \quad (13)$$

где: $\text{ЭМ}_{\text{CO}_2}^*$ — величина эмиссии CO_2 за все время экспозиции, мкмоль С; V — объем камеры, см^3 ; ΔC — изменение концентрации в камере за время экспозиции, ppm; T — средняя температура воздуха в камере во время измерений, $^{\circ}\text{C}$.

Необходимо учитывать, что в объем камеры входит как собственно измеряемый объем воздуха в изоляторе между крышкой и поверхностью почвы, так и объем измерительной системы, включая шланги, микропомпу и камеру с сенсором.

Для пересчета эмиссии CO_2 в общепринятые единицы измерения ($\text{г С} / \text{м}^2 \text{ час}$) применяется формула (12):

$$\text{ЭМ}_{\text{CO}_2} = \frac{12 \times 6 \times \text{ЭМ}_{\text{CO}_2}^*}{10 \times \tau \times S} \quad (14)$$

где ЭМ_{CO_2} — величина эмиссии CO_2 из почвы, $\text{г С} / \text{м}^2 \text{ час}$; τ — время экспозиции, мин; S — площадь основания камеры, см^2 .

Для того, чтобы рассчитать суммарную величину эмиссии CO_2 за сутки ($\text{г С} / \text{м}^2 \text{ сутки}$), полученные значения необходимо умножить на 24. Величину среднемесячной скорости почвенного дыхания ($\text{г С} / \text{м}^2 \text{ сутки}$) вычисляют как среднее арифметическое из всех измерений, проведенных в течение месяца.

Сравнение разных формул расчета скорости эмиссии CO₂ из почв

Сотрудники ИЛ КарНЦ РАН на примере измерения эмиссии CO₂ с поверхности валёжных стволов, сравнили результаты вычислений, проведенных с помощью формулы (13) и приведенной выше более простой формулы (8), и показали, что величины эмиссии CO₂, рассчитанные по формуле (13), были на 5–6% ниже, чем значения, полученные с использованием формулы (8), что существенно перекрывает величины как пространственной, так и временной вариабельности измеряемого параметра. Различия в величине скорости эмиссии CO₂, оцененных с использованием этих формул, будут зависеть от давления и температуры воздуха, при которых проводили измерения. Диаграмма ошибок (%) скоростей эмиссии CO₂, рассчитанных по формуле без поправки на температуру и давление окружающей среды по отношению к скорости эмиссии CO₂ с учётом температуры и давления приведена в Приложении (п. 2, стр. 66). Мы считаем, что предпочтительнее использовать формулу (13), но если по каким-то причинам нет возможности определить T воздуха внутри камеры во время измерений, то использование формулы (8) является вполне допустимым.

Оценка сезонных величин эмиссии CO₂ из почв при невысокой частоте измерений.

При значительной удаленности площадок наблюдений от лабораторий и институтов и невозможности проводить полевые измерения эмиссии CO₂ из почв чаще 1–2 раз в месяц, расчеты суммарной эмиссии CO₂ из почвы за летний/вегетационный (или годовой) период обычно проводятся с помощью т.н. метода трапеций (Karelin and Sukhoveeva, 2021) (Karelin, Sukhoveeva, 2022). Расчет за весь интересующий период наблюдений проводится:

$$SR_{tot} = \sum_{i=0}^{n-1} \frac{SR(x_i) + SR(x_{i+1})}{2} (x_{i+1} - x_i) \quad (15)$$

где SR_{tot} — суммарная эмиссия за период наблюдений (0 — n), $SR(x_i)$ — среднесуточная скорость эмиссии в первую дату наблюдений x_i , $SR(x_{i+1})$ — среднесуточная скорость эмиссии в следующую дату наблюдений x_{i+1} , $j = 0...n$ — даты наблюдений.

Метод позволяет учесть неравномерность временной сетки измерений в ходе сезона, что особенно актуально при относительно редких внутригодовых наблюдениях (1–2 раза в месяц). Пример такого расчета, выполненных на основе измерений, проведенных 1 раз в месяц представлен в таблице 1:

Таблица 1. Пример применения метода «трапеции» для расчета суммарной сезонной эмиссии CO₂ из почв.

| Дата измерений | Значение дыхания почвы, г С / м ² ч | Число дней между последовательными измерениями |
|----------------|--|--|
| 9 апреля | 0.10 | - |
| 5 мая | 0.15 | 26 |
| 7 июня | 0.20 | 33 |
| 11 июля | 0.22 | 34 |
| 8 августа | 0.14 | 28 |
| 10 сентября | 0.11 | 33 |
| 10 октября | 0.08 | 30 |

В этом случае, с учетом необходимости пересчета потоков за час в сутки, оценкой суммарной эмиссии CO₂ за период с 9 апреля по 10 октября (184 сут) будет:

$$SR_{tot} = 24 \left[\left(\frac{0.10+0.15}{2} \right) 26 + \left(\frac{0.15+0.20}{2} \right) 33 + \left(\frac{0.20+0.22}{2} \right) 34 + \left(\frac{0.22+0.14}{2} \right) 28 + \left(\frac{0.14+0.11}{2} \right) 33 + \left(\frac{0.11+0.08}{2} \right) 30 \right] = 676.3 \text{ г С / м}^2 \quad (16)$$

Однако, если в данном примере полной продолжительностью вегетационного сезона считается период с 1 апреля до 31 октября, то можно экстраполировать полученную оценку эмиссии на весь этот период (213 сут). В этом случае получаем: $676.3 / 184 \times 213 = 782.9 \text{ г С / м}^2$. Подчеркнем, что такая экстраполяция допустима только если в начальный

и конечный месяцы периода наблюдений было выполнено хотя бы по одному измерению.

Очевидно, что при равномерной сетке суточных оценок, среднее значение эмиссии за весь период наблюдений просто умножается на его продолжительность в сутках.

Некоторые полезные советы

Старайтесь во время подготовки к измерениям не выдыхать воздух в сторону прибора или открытого изолятора и не курить: это может помешать измерениям и даже повредить датчик анализатора. При установке крышки не стоит одновременно разговаривать с коллегами, которые могут находиться рядом. Это может привести к попаданию активно выдыхаемого вами CO_2 в камеру и зависить его концентрацию в начале измерений. Во время измерений ни в коем случае нельзя ходить или «топтаться» около базы: это может искусственно усилить поток CO_2 из почвы. Вообще надо помнить, что измерение эмиссии — процесс достаточно деликатный и не терпит небрежности, невнимательности или болтовни. Прежде чем начать первое в данный день измерение, прибор следует хорошо прогреть. Для этого нужно включить прибор (без помпы) при наружных условиях и подождать около получаса. Только затем можно начинать работу. Если в процессе измерений приходится сделать технический перерыв, то лучше прибор не выключать и оставить его снаружи. Важно знать, что у любого полевого прибора в ходе работы происходит т.н. «дрейф нуля», т.е. электронное смещение показаний относительно реальной концентрации CO_2 . Это устраняется периодической калибровкой анализатора. Как отмечалось выше, калибровка приборов на базе газоанализатора AZ производится по окружающему хорошо перемешиваемому ветром воздуху снаружи помещений. Предполагается, что концентрация CO_2 в таком воздухе составляет 400 ppm. Ежедневная калибровка обязательна перед самым началом измерений, после прогрева прибора. Очень важно начать измерения при полностью заряженном аккумуляторе и постоянно проверять его заряд в ходе работы. Дело в том, что при недостаточном напряжении прибор может еще продолжать работать, но показания его могут быть искажены. Обычно проверяется это так: если при открытой в

воздух крышке и включенной помпе прибор несколько минут показывает любые более или менее устойчивые концентрации (± 5 ppm) в диапазоне между 360 и 420 ppm, то можно считать, что всё в порядке. Наибольшего расхода энергии требует воздушная помпа, поэтому ее следует включать только во время измерения концентрации. Возможен экономичный режим измерений, при котором помпу включают только в момент установки концентрации в нулевой момент, затем выключают и снова включают через 2.5 мин от начала экспозиции (т. е. за 30 сек до конца экспозиции). Но всё же лучше не выключать помпу во время всех 3 мин измерения. Второй вариант лучше использовать, если из-за небольшой эмиссии экспозиция вынужденно увеличена до 6 мин и более.

4. ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ЭМИССИИ CO_2 ИЗ ПОЧВ В РАЗЛИЧНЫХ ЭКОСИСТЕМАХ (БОЛОТНЫЕ, ТУНДРОВЫЕ, ЛЕСНЫЕ, СТЕПНЫЕ, ЛУГОВЫЕ, АГРОЦЕНОЗЫ)

4.1. Рекомендации к методике проведения наблюдений за эмиссией CO_2/CH_4 в болотных экосистемах

Учитывая гидроморфный характер торфяных почв и плотность торфов на пробных площадях необходимо снизить риск возможного физического вытеснения газа из торфа, вызванного давлением на грунт наблюдателем или прибором, а также кольцом (основанием) ограничителем. Снизить риски случайного выхода газа высокой концентрации возможно:

а) заранее, минимум за неделю до первого наблюдения, установив кольцо-основание в торф на глубину не менее 25 см. Так основание будет более устойчивым и статичным. Высоту кольца желательно подбирать не менее 30 см, в зависимости от видового состава фитоценозов пробных участков. В присутствии хвощей и осок высота кольца может увеличиться до 50–70 см. Кольцо изготавливают из инертных материалов (оргстекло, ПВХ), исключая металлы, окислы которых или оцинкованное покрытие в кислых водах болот способны оказывать сильный токсический эффект на мхи;

б) заранее выстроив на выбранных пробных участках дощатые стационарные площадки на сваях из доски или бруса (рис.10). Сваи необходимо углублять в торфяную залежь на 1.5 м. Так площадка будет устойчивой и эффективной при распределении веса наблюдателя и приборов на торф.



Рисунок 10. Измерения эмиссии CO_2 из почв болотных экосистем. Фото М. Миловца (ИБ Коми НЦ УрО РАН, г. Сыктывкар).



Рисунок 11. Измерение эмиссии CO_2 из почв пятнистой тундры с привязкой к криогенной структуре: пятно-медальон и между пятнами (слева, фото О.Ю. Гончаровой) и измерение глубины протаивания мерзлоты на площадке в Восточной Чукотке (справа, из Карелин, Замолодчиков, 2008).

Камеры устанавливают между травянистыми растениями (при необходимости зеленые части травы необходимо срезать). Опад и лесная подстилка не удаляются.

4.2. Рекомендации к методике проведения наблюдений за эмиссией CO_2/CH_4 в тундровых экосистемах

Ландшафты и почвы северотаежных лесов, лесотундры, тундры практически всегда характеризуются наличием современного или реликтового криогенного рельефа, формирующегося под влиянием многолетнемерзлых пород: реликтовый бугристо-западинный, современные бугры и площади пучения, мелкополигональные формы, структурные формы (пятна-медальоны, каменные кольца, торфяные пятна и т.д.), термоэрозионные формы и другие (Матышак и др., 2017). Наличие данного рельефа приводит к формированию высокой неоднородности почвенного и растительного покровов и, как следствие, пространственной неоднородности эмиссионных потоков парниковых газов с поверхности почвы (Бобрик и др., 2017). Основной рекомендацией при исследовании потоков парниковых газов в подобных регионах является учет криогенной неоднородности при выборе площадок наблюдений и достаточном числе повторностей. Камеры следует устанавливать в зависимости от

криогенной структуры: пятно/между пятен, полигон/между полигонами и т.д. (рис. 11, 12).



Рисунок 12. Организация места стационарных длительных исследований эмиссии CO_2 на участке плоскобугристого торфяника. На освобожденном от мохово-лишайникового покрова участке врезаются желоба основания для установки камер, проводится мониторинг температуры и влажности верхнего слоя почв.

Некоторые исследователи при определении эмиссии CO_2 с поверхности почвы предварительно удаляют живые (обладающие дыхательной активностью) части мха и лишайника. Поскольку некоторые погодные условия (сильный ветер, ливневые осадки) могут оказывать существенное влияние на величину эмиссии CO_2 в дневнике наблюдений необходимо отмечать особенности погодных условий в момент измерения.

В северных условиях из-за низких температур метод адсорбции нежелателен, при использовании камерного метода и ИК-газоанализаторов необходима корректировка времени экспозиции и интервала отбора газовых проб (проведения замеров).

Суточная динамика эмиссии CO_2 , согласно исследованиям, проведенным в Надымском районе, для тундровых экосистем выражена, но слабо (неопубликованные данные). Минимальная эмиссия наблюдается в ночные и раннеутренние часы, максимальная — в вечерние, что соответствует суточному ходу температур. Средние величины наблюдались в середине дня. Для северотаежных лесных экосистем в

целом картина схожая, исключая то обстоятельство, что минимальные и максимальные величины суточной эмиссии не совпадают с соответствующими температурами почвы из-за активизации корневого дыхания в утренние часы. Поэтому среднесуточные величины почвенного дыхания в лесных экосистемах приходятся на 10–11 часов утра.

Существует и другой подход, при котором, напротив, мохово-лишайниковый слой оставляют нетронутым, и его дыхание входит таким образом в суммарное дыхание почвы (Karelin et al., 2021). Это связано с тем что удаление мохово-лишайникового слоя может вызывать серьезные нарушения поверхности почвы, т.к. полностью отделить мхи от частиц почвы практически невозможно. Тундры же представляют собой, прежде всего, "царство мхов". Кустистые лишайники (напр. виды кладонии), в отдельных случаях действительно представляют собой легко отделяемую массу, но накипные и листоватые формы без повреждения поверхностного слоя почвы удалить практически невозможно. В целом, биомасса мхов в тундрах на порядок превосходит биомассу лишайников (Карелин и Замолотчиков, 2008). Кроме того, например, для сфагнумов непонятно где проходит граница надземной и подземной частей. Такая же проблема встречается в таежных лесах, когда сложно без повреждений отделить моховый слой.

Важным методическим моментом при организации любых измерений в тундрах (как и в болотных экосистемах), является минимизация нарушений от вытаптывания. Это в значительной степени относится к тем полевым исследованиям, где в одних точках выполнение измерений эмиссии CO_2 проводят многократно (напр., суточные или регулярные сезонные измерения). В этом случае следует установить металлические, пластиковые или деревянные мостки при переходах от одной точки к другой, навешенные на сваях, если измерения проводятся ежедневно (рис. 10), или проложить доски на горизонтальных брусках-подпорках, если измерения проводятся не чаще чем 1 раз в неделю (рис. 13).

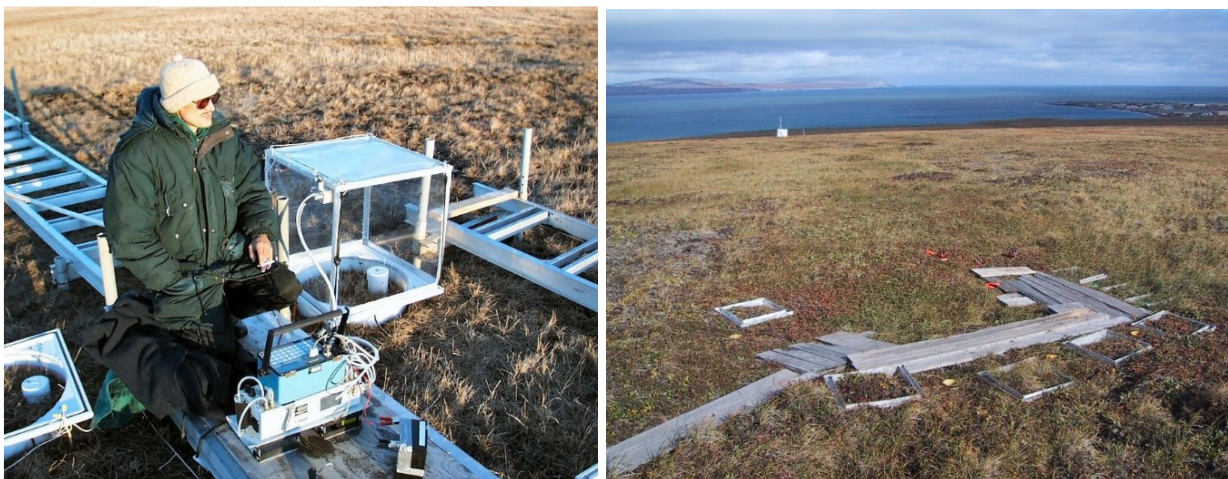


Рисунок 13. Круглосуточные измерения потоков CO_2 на подвешенных алюминиевых мостках с деревянными панелями (северный склон Аляски; из Карелин, Замолотчиков, 2008). Прокладка постоянных мостков между точками измерений потоков CO_2 (Восточная Чукотка; из Карелин, Замолотчиков, 2008)

В качестве сопутствующих показателей (потенциальных факторов) эмиссии CO_2 из тундровых почв, рекомендуется также оценивать мощность активного слоя многолетней мерзлоты (максимальное сезонное протаивание, или расстояние до верхней кровли мерзлоты, в см) в точках измерений. В большинстве случаев это можно осуществить с помощью металлического щупа длиной 2 м и толщиной не менее 1.5 см (чтобы избежать его загибания в почве) (рис. 11). Кроме того, важными факторами могут выступать: мощность мохово-лишайникового слоя (в см), и расстояние между поверхностью почвы и верховодкой¹ (см).

4.3. Рекомендации к методике проведения наблюдений за эмиссией CO_2 в лесных экосистемах

В лесных экосистемах большое влияние на измеряемые величины эмиссии CO_2 из почвы будет оказывать расположение камер в зависимости от удаленности от ствола дерева, т.е. их инсталляция в пристволовой, кроновой или межкроновой частях (рис. 14). В разных частях кронового пространства могут различаться мощность подстилки и насыщенность почвы корнями растений, как древесных, так и травянистого яруса. Кроме

¹ Уровень верховодки в тундрах – это накопленный слой воды в почве, который подпирается верхней кровлей мерзлоты. Оценивается обычно визуально, с помощью рулетки, в узких лунках в почве, которые можно проделать мерзлотным щупом

того, может существенно отличаться и гидротермические условия. Так, например, межкроновые пространства могут сильнее прогреваться. Поэтому, при размещении камер желательно учитывать эти особенности и установить не менее, чем по 2 камеры в каждой из частей кронового пространства, чтобы полученное среднее значение максимально полно отражало все разнообразие условий на площадке наблюдений в лесном ценозе.

Исследования, проведенные в ИЛ Кар НЦ РАН, показали, что в зависимости от сочетания погодных условий и сезонной динамики потоков CO_2 из почвы в сосняке брусничном годовые эмиссии в разных зонах фитогенного поля дерева могли различаться в 1.5 раза (Мошкина и др., 2022).



Рисунок 14. Установка измерительных камер в разных зонах фитогенного поля дерева в сосняке брусничном. Фото Е. Мошкиной, А. Мамай (ИЛ Кар НЦ РАН, г. Петрозаводск)

В качестве альтернативы камеры можно размещать на границе проекции кроны на поверхность почвы, где максимальная насыщенность лесной подстилки физиологически активными тонкими корнями (Творожникова, 2009), тогда как в пристволовой части, где сосредоточены крупные скелетные корни, установка камер может быть затруднена.

Также необходимо учитывать разнообразие растений живого напочвенного покрова. Рекомендуется выделить доминантные растительные микрогруппировки с целью установки в них измерительных камер. Помимо этого, перед выбором места для камер нужно провести обследование территории пробной площади на предмет артефактов. Следует подбирать выровненные участки без ям, нор, валунов, поросших

мхом. С осторожностью относиться к ксилофитному субстрату. Если задача исследования состоит в оценке дыхания почвы, то валежные стволы поздних стадий разложения нужно обходить, как и ветровальные комплексы в целом.

Особое внимание нужно уделить регламенту установки измерительных камер, так как при недостаточном времени для стабилизации потока CO_2 после механического нарушения целостности верхнего горизонта почв, полученные данные по CO_2 -эмиссионной активности почв могут быть существенно завышены. Мы советуем устанавливать камеры накануне измерений или за 2–3 часа до их начала. Основание камер рекомендовано заглублять в минеральную толщу почвы. Если лесная подстилка мощная, необходимо использовать почвенный нож-пилу или оснащать камеры заточенными металлическими основаниями, способными разрезать корни кустарничков (рис. 15).



Рисунок 15. Доминирующие микрогруппировки напочвенного покрова в сосняке брусничном. Фото Е. Мошкиной, А. Мамай (ИЛ Кар НЦ РАН, г. Петрозаводск)

Для сокращения времени регулярных измерений потоков CO_2 , установленные камеры можно оставить на том же месте. Это особенно удобно если ведется оценка вклада корневого и микробного дыхания в общий поток CO_2 из почвы и камеры без корней стоят стационарно. Камерам присваивают порядковые номера (рис. 14), ничем не накрывают, но при последующих замерах необходимо следить за тем, чтобы камеры были плотно заглублены в почву. При необходимости нужно переставить измерительные камеры повторно.

4.4. Рекомендации к методике проведения наблюдений за эмиссией CO₂ в луговых и степных экосистемах

В луговых и степных экосистемах высокое проективное покрытие обычно не позволяет устанавливать камеры-изоляторы на открытые участки почвы между растениями, как это делают в лесных экосистемах или агроценозах. Поэтому для определения эмиссии CO₂ из почвы с тех мест, куда планируется установка камер, срезают надземную часть растений как можно ближе к поверхности почвы, но не более, чем на высоте 1 см. Срезку растений удобнее производить медицинскими ножницами с изогнутыми лезвиями и длинными браншами. В этом случае следует помнить, что желательно провести измерения как можно быстрее после срезки растений в основаниях изоляторов (не более 1 часа), чтобы избежать компенсаторного эффекта, который заключается в усилении дыхания корней и оставшейся после срезки надземной части. При размещении камер также желательно охватить разные по составу растений или по микро- и нанорельефу участки, чтобы наиболее полно отразить все разнообразие растительных ассоциаций в пределах экосистемы. Особенно это касается сухих степей, где часто формируются почвенно-растительные комплексы из микроповышений и микропонижений, для которых показатели эмиссии и сопутствующие показатели почвы могут различаться, поэтому следует устанавливать основания адресно и репрезентативно.

Почва степных экосистем может быть очень плотной, особенно в летний период на черноземах, серых и каштановых почвах, что может вызвать проблемы, как с установкой оснований для изоляторов, так и с измерениями влажности и температуры почвы в слое 0–5(10) см. В этом случае вкапывать основания можно обычным способом (с помощью почвенного ножа, но на глубину не более 3–4 см²), а датчики температуры почвы — предварительно пробивая под них отверстия в почве металлическим стержнем, с тем же или меньшим диаметром, на глубину

² Это является общей рекомендацией при любом вкапывании оснований для изоляторов. Превышение глубины вкапывания более 4 см приводит, как правило, к усилению эмиссии (Меняйло и др., 2015), вероятно за счет травмирования тонких корней и ударной десорбции газа с твердых частиц почвы

10 см. Что касается временной установки датчика влажности (обычно это делают внутри каждого из оснований или рядом с ними сразу после измерения эмиссии), то последний способ здесь не подходит, поскольку величина объемной влажности почвы, оцениваемая с помощью полевых приборов, измеряющих диэлектрическую проницаемость почвенной среды, зависит от плотности почвы и плотности контакта электродов датчика с почвой. При прочих равных условиях в рыхлой почве в единице объема содержится меньше воды, чем в плотной, что и оценивает прибор. Поэтому если предварительно проделать в плотной почве отверстия под электроды датчика, то это занижит показатели объемной влажности. В таком случае лучше не измерять влажность, чтобы не повредить датчик, или оценивать ее другими способами (через постоянное измерение влажности заранее установленными датчиками, или общепринятым гравиметрическим методом, отбирая пробы почвы).

В сухих степях на каштановых почвах, и в полупустынях, плотность почвы в любой бесснежный период года может быть настолько высокой, что это может потребовать применения особого метода герметизации камеры при ее установке на поверхность. Для этого можно использовать песок (если он есть поблизости) или гигроскопичную ткань. В первом случае основание перед измерением плотно присыпается песком по наружному периметру поставленного на поверхность почвы основания камеры. Гигроскопичная ткань насыщается водой, хорошо отжимается и ее плотно прокладывают по внешнему периметру основания камеры, герметизируя т.о. щель между основанием камеры и почвой. Однако в последнем случае это надо делать очень аккуратно, стараясь чтобы вода не попала внутрь камеры и не вызвала т.н. эффект Бирча³. Поэтому такой способ лучше использовать в холодный период, или на относительно влажной почве. Другим способом является использование шуруповерта и круглой насадки под размер основания камеры (рис. 16).

³ «Эффект Бирча» – временное, но мощное усиление эмиссии CO₂ из почвы в результате ее увлажнения после длительной засухи. Подробнее о механизмах, лежащих в основе этого эффекта см. Unger et al 2010.

В жаркую погоду, чтобы избежать нагрева камер при измерениях увеличения температуры воздуха внутри них, необходимо проводить затенение камер. При небольших экспозициях защиту приборов и камеры от солнца может дать обычный зонт (рис. 17).

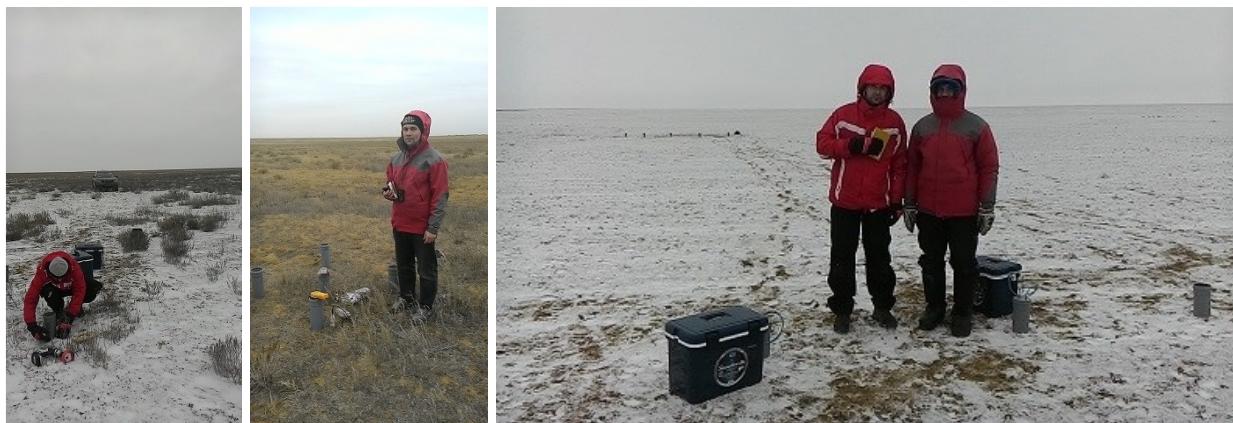


Рисунок 16. Во время зимних измерений в сухих степях, камеры в твердую почву удастся установить иногда только с помощью шуруповерта и круглой пилообразной насадки (слева). Измерения на участке сухой степи с помощью накладного варианта анализатора AZ7752 (среднее фото). Зимние измерения эмиссии в сухой степи на каштановых почвах. Анализаторы находятся в специальных термоконтейнерах (на переднем плане) — фото справа (Астраханская обл., фото Д.В. Карелина, ИГ РАН).



Рисунок 17. Участок луговой степи и измерения с использованием зонта для затенения (Курская обл.; фото Д.В. Карелина, ИГ РАН).

4.5. Рекомендации к методике проведения наблюдений за эмиссией CO₂ в агроценозах и объектах животноводства

Агроценозы обычно не имеют сплошного проективного покрытия за исключением посевов однолетних или многолетних трав. Поэтому, как правило, не составляет труда установить камеры-изоляторы в пространстве между растениями, не срезая последние. Из-за существенно более слабой защищенности поверхности почвы от солнца, особенно на парующих участках, необходимо камеры-изоляторы затенять во избежание сильного нагрева и искажения результатов (рис. 18). Если вы одновременно проводите измерение эмиссии CO₂ из почв на нескольких площадках в солнечный день, то начинать измерения лучше с агроценозов, чтобы избежать большой разницы в температуре проведения измерений. Сказанное применимо к любым экосистемам с низким растительным пологом. Например, в подзоне лесостепи измерения лучше проводить в следующей последовательности: агроэкосистемы — залежи — степи и лесостепи — леса. При этом, среди самих агроэкосистем существует большое разнообразие. Например, парующие участки, где растения почти отсутствуют, следует измерять первыми.



Рисунок 18. Общий вид агроценозов: пар текущего года (слева) и посев зерновых (середина). Экранирование оснований камер от солнца при измерениях эмиссии CO₂ из почв агроценозов (справа). Фото В.О. Лопес де Гереню (ИФХиБПП РАН, г. Пущино).

Даже в агроэкосистемах существует закономерная микропространственная гетерогенность, которая заключается в наличии рядов и междурядий. Поэтому в посевах широкорядных культур (кукуруза, подсолнечник, сахарная свекла, картофель) половину оснований камер следует устанавливать в междурядьях, а половину — в рядках (рис. 19).



Рисунок 19. Слева — измерения эмиссии CO_2 на сильно деградированном конском пастбище (газоанализатор на основе тестера AZ7752; Тульская область, сентябрь 2021, фото Д.В. Карелина, ИГ РАН). Середина — измерения эмиссии CO_2 в посадках кукурузы (Курская обл., июль 2017; фото А.В. Кудикова, ИГ РАН). Справа — измерения эмиссии CO_2 в посадках озимой пшеницы с помощью газоанализатора Li-8100 и его штатной почвенной камеры (апрель 2018; Курская обл.; фото Д.В. Карелина, ИГ РАН).

В агроэкосистемах обычно не удается установить постоянные основания на весь сезон, и они вкапываются каждый раз заново, поэтому не следует забывать о времени предварительного ожидания перед началом измерений после вкапывания. В идеале рекомендуемое время ожидания для большинства почв составляет, как минимум 1 сутки, но в реальных условиях, особенно в агроэкосистемах, это сложно соблюсти из-за труднопредсказуемых сроков обработки почвы или растений, а также прав собственности на поля. Поэтому сроки предварительной установки иногда сокращаются здесь до 1 часа. Это минимально допустимый срок ожидания после вкапывания оснований, чтобы избежать завышенной эмиссии.

Пашни — это особые биотопы, отличающиеся от всех наземных экосистем тем, что на них в ходе одного сезона происходят быстрые изменения структуры и запасов растительной биомассы в ходе ее роста, а кроме того на них регулярно проводятся агротехнические мероприятия, связанные со вспашкой, культивацией, севом, внесением удобрений, опрыскиванием пестицидами, поливом, уборкой и т.д. Это требует от исследователя, выполняющего измерение эмиссии CO_2 из почвы, постоянного контроля за состоянием поля. Каждое из этих событий влияет на величину эмиссии, как правило, в сторону ее временного усиления (но

часто и последующего спада), что желательно зафиксировать измерениями.

Пастбища, как и степи, характеризуются очень плотной почвой в результате постоянного вытаптывания скотом. Здесь одновременно присутствуют два негативных фактора, затрудняющие измерения эмиссии CO_2 — высокая плотность почвы и постоянное сбивание скотом установленных оснований. В первом случае, после вкапывания в плотный грунт, требуется более значительное предварительное время ожидания. Второй фактор требует защиты установленных оснований (изоляторов) от скота, например, с помощью покрытия их колючими ветками, камнями или другим доступным способом. Положительным для исследователя моментом является то, что растения на участке выпаса обычно уже «срезаны» скотом. На пастбищах на поверхности почвы также встречается достаточно много неразложившихся экскрементов выпасаемых животных (иногда до 10% проективного покрытия). В принципе, участки почвы, покрытые экскрементами, также должны оцениваться.

Еще одним своеобразным животноводческим объектом являются загоны для животных. Здесь растительный покров полностью отсутствует, высока плотность почвы и содержание в ней органических веществ, а также существенно больше как сама эмиссия, так и ее пространственная вариабельность, что следует учитывать путем большего количества установленных оснований и меньшей экспозиции. Еще более значительное уменьшение экспозиции и увеличение числа камер необходимо на компостных хранилищах открытого типа. В этом случае потоки эмиссии могут превышать природный фон на два порядка, и нередко предельная измеряемая анализатором концентрация CO_2 достигается уже через 1 мин.

5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МИКРОБНОЙ КОМПОНЕНТЫ В ОБЩЕМ ЭМИССИОННОМ ПОТОКЕ CO₂ ИЗ ПОЧВ

Чаще всего в полевых условиях эмиссионный поток CO₂ из почвы представляет собой суммарный показатель, характеризующий 1) дыхание микроорганизмов (МД), осуществляющих процесс разложения собственно органического вещества почвы, включая подстилку, и 2) дыхание корней и ризосферных микроорганизмов. Вклад живых корней и ризосферных микроорганизмов в общую эмиссию CO₂ из почвы не является стабильной величиной, а изменяется в широких пределах — от 5 до 95% в зависимости от периода вегетации растений, типа растительности и сезона года (Курганова, 2010; Kurganova et al., 2003; Kuzyakov and Larionova, 2006). Без учета доли микробного потока в общей эмиссии CO₂ из почв, оценка баланса С в экосистеме невозможна. Поэтому для всех инструментальных методов вычленение дыхания корней и ризосферной микрофлоры из общего потока выделяющегося из почвы CO₂ является насущной, но пока трудно решаемой задачей.

Определение вклада корневого и микробного дыхания в общий поток углекислого газа с поверхности почвы является крайне сложной задачей. Если определение доли микробного дыхания в общем эмиссионном потоке CO₂ из почв не планируется, то ее условно принимают равной 1/2 или 2/3 от общего потока CO₂ из почв в течение вегетационного сезона (май — октябрь) (Kudeyarov and Kurganova, 2005; Larionova et al., 2003). В холодный период года (ноябрь — апрель) доля дыхания микроорганизмов в общем годовом дыхании почв будет существенно выше и ее можно принять равной 90% (Larionova et al., 2003).

Для оценки вклада корней в общий эмиссионный поток CO₂ из почв в полевых условиях предлагаем использовать метод удаления корней, как наиболее простой доступный и позволяющий вести круглогодичные наблюдения. С этой целью наряду с ПВХ камерами изоляторами для определения общей эмиссии CO₂ из почвы, параллельно устанавливают такое же количество камер диаметром 11 см и высотой 40 см, которые предназначены для измерения микробного потока CO₂ из почв. Для этого почву внутри камер, предназначенных для измерения микробного

дыхания, изымают с помощью трубы идентичного размера, освобождают ее от корней, просеивая на сите с диаметром отверстий 3 мм (рис. 20).

Однако, метод исключения корней в предложенной модификации (отбор корней) для тундровых экосистем представляется неприемлемым. В опубликованной работе (Гончарова и др., 2019) представлены результаты пятилетней работы по разработке методических подходов к оценке величины корневого и микробного дыхания для северотаежных и тундровых экосистем. При сравнимых почвенных характеристиках (запасы органического вещества, запасы корневой биомассы) представляется возможным использовать представленные в статье цифры для оценки вклада корней в общее почвенное дыхание.



Рисунок 20. Определение микробной компоненты в общем эмиссионном потоке CO_2 из почв лугового ценоза. Фото В.О. Лопес де Гереню (ИФХиБПП РАН, г. Пущино).

Процедуру просеивания с аккуратным извлечением корней проводят послойно через каждые 2 см и чтобы не нарушить чередование горизонтов просеянные слои укладывают в камеру-изолятор. Начало измерений скорости микробного дыхания после завершения подготовительных процедур можно начинать не ранее, чем через 2 недели. Затем определение потоков CO_2 проводят параллельно в камерах с корнями и без

корней с помощью полевых портативных инфракрасных газоанализаторов или любым другим способом, описанным выше.

Долю, которая приходится на дыхание корней (ДК) в общем эмиссионном потоке CO_2 из почв, определяют как разность между потоками углекислого газа из почвы с корнями (ЭМ_{CO_2}) и без корней (МД) и отнесенную к ЭМ_{CO_2} (Bahn et al., 2006; Kuzyakov and Larionova, 2006):

$$\text{ДК} = \frac{\text{ЭМ}_{\text{CO}_2} - \text{МД}}{\text{ЭМ}_{\text{CO}_2}} \quad (18)$$

6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОПУТСТВУЮЩИХ ГИДРОТЕРМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЧВЫ

Температура и влажность почвы являются основными факторами, определяющими временную изменчивость почвенной эмиссии CO_2 на каждой отдельно взятой площадке наблюдений. Заметные вариации температуры почвы отмечаются не только на сезонном уровне, но и в течение суток. Поэтому при каждом измерении эмиссии CO_2 необходимо контролировать температуры почвы в верхнем слое при помощи электронных термометров (например, фирмы Hanna Instruments). Наиболее принятой в международной практике глубина измерения температуры почвы является 5 см. Еще одним важным дополнительным параметром, который необходимо контролировать во время проведения замеров эмиссии CO_2 из почв, является температура воздуха. Ее можно измеряться с помощью тех же приборов, что и температуру почвы. Важно только, чтобы температурный датчик находился в тени, если измерения проводятся в солнечный день.

Во время определения эмиссии CO_2 из почв также необходимо контролировать влажность верхних горизонтов почв (минимум 0–5 см). Для этого в бюксы отбирают почву и затем в лаборатории влажность почвы определяют весовым методом. В последние годы стали популярными автоматические влагомеры, позволяющие определять объемную влажность почв. В зимний период необходимо фиксировать также высоту и продолжительность снежного покрова.

Для более глубокого анализа данных по определению почвенной эмиссии CO_2 и оценки температурных коэффициентов Q_{10} , температуру почвы рекомендуем измерять также на глубинах 1 см (поверхность), 5, 10 и 20 см. Для этого в настоящее время наибольшую популярность приобрели температурные логгеры (Ibutton, США), позволяющие непрерывно определять температуру почвы и приземного слоя воздуха с периодичностью 4–6 раз в сутки. Получаемые с помощью логгеров ряды данных позволяют оценивать суточные, сезонные и многолетние изменения температуры почвы на разных глубинах, определять глубину и продолжительность промерзания почв.

7. ПОДХОДЫ К ОЦЕНКЕ ГОДОВЫХ ПОТОКОВ CO₂ ИЗ ПОЧВ

Подход 1 основан на оценке доли летнего периода в общем годовом потоке CO₂ из почв. При круглогодичных измерениях и достаточной частоте измерений эмиссии CO₂ из почв (3–5 раз в месяц или чаще) суммарные месячные потоки CO₂ (г С / м² мес) рассчитывают с учетом среднемесячных значений эмиссии CO₂ (г С / м² сут) и продолжительности соответствующего месяца. Сезонные и годовые потоки получают суммированием соответствующих месячных потоков.

Однако, из-за продолжительного снежного периода и сложной логистики для еженедельного посещения площадок наблюдений, круглогодичные измерения довольно редки. Чаще всего измерения эмиссии CO₂ охватывают только летний (июнь–август) или вегетационный сезон — с мая по сентябрь. Опираясь на базу данных, в которой были представлены результаты круглогодичных измерений потоков CO₂ из почв 19 различных экосистем Европы (Германия, Англия, Финляндия и др.) и России был рассчитан вклад летних потоков CO₂ в годовую эмиссию CO₂ из почв (Cs). Этот показатель, представляет собой довольно стабильную величину в естественных экосистемах, что и послужило основной причиной его использования в качестве входного параметра модели для оценки годовых потоков углекислого газа из почв. Было найдено, что Cs имеет тесную обратную связь со среднегодовой температурой воздуха и адекватно описывается линейной и полиномиальной функциями ($R^2 = 0.91–0.95$, $p < 0.001$, рис. 21).

На основе экспериментальных данных, характеризующих летние потоки CO₂ из почв различных регионов и разработанной нами модели были рассчитаны величины вклада летнего потока CO₂ в суммарный годовой поток для почв всех 374 экосистем, представленных в первой БД по дыханию почв в РФ (Kurganova, 2003; Kudeyarov, Kurganova, 2005). Суммарные годовые потоки CO₂ (ЭМ_{CO2}-An) оценивают согласно следующему уравнению:

$$\text{ЭМ}_{\text{CO}_2} - \text{An} = \frac{F_s \times 100}{C_s} \quad (19)$$

где: $\text{ЭМ}_{\text{CO}_2} - \text{An}$ — суммарный годовой поток CO_2 из почв отдельных экосистем ($\text{г С} / \text{м}^2 \text{ год}$); $\text{ЭМ}_{\text{CO}_2} - \text{Sum}$ — суммарный почвенный поток CO_2 из экосистемы за лето, ($\text{г С} / \text{м}^2 \text{ лето}$, измеренный); C_s — величина вклада летнего потока CO_2 в суммарный годовой поток, % (рассчитана по модели).

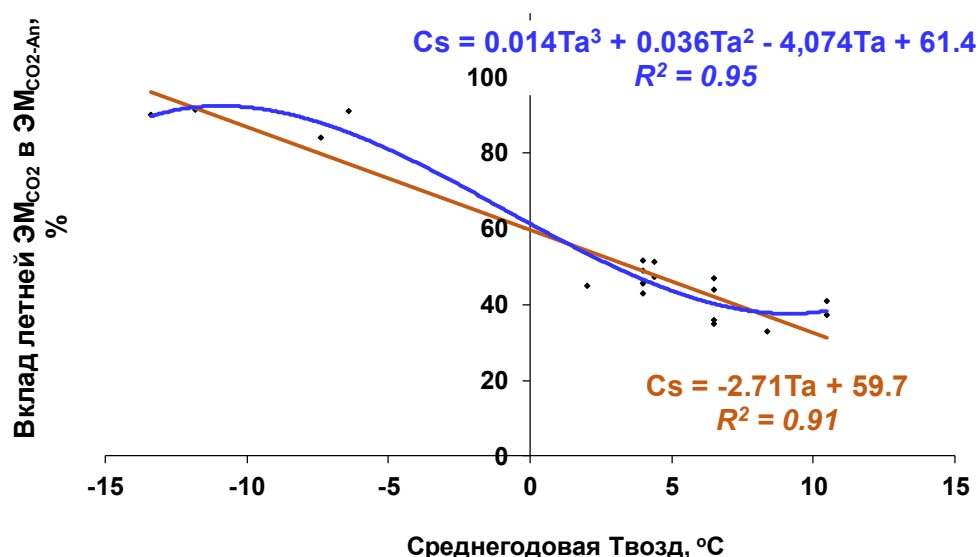


Рисунок 21. Связь между величиной вклада летнего потока CO_2 в суммарный годовой поток (C_s) и среднегодовой температурой воздуха ($T_{\text{в}}$).

Подход 2 основан на оценке годового потока CO_2 из почв по средней скорости эмиссии CO_2 за вегетационный период ($\text{ЭМ}_{\text{CO}_2} - \text{Veg}$) и применялся в работах Мухортовой с соавт. (Mukhortova et al., 2021, 2015). Так, если в некоторых исследованиях сообщается только средняя скорость ЭМ_{CO_2} ($\text{мкмоль С} / \text{м}^2 \text{ с}$), измеренная в течение вегетационного периода, то для этих случаев суммарная $\text{ЭМ}_{\text{CO}_2} - \text{Veg}$ за вегетационный период ($\text{г С} / \text{м}^2$) рассчитывался по формуле:

$$\text{ЭМ}_{\text{CO}_2} - \text{DT}_5 = 12 \times \text{ЭМ}_{\text{CO}_2} - \text{Veg} \times 10 - 6 \times 60 \times 60 \times 24 \times \text{DT}_5 \quad (20)$$

где $\text{ЭМ}_{\text{CO}_2} - \text{DT}_5$ — скорость выделения C-CO_2 в период со среднесуточной температурой выше 5°C , $\text{г С} / \text{м}^2 \text{ сут}$; DT_5 — продолжительность теплого периода со среднесуточной температурой

выше 5°C; $(60 \times 60 \times 24)$ — пересчет оттока мкмоль С / м² с в мкмоль / м² сут;
12 — молярная масса углерода, чтобы перевести мкмоль С в грамм С.

Для расчета суммарной годовой ЭМ_{CO₂-An} была разработана регрессионная модель ($R^2=0.81$, $p<0.01$) на основе данных из исследований, в которых сообщалось как о годовых, так и о сезонных потоках эмиссии CO₂ из почв ($n = 130$):

$$\text{ЭМ}_{\text{CO}_2} - \text{An} = 101.5309 + 0.5967 \times \text{DT}_5 + 0.7087 \times \text{ЭМ}_{\text{CO}_2} - \text{DT}_5 \quad (21)$$

где ЭМ_{CO₂-An} — годовой поток CO₂ из почв, г С / м² год; DT₅ — продолжительность теплого периода со среднесуточной температура выше 5°C, дни; ЭМ_{CO₂-DT₅} — выделение С-CO₂ в период со среднесуточной температурой выше 5°C, г С / м² сут.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Определение эмиссии CO_2 из почв камерным методом в полевых условиях представляет собой сложный процесс. В разных экосистемах имеются свои особенности для выполнения корректных измерений эмиссии CO_2 , начиная с установки камер-изоляторов и заканчивая применяемыми алгоритмами оценки годовых потоков CO_2 из почв. При достаточно большом разнообразии современных автоматических газоанализаторов, исследователям прежде всего необходимо понимать и «чувствовать» биологическую сущность изучаемого процесса. Очень важно для сопоставления полученных значений эмиссии CO_2 из почв разными коллективами, использующими разное оборудование и работающих в различных природных зонах, придерживаться основных принципов определения эмиссии CO_2 из почв, изложенных в настоящем Методическом руководстве. Создание первой национальной сети и единой базы данных по определению эмиссии CO_2 из почв, призванных объединить усилия исследователей из ведущих академических институтов и университетов России, должны опираться прежде всего на принцип единообразия проводимых измерений и расчетов, которые являются признанными мировым научным сообществом. Мы надеемся, что настоящее пособие поможет соблюсти этот важный принцип и будет полезно не только начинающим исследователям, но и тем, кто имеет многолетний опыт изучения и измерения эмиссии CO_2 из почв.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Базилевич Н.И., Титлянова А.А.* Биотический круговорот на пяти континентах: азот и зольные элементы в природных наземных экосистемах / Н.И. Базилевич, А.А. Титлянова; ред. А.А. Тишков. – Новосибирск: Издательство СО РАН, 2008. – 381 с.
2. *Бобрик А.А., Гончарова О.Ю., Матышак Г.В., Дроздов Д.С., Пономарева О.Е.* Вклад абиотических факторов в пространственное варьирование эмиссии CO₂ почв лесотундровой зоны Западной Сибири (Новый Уренгой) // Криосфера Земли. – 2017. – Т. 21. – № 2. – С. 52-59.
3. *Ведрова Э.Ф.* Баланс углерода в сосняках Средней Сибири // Сибирский экологический журнал. – 1997а. – № 4. – С. 375-382.
4. *Ведрова Э.Ф.* Разложение органического вещества лесных подстилок // Почвоведение. – 1997б. – № 2. – С. 216-223.
5. *Ведрова Э.Ф.* Трансформация растительных остатков в 25-летних культурах основных лесобразующих пород Сибири // Лесоведение. – 1995. – № 4. – С. 13-21.
6. *Ведрова Э.Ф.* Углеродный баланс в сосняках Красноярской лесостепи // Лесоведение. – 1996. – № 5. – С. 51-59.
7. *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) // Сибирский Экологический Журнал. – 2019. – Т. 26. – Автотрофное и гетеротрофное дыхание почв криолитозоны. – № 6.
8. *Заварзин Г.А.* Лекции по природоведческой биологии / Г.А. Заварзин. – Москва: Наука, 2003. – 348 с.
9. *Замолодчиков Д.Г.* Баланс углерода в тундровых и лесных экосистемах России : докторская диссертация. – Москва: МГУ имени М.В. Ломоносова, 2003. – 325 с.
10. *Замолодчиков Д.Г., Карелин Д.В.* Биогенные углеродные потоки в тундрах и лесотундрах России // Круговорот углерода на территории России. – Москва: Министерство науки и технологий РФ, 1999. – С. 146-162.
11. *Замолодчиков Д.Г., Уткин А.И., Честных О.В.* Показатели конверсии запасов насаждений в первичную продукцию для основных лесобразующих пород России // Лесная таксация и лесостроительство. – 2003. – № 1. – С. 128-130.
12. *Замолодчиков Д.Г., Лопес де Гереню В.О., Иващенко А.И., Карелин Д.В., Честных О.В.* Эмиссия углерода южными тундрами в холодный период года // Доклады академии наук. – 2000. – Т. 372. – № 5. – С. 709-711.
13. *Звягинцев Д.Г., Бабьева И.П., Зенова Г.Н.* Биология почв : Классический университетский учебник / Д.Г. Звягинцев, И.П. Бабьева, Г.Н. Зенова. – 3. – Москва: Издательство Московского университета, 2005. – 445 с.
14. *Карелин Д.В., Замолодчиков Д.Г., Краев Г.Н.* Методическое руководство по анализу эмиссий углерода из почв поселений в тундре / Д.В. Карелин, Д.Г. Замолодчиков, Г.Н. Краев. – Москва: Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН, 2015. – 64 с.
15. *Карелин Д.В., Замолодчиков Д.Г.* Углеродный обмен в криогенных экосистемах / Д.В. Карелин, Д.Г. Замолодчиков. – Москва: Академиздатцентр «Наука», 2008. – 344 с.
16. *Карелин Д.В., Почикалов А.В., Замолодчиков Д.Г., Гитарский М.Л.* Факторы пространственно-временной изменчивости потоков CO₂ из почв южнотаежного ельника на Валдае // Лесоведение. – 2014. – № 4. – С. 56-66.
17. *Каспаров С.В., Минько О.И., Аммосова А.М., Первова Н.Е.* Некоторые подходы к изучению функционирования газового профиля почвы // Почвоведение. – 1986. – № 10. – С. 127-130.
18. *Кобак К.И.* Биотические компоненты углеродного цикла / К.И. Кобак. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1988. – 247 с.
19. *Кудеяров В.Н.* Вклад почвенного покрова России в мировой биогеохимический цикл углерода // Почвенные процессы и пространственно-временная организация почв / publisher: Федеральное государственное унитарное предприятие "Академический научно-издательский, производственно-полиграфический и книгораспространительский центр «Наука». – Москва:

Академический научно-издательский, производственно-полиграфический и книгораспространительский центр Российской академии наук "Издательство «Наука», 2006. – С. 345-361.

20. Кудеяров В.Н. Выделение углекислого газа почвенным покровом России // Природа. – 1994. – № 7. – С. 37-43.
21. Кудеяров В.Н., Хакимов Ф.И., Деева Н.Ф., Ильина А.А., Кузнецова Т.В., Тимченко А.В. Оценка дыхания почв России // Почвоведение. – 1995. – № 1. – С. 33-42.
22. Кудеяров В.Н. Почвенные источники углекислого газа на территории России // Глобальные изменения природной среды и климата. Избранные научные труды (ред. Г.А. Заварзин). – Москва: Министерство науки и технологий РФ, 1999. – С. 165-201.
23. Кудеяров 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 / В.Н. Кудеяров и др.; ред. Г.А. Заварзин. – Москва: Наука, 2007. – 315 с.
24. Курганова И.Н., Лопес де Гереню В.О., Хорошаев Д.А., Мякина Т.Н., Сапронов Д.В., Жмурич В.А., Кудеяров 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.
25. Курганова И.Н., Кудеяров В.Н. Оценка потоков диоксида углерода из почв таежной зоны России // Почвоведение. – 1998. – № 9. – С. 1058-1070.
26. Курганова И.Н., Лопес де Гереню В.О., Ипп С.Л., Каганов В.В., Хорошаев Д.А., Рухович Д.И., Сумин Ю.В., Дурманов Н.Д., Кузяков Я.В. Пилотный карбоновый полигон в России: анализ состояния почв и запасы углерода в лесной растительности // Почвы и окружающая среда. – 2022. – Т. 5. – № 2. – С. e169.
27. Курганова И.Н. Эмиссия и баланс диоксида углерода в наземных экосистемах России : докторская диссертация. – Москва: МГУ имени М.В. Ломоносова, 2010. – 401 с.
28. Ларионова А.А. Динамика интенсивности дыхания серой лесной почвы в зависимости от агроэкологических факторов : кандидатская диссертация. – Москва: МГУ имени М.В. Ломоносова, 1988. – 122 с.
29. Ларионова А.А., Иванникова, Демкина Т.С. Методы определения эмиссии CO₂ из почвы // Дыхание почвы. – Пущино: Пущинский научный центр, 1993. – С. 11-26.
30. Ларионова А.А., Розанова Л.Н. Влияние температуры и влажности почвы на эмиссию CO₂ // Дыхание почвы. – Пущино: Пущинский научный центр, 1993. – С. 68-76.
31. Лопес де Гереню В.О., Курганова И.Н., Розанова Л.Н., Кудеяров В.Н. Годовая эмиссия диоксида углерода из почв южнотаежной зоны России // Почвоведение. – 2001. – № 9. – С. 1045-1059.
32. Лопес де Гереню В.О., Курганова И.Н., Замолотчиков Д.Г., Кудеяров В.Н. Методы количественной оценки потоков диоксида углерода из почв // Методы исследований органического вещества почв. – Москва: Россельхозакадемия – ГНУ ВНИПТИОУ, 2005. – С. 408-425.
33. Макаров Б.Н. Газовый режим почвы / Б.Н. Макаров. – Москва: Агропромиздат, 1988. – 103 с.
34. Макаров Б.Н. Методы изучения газового режима почв // Методы стационарного изучения почв. – Москва: Наука, 1977. – С. 55-87.
35. Матышак Г.В., Богатырев Л.Г., Гончарова О.Ю., Бобрик А.А. Особенности развития почв гидроморфных экосистем северной тайги Западной Сибири в условиях криогенеза // Почвоведение. – 2017. – № 10. – С. 1155-1164.
36. Махныкина А.В., Прокушкин А.С., Меняйло О.В., Верховец С.В., Тычков И.И., Урбан А.В., Рубцов А.В., Кошурникова Н.Н., Ваганов Е.А. Влияние климатических факторов на эмиссию CO₂ из почв в среднетаежных лесах Центральной Сибири: эмиссия как функция температуры и влажности почвы // Экология. – 2020. – № 1. – С. 51-61.

37. *Меняйло О.В., Матвиенко А.И., Степанов А.Л., Макаров М.И.* Определение потока CO₂ из почв: роль глубины колец // Экология. – 2015. – Т. 2015. – Определение потока CO₂ из почв. – № 2. – С. 120-124.
38. *Мошкина Е.В., Бахмет О.Н., Медведева М.В., Карпечко А.Ю., Мамай А.В.* Пространственно-временная динамика биологической активности почв в фитогенном поле сосны обыкновенной в средней тайге Карелии // Лесоведение. – 2022. – № 4. – С. 351-363.
39. *Наумов А.В.* Дыхание почвы: составляющие, экологические функции, географические закономерности : докторская диссертация. – Томск: Томский государственный университет, 2004. – 317 с.
40. *Семенов В.М., Козут Б.М.* Почвенное органическое вещество / В.М. Семенов, Б.М. Козут. – Москва: ГЕОС, 2015. – 233 с.
41. *Смагин А.В.* Газовая фаза почв / А.В. Смагин. – Москва: МГУ, 2005. – 304 с.
42. *Смагин А.В.* Газовая функция почв // Почвоведение. – 2000. – № 10. – С. 1211-1223.
43. *Смагин А.В., Савельева А.А., Смагина М.В.* Организация песчаных почв сосновых БГЦ (уровень системы почвенных горизонтов) // Почвоведение. – 1992. – № 9. – С. 120-131.
44. *Смагин А.В.* Формирование структуры песчаных почв при сукцессиях сосновых лесов : кандидатская диссертация. – Москва: МГУ имени М.В. Ломоносова, 1991. – 145 с.
45. *Творожникова Т.А.* Структурно-функциональная организация микоризных корневых окончаний *Picea obovata* Ledeb : Автореферат диссертации на соискание степени кандидата биологических наук. – Сыктывкар: Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения РАН, 2009. – 19 с.
46. *Шарков И.Н.* Совершенствование абсорбционного метода определения выделения CO₂ из почвы в полевых условиях // Почвоведение. – 1987. – № 1. – С. 127-133.
47. *Штатнов В.И.* К методике определения биологической активности почв // Доклады ВАСХНИЛ. – 1952. – № 6. – С. 26-30.
48. *Adam K., Stahr K.* CO₂-Emissionen aus Boden im wurttembergischen Allgau // Mitteilungen der Deutschen Bodencundlichen Gesselshaft. – 1997. – Т. 85. – № II. – С. 815-818.
49. *Panikov N.S., Gorbenko A.J.* The Dynamics of Gas Exchange between Soil and Atmosphere in Relation to Plant-Microbe Interactions: Fluxes Measuring and Modelling // Ecological Bulletins. – 1992. – The Dynamics of Gas Exchange between Soil and Atmosphere in Relation to Plant-Microbe Interactions. – № 42. – С. 53-61.
50. *Soil microbiology, ecology, and biochemistry* / ред. Е.А. Paul. – 3rd ed. – Amsterdam ; Boston: Academic Press, 2007. – 532 с.
51. *Бобрик А.А., Рыжова И.М., Гончарова О.Ю., Матышак Г.В., Макаров М.И., Волкер Д.А.* Эмиссия CO₂ и запасы органического углерода в почвах северотаежных экосистем западной сибирь в различных геоэкологических условиях // Почвоведение. – 2018. – № 6. – С. 674-682.
52. *Козут Б.М., Семенов В.М., Артемьева З.С., Данченко Н.Н.* Дегумусирование и почвенная секвестрация углерода // Агрохимия. – 2021. – № 5.
53. *Сморкалов И.А.* Изменчивость дыхания почвы: оценка вклада пространства и времени с помощью алгоритма Random Forest // Экология. – 2022. – Изменчивость дыхания почвы. – № 4. – С. 299-311.
54. *Bahn M., Knapp M., Garajova Z., Pfahringer N., Cernusca A.* Root respiration in temperate mountain grasslands differing in land use // Global Change Biology. – 2006. – Vol. 12. – № 6. – P. 995-1006.
55. *Bond-Lamberty B., Wang C., Gower S.T.* A global relationship between the heterotrophic and autotrophic components of soil respiration? // Global Change Biology. – 2004. – Vol. 10. – № 10. – P. 1756-1766.
56. *Burton D.L., Beauchamp E.G.* Profile Nitrous Oxide and Carbon Dioxide Concentrations in a Soil Subject to Freezing // Soil Science Society of America Journal. – 1994. – Vol. 58. – № 1. – P. 115-122.
57. *Davidson E.A., Janssens I.A., Luo Y.* On the variability of respiration in terrestrial ecosystems: moving beyond Q10 // Global Change Biology. – 2006. – Vol. 12. – On the variability of respiration in terrestrial ecosystems. – № 2. – P. 154-164.

58. *Freijer J.I., Bouten W.* A comparison of field methods for measuring soil carbon dioxide evolution: Experiments and simulation // *Plant and Soil*. – 1991. – Vol. 135. – A comparison of field methods for measuring soil carbon dioxide evolution. – № 1. – P. 133-142.
59. *Goncharova O., Matyshak G., Udovenko M., Semenyuk O., Epstein H., Bobrik A.* Temporal dynamics, drivers, and components of soil respiration in urban forest ecosystems // *CATENA*. – 2020. – Vol. 185. – P. 104299.
60. *Han G., Zhou G., Xu Z., Yang Y., Liu J., Shi K.* Soil temperature and biotic factors drive the seasonal variation of soil respiration in a maize (*Zea mays* L.) agricultural ecosystem // *Plant and Soil*. – 2007. – Vol. 291. – № 1. – P. 15-26.
61. *Hanson P.J., Edwards N.T., Garten C.T., Andrews J.A.* Separating root and soil microbial contributions to soil respiration: A review of methods and observations // *Biogeochemistry*. – 2000. – Vol. 48. – № 1. – P. 115-146.
62. *IGBP Terrestrial Carbon Working Group, Steffen W., Noble I., Canadell J., Apps M., Schulze E.-D., Jarvis P.G.* The Terrestrial Carbon Cycle: Implications for the Kyoto Protocol // *Science*. – 1998. – Vol. 280. – The Terrestrial Carbon Cycle. – № 5368. – P. 1393-1394.
63. *Jong E.D., Schappert H.J.V.* Calculation of soil respiration and activity from CO₂ profiles in the soil // *Soil Science*. – 1972. – Vol. 113. – № 5. – P. 328-333.
64. *Karelin D.V., Sukhoveeva O.E.* Contribution analysis of permanent and sporadic controls of CO₂ efflux from chernozems over four seasons // *Geography, environment, sustainability*. – 2021. – Vol. 15. – № 1. – P. 35-45.
65. *Karelin D.V., Zamolodchikov D.G., Shilkin A.V., Popov S.Yu., Kumanyaev A.S., Gerenyu V.O.L. de, Tel'nova N.O., Gitsarskiy M.L.* The effect of tree mortality on CO₂ fluxes in an old-growth spruce forest // *European Journal of Forest Research*. – 2021. – Vol. 140. – № 2. – P. 287-305.
66. *Kimball B.A., Lemon E.R.* Spectra of air pressure fluctuations at the soil surface // *Journal of Geophysical Research* (1896-1977). – 1970. – Vol. 75. – № 33. – P. 6771-6777.
67. *Kudeyarov V.N., Kurganova I.N.* Respiration of Russian Soils: Database Analysis, Long-Term Monitoring, and General Estimates // *Eurasian Soil Science*. – 2005. – Vol. 38. – № 9. – P. 983-992.
68. *Kurganova I., Lopes de Gerenyu V., Rozanova L., Sapronov D., Myakshina T., Kudeyarov V.* Annual and seasonal CO₂ fluxes from Russian southern taiga soils // *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*. – 2003. – Vol. 55. – № 2. – P. 338-344.
69. *Kurganova I.N., Lopes de Gerenu V.O., Khoroshaev D.A., Myakshina T.N., Sapronov D.V., Zhmurin V.A., Kudeyarov V.N.* Analysis of the long-term soil respiration dynamics in the forest and meadow cenoses of the Prioksko-terrasny biosphere reserve in the perspective of current climate trends // *Eurasian Soil Science*. – 2020. – Vol. 53. – № 10. – P. 1421-1436.
70. *Kurganova I.N., Lopes de Gerenyu V.O., Myakshina T.N., Sapronov D.V., Kudeyarov V.N.* CO₂ emission from soils of various ecosystems of the Southern Taiga Zone: Data analysis of continuous 12-year monitoring // *Doklady Biological Sciences*. – 2011. – Vol. 436. – CO₂ emission from soils of various ecosystems of the Southern Taiga Zone. – № 1. – P. 56-58.
71. *Kuzyakov Y., Larionova A.A.* Root and rhizomicrobial respiration: A review of approaches to estimate respiration by autotrophic and heterotrophic organisms in soil // *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. – 2005. – Vol. 168. – Root and rhizomicrobial respiration. – № 4. – P. 503-520.
72. *Kuzyakov Y.* Review: Factors affecting rhizosphere priming effects // *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. – 2002. – Vol. 165. – Review. – № 4. – P. 382-396.
73. *Kuzyakov Ya.V., Larionova A.A.* Contribution of rhizomicrobial and root respiration to the CO₂ emission from soil (A review) // *Eurasian Soil Science*. – 2006. – Vol. 39. – № 7. – P. 753-764.
74. *Larionova A.A., Yevdokimov I.V., Kurganova I.N., Sapronov D.V., Lopes de Gerenyu V.O., Kuznetsova L.G.* Root respiration and its contribution to the CO₂ emission from soil // *Eurasian Soil Science*. – 2003. – Vol. 36. – № 2. – P. 173-184.
75. *Lemon E.* Aerodynamic studies of CO₂ exchange between the atmosphere and the plant. – New York, London: Academic Press Inc., 1967. – P. 263-299.

76. *Lopes de Gerenyu V.O., Kurganova I.N., Rozanova L.N., Kudryarov V.N.* Effect of temperature and moisture on CO₂ evolution rate of cultivated Phaeozem: analyses of a long-term field experiment // *Plant, Soil and Environment*. – 2005. – Vol. 51. – № 5. – P. 213-219.
77. *Lundegårdh H.* Carbon dioxide evolution of soil and crop growth // *Soil Science*. – 1927. – Vol. 23. – № 6. – P. 417-453.
78. *Mamai A.V., Moshkina E.V., Kurganova I.N., Shorohova E.V., Romashkin I.V., Lopes de Gerenyu V.O.* Partitioning of CO₂ Fluxes from Coarse Woody Debris: Adaptation of the Component Integration Method // *Baltic forestry*. – 2018. – Vol. 24. – № 2. – P. 249-260.
79. *Mukhortova L., Schepaschenko D., Moltchanova E., Shvidenko A., Khabarov N., See L.* Respiration of Russian soils: Climatic drivers and response to climate change // *Science of The Total Environment*. – 2021. – Vol. 785. – Respiration of Russian soils. – P. 147314.
80. *Mukhortova L., Schepaschenko D., Shvidenko A., McCallum I., Kraxner F.* Soil contribution to carbon budget of Russian forests // *Agricultural and Forest Meteorology*. – 2015. – Vol. 200. – P. 97-108.
81. *Nakayama F.S., Kimball B.A.* Soil Carbon Dioxide Distribution and Flux within the Open-top Chamber // *Agronomy Journal*. – 1988. – Vol. 80. – № 3. – P. 394-398.
82. *Oechel W.C., Vourlitis G., Hastings S.J.* Cold season CO₂ emission from Arctic soils // *Global Biogeochemical Cycles*. – 1997. – Vol. 11. – № 2. – P. 163-172.
83. *Pajari B.* Soil respiration in a poor upland site of Scots pine stand subjected to elevated temperatures and atmospheric carbon concentration // *Nutrient Uptake and Cycling in Forest Ecosystems: Proceedings of the CEC/IUFRO Symposium Nutrient Uptake and Cycling in Forest Ecosystems Halmstad, Sweden, June, 7–10, 1993 : Developments in Plant and Soil Sciences / eds. L.O. Nilsson, R.F. Hüttel, U.T. Johansson*. – Dordrecht: Springer Netherlands, 1995. – P. 563-570.
84. *Pumpanen J., Ilvesniemi H., PERÄMÄKI M., Hari P.* Seasonal patterns of soil CO₂ efflux and soil air CO₂ concentration in a Scots pine forest: comparison of two chamber techniques // *Global Change Biology*. – 2003. – Vol. 9. – Seasonal patterns of soil CO₂ efflux and soil air CO₂ concentration in a Scots pine forest. – № 3. – P. 371-382.
85. *Raich J.W., Schlesinger W.H.* The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate // *Tellus B*. – 1992. – Vol. 44. – № 2. – P. 81-99.
86. *Rayment M.B.* Closed chamber systems underestimate soil CO₂ efflux: Closed chambers underestimate soil CO₂ efflux // *European Journal of Soil Science*. – 2000. – Vol. 51. – Closed chamber systems underestimate soil CO₂ efflux. – № 1. – P. 107-110.
87. *Rolston D.E.* Application of Gaseous-Diffusion Theory to Measurement of Denitrification // *Nitrogen Behavior in Field Soil / eds. D.R. Nielsen, J.G. MacDonald*. – Academic Press, 1978. – P. 309-335.
88. *Rustad L.E., Huntington T.G., Boone R.D.* Controls on soil respiration: Implications for climate change // *Biogeochemistry*. – 2000. – Vol. 48. – Controls on soil respiration. – № 1. – P. 1-6.
89. *Schlesinger W.H., Andrews J.A.* Soil respiration and global carbon cycle // *Biogeochemistry*. – 2000. – Vol. 48. – № 1. – P. 7-20.
90. *Shorohova E.V., Mamai A.V., Moshkina E.V., Romashkin I.V., Lopes de Gerenyu V.O., Kurganova I.N.* Comparing Measurement Approaches for Quantifying CO₂ Flux from Downed Woody Debris with a Dynamic Chamber Method // *Russian Journal of Ecology*. – 2020. – Vol. 51. – № 4. – P. 351-362.
91. *Singh J.S., Gupta S.R.* Plant decomposition and soil respiration in terrestrial ecosystems // *The Botanical Review*. – 1977. – Vol. 43. – № 4. – P. 449-528.
92. *Vedrova E.F., Pleshikov F.I., Kaplunov V.Ya.* Net Ecosystem Production of Boreal Larch Ecosystems on the Yenisei Transect // *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*. – 2006. – Vol. 11. – № 1. – P. 173-190.
93. *Xu M., Shang H.* Contribution of soil respiration to the global carbon equation // *Journal of Plant Physiology*. – 2016. – Vol. 203. – P. 16-28.
94. *Zimov S.A., Zimova G.M., Daviodov S.P., Daviodova A.I., Voropaev Y.V., Voropaeva Z.V., Prosiannikov S.F., Prosiannikova O.V., Semiletova I.V., Semiletov I.P.* Winter biotic activity and production of CO₂ in Siberian soils: A factor in the greenhouse effect // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. – 1993. – Vol. 98. – Winter biotic activity and production of CO₂ in Siberian soils. – № D3. – P. 5017-5023.

Биота — совокупность всех живых организмов.

Деструкция — процесс разложения органического вещества бактериями, грибами, животными, а также абиотическими силами и самопроизвольно.

Парниковые газы — малые газообразные составляющие атмосферы, такие как пары воды, CO_2 , метан и некоторые другие, способные к поглощению длинноволнового (инфракрасного) излучения поверхности Земли, благодаря чему ее температура повышается.

Объемная влажность почвы — доля воды в единице объема почвы (обычно дается в процентах).

Органогенный слой (почвы) — верхний слой почвы с большим содержанием органических остатков (в основном растительных).

Углеродный баланс (чистый поток углерода, чистая продукция экосистемы) — разница между приходом и расходом массы углерода в составе углекислого газа на единице площади экосистемы за год. Приход углерода в экосистему определяется поглощением CO_2 в процессе фотосинтеза, а расход — его выделением с дыханием всех организмов экосистемы, включая растения, в атмосферу.

Фотосинтез — процесс фиксации растениями CO_2 из окружающего воздуха в форме первичных органических кислот с помощью энергии солнца. Далее эти вещества включаются в метаболизм растений, служащий как для производства энергии, так и для построения их тел.

Валовая первичная продукция — весь углерод, поглощаемый во время фотосинтеза.

Депонирование углерода — процесс его закрепления в долгосуществующих компонентах экосистемы: деревьях, торфе, почвенном гумусе.

Ресинтез — совокупность процессов, приводящих к образованию новых органических соединений из продуктов переработки растительного вещества.

Секвестрация углерода — перевод атмосферного углекислого газа в живое органическое вещество растений с последующей трансформацией

формирующейся мортмассы в почвенное органическое вещество и его долговременное сохранение в почвенном резервуаре за счет стабилизации с минимальным риском возврата в атмосферу».

Экосистемное дыхание — это суммарный поток, объединяющий деструкционную составляющую углеродного цикла и дыхание растений (надземной и подземной частей)

Чистая экосистемная продукция — результат годичного цикла функционирования экосистемы, представляет составляющую продукционных и деструкционных процессов.

Чистый экосистемный обмен — разность между количеством углекислого газа, выделенным в атмосферу при дыхании экосистемы (почва + растения), и количеством углекислого газа, поглощенным системой в процессе фотосинтеза.

Чистая биомная продукция — это сумма органического углерода, накопленного в экосистеме в течение длительного периода, порядка десятилетий. В нее кроме растительной биомассы входят устойчивые органические формы углерода — торф и гумус почвы.

Дыхание почвы (эмиссия CO_2 из почвы) — вся совокупность процессов деструкции органических материалов, происходящих в почве и приводящих, в конечном счете, к выделению углекислого газа, воды и энергии, запасенной в органических соединениях.

1. Пример расчета объема воздуха в камере со снегом

Дано: высота камеры $H_{\text{кам}}$ 45 см, диаметр камеры $\varnothing = 10$ см; высота снега $H_{\text{сн}}$ в камере 30 см; плотность снега $\rho_{\text{сн}} = 0.23$ г/см³ или 23% об.

Объем камеры, $V_{\text{кам}}$:

$$V_{\text{кам}} = H_{\text{кам}} \times S_{\text{осн}}$$

или

$$V_{\text{кам}} = H_{\text{кам}} \times \pi \times \varnothing \times \varnothing / 4;$$

$$V_{\text{кам}} = 45 \times 3.14 \times 10 \times 10 / 4 = 3532.5 \text{ см}^3$$

Объем твердой части снега, $V_{\text{тс}}$ в камере составляет:

$$V_{\text{тс}} = H_{\text{сн}} \times \pi \times \varnothing \times \varnothing \times \rho_{\text{сн}} / 4$$

$$V_{\text{тс}} = 30 \times 3.14 \times 10 \times 10 \times 0.23 / 4 = 541.6 \text{ см}^3$$

Объем воздуха в камере, $V_{\text{в}}$ составит:

$$V_{\text{в}} = V_{\text{кам}} - V_{\text{тс}}$$

$$V_{\text{в}} = 3532.5 - 541.6 = 2990.9 \text{ см}^3$$

Полученная величина на 15% меньше исходного объема камеры. Для камер с вертикальными стенками (цилиндр или куб), когда в формуле расчета эмиссии используется только высота камеры $H_{\text{к}}$, возможен упрощенный расчет высоты камеры с учетом плотности снега $H_{\text{кс}}$:

$$H_{\text{кс}} = H_{\text{к}} - H_{\text{сн}} \times \rho_{\text{сн}}$$

или

$$H_{\text{кс}} = 45 - 30 \times 0.23 = 38.1 \text{ см.}$$

2. Формулы расчета скорости эмиссии CO₂ из почв по разным формулам и оценка

(1) Базовая формула (без поправки на температуру и давление)

$$F \text{ (мг C/м}^2 \times \text{час)} = \frac{a \times C_1 \times V \times M[C] \times C_2}{S \times t \times V_m \times C_3}$$

где:

a [%/мин] или [ppm/мин], V [мл] — объём камеры, $C_1 = 60$ — коэффициент перевода a из [% или ppm/мин] в [% или ppm /час], $M[C]$ [мг/ммоль] = 12 — молярная масса углерода, $C_2 = 10000$ — коэффициент перевода площади основания камеры из см² в м², S [см²] — площадь основания камеры, t [час] = 1 [час] или 24 [сутки] — время, для которого рассчитывается поток CO₂, V_m [мл/ммоль] = 22.4 - молярный объём идеального газа при стандартных условиях, $C_3 = 100$ - коэффициент перевода % CO₂ в безразмерные доли или 1000000 для перевода ppm в безразмерные доли

a можно рассчитать как по простой разнице между двумя точками измерения концентрации CO₂ в камере $a = (C_1 - C_0)/t$, где t — время (мин), так и из регрессионного уравнения $c[CO_2] = a \times t + b$, где $c[CO_2]$ — концентрация CO₂ в камере % или ppm, t — время (мин), a и b — эмпирические коэффициенты.

(2.1) Краткая формула, значения концентрации в ppm
(без поправки на температуру и давление)

$$F \text{ (мг С/м}^2 \times \text{час)} = \frac{a \times C_1 \times H \times M[C] \times C_2}{V_m \times C_3} =$$

$$= \frac{a \times 60 \times H \times 12 \times 10000}{22.4 \times 1000000} = \frac{a \times H \times 7.2}{22.4}$$

где: H [см] — высота.

(2.2) Краткая формула, значения концентрации в %
(без поправки на температуру и давление)

$$F \text{ (мг С/м}^2 \times \text{час)} = \frac{a \times C_1 \times H \times M[C] \times C_2}{V_m \times C_3} =$$

$$= \frac{a \times 60 \times H \times 12 \times 10000}{22.4 \times 100} = \frac{a \times H \times 72000}{22.4}$$

(3) Базовая формула
(с поправкой на температуру и давление)

$$F \text{ (мг С/м}^2 \times \text{час)} = \frac{a \times C_1 \times V \times M[C] \times C_2}{S \times t \times C_3} \times \frac{P}{R(T + T_K)}$$

где: R [м³·Па·К⁻¹·моль⁻¹] = 8.31446261815324 — универсальная газовая постоянная, T [°С] — температура, T_K [°С] = 273,15 — коэффициент перевода в градусы Кельвина, P [кПа] — давление.

Диаграмма ошибок (%) оценок скорости эмиссии CO₂, рассчитанных по формуле без поправки на температуру и давление окружающей среды по отношению к оценкам скорости эмиссии CO₂ с учётом температуры и давления. Красной линией отмечена 5% граница. Черная ячейка отмечает значение температуры и давления близкое к стандартным условиям, когда молярный объем газа составляет 22.41 л/моль

| | Давление, кПа | | | | | | | | | | |
|-----|---------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 94 | 95 | 96 | 97 | 98 | 99 | 100 | 101 | 102 | 103 | 104 |
| -20 | -0.1 | -1.1 | -2.2 | -3.2 | -4.2 | -5.1 | -6.1 | -7.0 | -7.9 | -8.8 | -9.7 |
| -19 | 0.3 | -0.7 | -1.8 | -2.8 | -3.8 | -4.8 | -5.7 | -6.6 | -7.6 | -8.5 | -9.3 |
| -18 | 0.7 | -0.4 | -1.4 | -2.4 | -3.4 | -4.4 | -5.3 | -6.3 | -7.2 | -8.1 | -9.0 |
| -17 | 1.1 | 0.0 | -1.0 | -2.0 | -3.0 | -4.0 | -5.0 | -5.9 | -6.8 | -7.7 | -8.6 |
| -16 | 1.5 | 0.4 | -0.6 | -1.6 | -2.6 | -3.6 | -4.6 | -5.5 | -6.5 | -7.4 | -8.3 |
| -15 | 1.9 | 0.8 | -0.2 | -1.3 | -2.3 | -3.3 | -4.2 | -5.2 | -6.1 | -7.0 | -7.9 |
| -14 | 2.3 | 1.2 | 0.2 | -0.9 | -1.9 | -2.9 | -3.9 | -4.8 | -5.7 | -6.7 | -7.5 |
| -13 | 2.7 | 1.6 | 0.5 | -0.5 | -1.5 | -2.5 | -3.5 | -4.4 | -5.4 | -6.3 | -7.2 |
| -12 | 3.1 | 2.0 | 0.9 | -0.1 | -1.1 | -2.1 | -3.1 | -4.1 | -5.0 | -5.9 | -6.8 |
| -11 | 3.5 | 2.4 | 1.3 | 0.3 | -0.8 | -1.8 | -2.7 | -3.7 | -4.6 | -5.6 | -6.5 |
| -10 | 3.9 | 2.8 | 1.7 | 0.7 | -0.4 | -1.4 | -2.4 | -3.3 | -4.3 | -5.2 | -6.1 |
| -9 | 4.3 | 3.2 | 2.1 | 1.0 | 0.0 | -1.0 | -2.0 | -3.0 | -3.9 | -4.9 | -5.8 |
| -8 | 4.7 | 3.6 | 2.5 | 1.4 | 0.4 | -0.6 | -1.6 | -2.6 | -3.6 | -4.5 | -5.4 |
| -7 | 5.0 | 3.9 | 2.9 | 1.8 | 0.8 | -0.3 | -1.3 | -2.2 | -3.2 | -4.1 | -5.1 |
| -6 | 5.4 | 4.3 | 3.2 | 2.2 | 1.1 | 0.1 | -0.9 | -1.9 | -2.8 | -3.8 | -4.7 |
| -5 | 5.8 | 4.7 | 3.6 | 2.6 | 1.5 | 0.5 | -0.5 | -1.5 | -2.5 | -3.4 | -4.3 |
| -4 | 6.2 | 5.1 | 4.0 | 2.9 | 1.9 | 0.9 | -0.1 | -1.1 | -2.1 | -3.0 | -4.0 |
| -3 | 6.6 | 5.5 | 4.4 | 3.3 | 2.3 | 1.2 | 0.2 | -0.8 | -1.7 | -2.7 | -3.6 |
| -2 | 7.0 | 5.9 | 4.8 | 3.7 | 2.7 | 1.6 | 0.6 | -0.4 | -1.4 | -2.3 | -3.3 |
| -1 | 7.4 | 6.3 | 5.2 | 4.1 | 3.0 | 2.0 | 1.0 | -0.0 | -1.0 | -2.0 | -2.9 |
| 0 | 7.8 | 6.7 | 5.6 | 4.5 | 3.4 | 2.4 | 1.3 | 0.3 | -0.6 | -1.6 | -2.6 |
| 1 | 8.2 | 7.1 | 6.0 | 4.9 | 3.8 | 2.7 | 1.7 | 0.7 | -0.3 | -1.2 | -2.2 |
| 2 | 8.6 | 7.5 | 6.3 | 5.2 | 4.2 | 3.1 | 2.1 | 1.1 | 0.1 | -0.9 | -1.8 |
| 3 | 9.0 | 7.8 | 6.7 | 5.6 | 4.5 | 3.5 | 2.5 | 1.4 | 0.4 | -0.5 | -1.5 |
| 4 | 9.4 | 8.2 | 7.1 | 6.0 | 4.9 | 3.9 | 2.8 | 1.8 | 0.8 | -0.2 | -1.1 |
| 5 | 9.8 | 8.6 | 7.5 | 6.4 | 5.3 | 4.2 | 3.2 | 2.2 | 1.2 | 0.2 | -0.8 |
| 6 | 10.2 | 9.0 | 7.9 | 6.8 | 5.7 | 4.6 | 3.6 | 2.5 | 1.5 | 0.6 | -0.4 |
| 7 | 10.6 | 9.4 | 8.3 | 7.2 | 6.1 | 5.0 | 3.9 | 2.9 | 1.9 | 0.9 | -0.1 |
| 8 | 11.0 | 9.8 | 8.7 | 7.5 | 6.4 | 5.4 | 4.3 | 3.3 | 2.3 | 1.3 | 0.3 |
| 9 | 11.4 | 10.2 | 9.0 | 7.9 | 6.8 | 5.7 | 4.7 | 3.6 | 2.6 | 1.6 | 0.7 |
| 10 | 11.8 | 10.6 | 9.4 | 8.3 | 7.2 | 6.1 | 5.1 | 4.0 | 3.0 | 2.0 | 1.0 |
| 11 | 12.2 | 11.0 | 9.8 | 8.7 | 7.6 | 6.5 | 5.4 | 4.4 | 3.4 | 2.4 | 1.4 |
| 12 | 12.5 | 11.4 | 10.2 | 9.1 | 8.0 | 6.9 | 5.8 | 4.7 | 3.7 | 2.7 | 1.7 |
| 13 | 12.9 | 11.8 | 10.6 | 9.4 | 8.3 | 7.2 | 6.2 | 5.1 | 4.1 | 3.1 | 2.1 |
| 14 | 13.3 | 12.1 | 11.0 | 9.8 | 8.7 | 7.6 | 6.5 | 5.5 | 4.4 | 3.4 | 2.4 |
| 15 | 13.7 | 12.5 | 11.4 | 10.2 | 9.1 | 8.0 | 6.9 | 5.8 | 4.8 | 3.8 | 2.8 |
| 16 | 14.1 | 12.9 | 11.7 | 10.6 | 9.5 | 8.4 | 7.3 | 6.2 | 5.2 | 4.2 | 3.2 |
| 17 | 14.5 | 13.3 | 12.1 | 11.0 | 9.8 | 8.7 | 7.7 | 6.6 | 5.5 | 4.5 | 3.5 |
| 18 | 14.9 | 13.7 | 12.5 | 11.4 | 10.2 | 9.1 | 8.0 | 7.0 | 5.9 | 4.9 | 3.9 |
| 19 | 15.3 | 14.1 | 12.9 | 11.7 | 10.6 | 9.5 | 8.4 | 7.3 | 6.3 | 5.2 | 4.2 |
| 20 | 15.7 | 14.5 | 13.3 | 12.1 | 11.0 | 9.9 | 8.8 | 7.7 | 6.6 | 5.6 | 4.6 |
| 21 | 16.1 | 14.9 | 13.7 | 12.5 | 11.4 | 10.2 | 9.1 | 8.1 | 7.0 | 6.0 | 4.9 |
| 22 | 16.5 | 15.3 | 14.1 | 12.9 | 11.7 | 10.6 | 9.5 | 8.4 | 7.4 | 6.3 | 5.3 |
| 23 | 16.9 | 15.7 | 14.5 | 13.3 | 12.1 | 11.0 | 9.9 | 8.8 | 7.7 | 6.7 | 5.7 |
| 24 | 17.3 | 16.0 | 14.8 | 13.7 | 12.5 | 11.4 | 10.2 | 9.2 | 8.1 | 7.0 | 6.0 |
| 25 | 17.7 | 16.4 | 15.2 | 14.0 | 12.9 | 11.7 | 10.6 | 9.5 | 8.4 | 7.4 | 6.4 |
| 26 | 18.1 | 16.8 | 15.6 | 14.4 | 13.3 | 12.1 | 11.0 | 9.9 | 8.8 | 7.8 | 6.7 |
| 27 | 18.5 | 17.2 | 16.0 | 14.8 | 13.6 | 12.5 | 11.4 | 10.3 | 9.2 | 8.1 | 7.1 |
| 28 | 18.9 | 17.6 | 16.4 | 15.2 | 14.0 | 12.9 | 11.7 | 10.6 | 9.5 | 8.5 | 7.4 |
| 29 | 19.3 | 18.0 | 16.8 | 15.6 | 14.4 | 13.2 | 12.1 | 11.0 | 9.9 | 8.8 | 7.8 |
| 30 | 19.7 | 18.4 | 17.2 | 16.0 | 14.8 | 13.6 | 12.5 | 11.4 | 10.3 | 9.2 | 8.1 |

3. Рекомендуемое измерительное оборудование

Для выполнения определения эмиссии CO₂ из почвы методом закрытых камер необходимо иметь следующее оборудование:

1. Газовый анализатор;
2. Основания/Камеры-изоляторы;
3. Термометр;
4. Влагомер.

Мы остановимся на тех приборах, которые доступны для приобретения и просты в использовании.

Камеры-изоляторы

Наиболее удобным и доступным видом измерительных камер в настоящее время являются трубы ПВХ диаметром 110 мм и высотой 10 или 20 см, врезанные в почву на глубину от 4 до 6 см. Камера накрывается крышкой, снабженной резиновыми манжетами, поставляемыми вместе с трубами, что обеспечивает необходимую герметичность камеры.

Газовые анализаторы

Предлагаем использовать модифицированные датчики концентрации содержания CO₂ в воздухе рабочих помещений различных модификаций (напр. AZ7752 или VENTpro), созданные на основе измерительной ячейки Senseair K30 (Швеция). Из них можно сконструировать две модификации портативного анализатора закрытого типа.

(1) Газовый анализатор созданный на основе серийного промышленного инфракрасного газоанализатора AZ7752 тайваньского производителя AZ Instrument, с диапазоном измерения концентраций от 0 до 5000 ppm (частей на миллион), разрешением 1 ppm и точностью в рабочем диапазоне ± 30 ppm.

Сенсор AZ7752 смонтирован в закрытую систему вместе с микропомпой мощностью до 2 л в минуту (Hardgraves technologies, США) (рис. 18). Анализатор соединяется силиконовыми шлангами с крышкой газовой почвенной камеры.

Анализатор работает в пределах от -10 до +35 °C. Емкости 12-вольтового аккумулятора (7 Ач) хватает на 24 ч автономной работы. При

изготовлении прибора наибольшая сложность состоит в извлечении из AZ7752 собственно сенсора CO₂ и помещении его в небольшую герметичную камеру, обмен воздуха в которой с внешней средой осуществляется под действием помпы. Прибор относительно дешев и легок (2 кг), а разрешение его достаточно для оценки даже малых (зимних) потоков CO₂, что позволяет широко применять его в самых разнообразных полевых исследованиях напочвенной эмиссии.

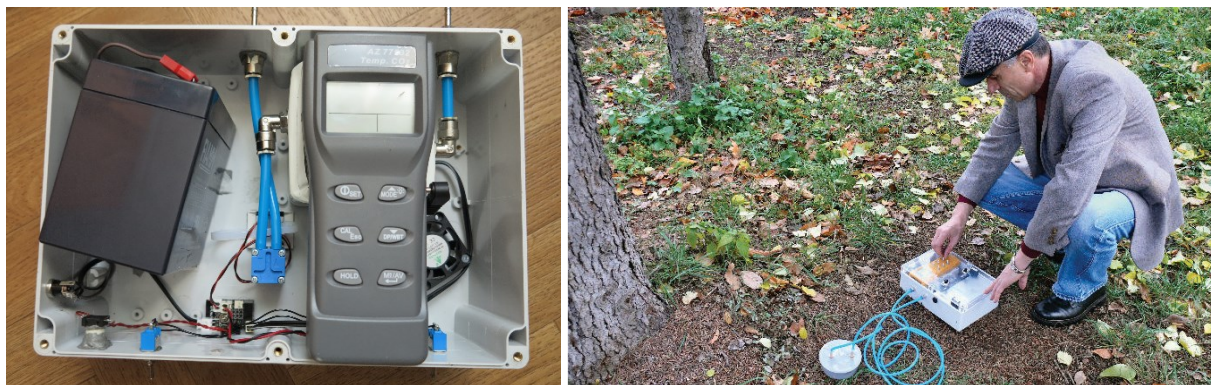


Рисунок 21. Модификация портативного анализатора закрытого типа, созданного на основе серийного промышленного инфракрасного сенсора AZ7752 тайваньского производителя AZ Instrument

(2) Более простая модификация датчика CO₂ в воздухе VENTpro фирмы Измерком (Санкт-Петербург) с теми же техническими характеристиками. Плата с измерительной инфракрасной ячейкой извлекается из корпуса датчика и устанавливается на крышке измерительной газовой камеры (рис. 19). Соединение измерительной платы с датчиком осуществляется с помощью интернет-кабеля.



Рисунок 22. Модификация портативного анализатора, созданного на основе серийного промышленного инфракрасного датчика VENTpro фирмы Измерком (Санкт-Петербург).

Калибровка и управление работой газоанализаторов производится согласно инструкции производителей.

Преимуществом первого варианта модификации датчика является лучшая защищенность прибора от погодных условий (пыль, дождь и т.п.). Относительным недостатком можно считать больший вес и необходимость иметь специальное зарядное устройство для аккумулятора. Второй вариант позволяет получить прибор более легкий, удобный в транспортировке. Питание прибора от пальчиковых батареек позволяет осуществлять их замену в любое время. Однако прибор требует бережного обращения и защиты от влаги и пыли, что не всегда удобно при работе в полевых условиях.

Камеры-изоляторы для измерения эмиссии CO₂ с поверхности почвы

Представляют собой изготавливаемые промышленностью непрозрачные сантехнические трубы стандартной толщины (2 мм) с внутренним диаметром 110 мм. Как правило, используются ПВХ-трубы длиной 20 см. Камера врезается в почву, обеспечивая изоляцию от контакта с атмосферой. На суглинистых почвах достаточно врезать камеру в минеральный горизонт на глубину 4 см, на супесчаных — 5–6 см. Камера накрывается крышкой, соединенной с газоанализатором шлангами (вариант 1) или кабелем (вариант 2).

Электронный термометр

Предлагается термометр Checktemp-1 производства фирмы Hanna Instruments с точностью 0,1 °C и диапазоном от +40 до –30 °C.

Электронный полевой влагомер (рефлектометр)

Предлагается HH2 Moisture Meter, с датчиком ThetaProbe ML2x производства фирмы Delta-T. Однако, ввиду дороговизны, прибор может быть заменен на (1) набор алюминиевых или из нержавеющей стали буюсков, (2) сушильный шкаф для сушки проб почвы до абсолютно сухой массы (с температурой не ниже +105 °C) и (3) весы с точностью 0,1 г. Полевые весы с такой точностью и максимальной массой взвешивания не менее 200 г также полезны при отборе проб почвы.

4. Инструкции по проведению измерению с помощью инфракрасного сенсора AZ7752

Для повседневного управления анализатором нужно знать немного. Включить прибор можно одним коротким нажатием на кнопку ON/SET. После этого на дисплее начинается обратный отсчет, и через 30 с прогрева появляется значение концентрации диоксида углерода (в ppm) и температура воздуха (для моделей AZ7752; для других моделей возможна комплектация датчиком относительной влажности воздуха). Это значит, что анализатор готов к работе.

К сожалению, в программу анализатора производителем встроено автоматическое выключение для экономии питания. Это произойдет через 20 мин после включения в обычном режиме. Прибор полностью отключается и дисплей гаснет. Если это произошло, надо быстро включить его снова. Так как отключение часто происходит прямо во время измерений, лучше не использовать данный автоматический режим. Для этого следует сразу включать анализатор не одной кнопкой включения, а одновременным нажатием кнопок ON/SET и HOLD. В этом случае на экране сначала появляется значок n, а после прогрева — концентрация CO₂ в ppm и температура воздуха.

Для калибровки анализатора по окружающему воздуху следует одновременно нажать кнопки MODE и CAL/ESC. Это нужно делать раз в сутки, перед началом всех измерений. Если анализатор нормально вошел в режим калибровки, на экране появляется обозначение «CAL 400 ppm». Калибровка проводится только на открытом воздухе, при включенной помпе, желательно при ветре (чтобы хорошо продувать анализатор) и при рабочих температурах среды. Перед тем как начать калибровку, прибор следует поместить в такие условия. Калибровка длится около 5 мин, и всё это время к прибору нельзя подходить, чтобы не повлиять на процесс калибровки дыханием (за счет выдыхания CO₂). Завершение калибровки определяется по дисплею, на котором снова появляется обычный режим. Во время непрерывных измерений (и даже при паузах в работе не более 1 ч) прибор лучше не выключать, т. к. без включенной помпы расход питания очень невелик, а новое включение потребует новой отмены автоматического отключения питания и новой калибровки. Выключить

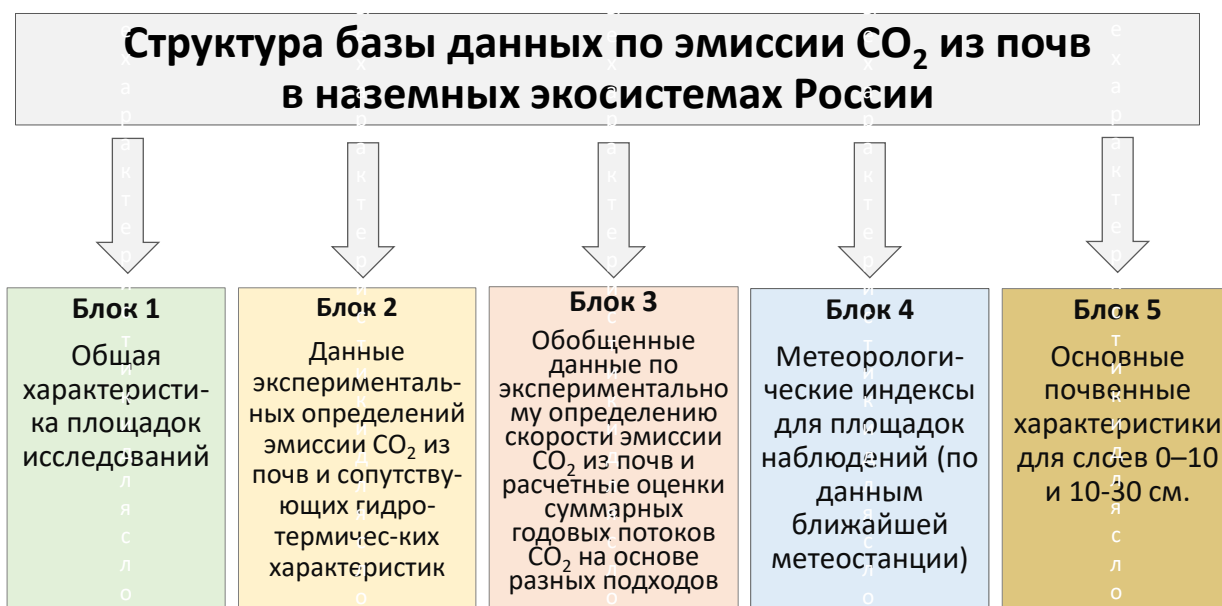
прибор в конце всех измерений можно кратким нажатием на кнопку ON/SET. Прочие операции используются крайне редко, и поэтому здесь мы их не приводим. Их можно найти при необходимости в инструкции (Operation manual, 2013), доступной на сайте производителя анализаторов AZ Instrument.

Пример заполнения таблицы для записи результатов при измерении эмиссии CO₂ из почвы с помощью газоанализатора AZ в полевых условиях

| № | Высота | Время | Т | Т почвы | Влажность | Минуты | | | | |
|---|--------|-----------|-------|---------|-----------|------------------------------------|-----|-----|-----|-----|
| | камеры | измерения | возд. | (5 см) | почвы | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 |
| | см | час | °C | °C | Об. % | Концентрации CO ₂ , ppm | | | | |
| 1 | 15.0 | 10:40 | 24.9 | 23.5 | 40.0 | 390 | 418 | 446 | 481 | 510 |
| 2 | 15.5 | 10:49 | 24.9 | 23.4 | 38.2 | 380 | 410 | 447 | 485 | 519 |
| 3 | 14.5 | 10:57 | 25.0 | 23.3 | 36.5 | 395 | 433 | 474 | 515 | 556 |
| 4 | 14.5 | 11:04 | 25.0 | 23.4 | 37.8 | 400 | 430 | 470 | 504 | 533 |
| 5 | 15.0 | 11:13 | 25.0 | 23.4 | 42.6 | 420 | 444 | 467 | 492 | 521 |

СТРУКТУРА ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ДАННЫХ

для последующего включения единую Информационно-аналитическую Систему, ИАС (раздел эмиссия CO₂ из почв)



Основной массив данных хранится в виде матриц, выполненных в программе excel, на сайтах институтов или у владельцев данных. Каждый блок схемы соответствует отдельному листу с параметрами, перечисленными ниже.

Лист 1: Общая характеристика площадок исследований

Код площадки наблюдений;

Природная зона;

Регион;

Населенный пункт;

Широта, DD,DDDDDD N;

Долгота DD,DDDDDD E;

Высота над уровнем моря, м;

Рельеф;

Позиция в ландшафте (автоморфный, транзитный, аккумулятивный);

Тип БГЦ;

Нарушения (ветровалы, пожары и т.п.), если есть;

Климатические данные за 30-ти летний период 1991–2020 (годовая сумма осадков, мм; среднегодовая $T_{\text{возд}}$, °C; средняя температура июля и января);
Тип почв (в соответствии с классификацией почв России 1977, 2004 гг.; WRB, 2014);
Гранулометрический состав;
Какие ПГ измеряются;
Период наблюдений за эмиссией CO_2 из почв (и др. ПГ, если есть);
Частота измерений;
Метод измерения;
Используемое оборудование;
Какие параметры измеряются дополнительно во время измерения эмиссии (непрерывно и точечно измеряемые);
Используемое оборудование/ или метод;
Организация.

Лист 2: Данные экспериментальных определений эмиссии CO_2 из почв и сопутствующих гидротермических характеристик

Код площадки наблюдений;
Почва, ценоз;
Дата измерения;
Эмиссия CO_2 из почв (г С / м² сут);
Температура почвы (°C) (глубина 5 см);
Весовая влажность почвы (%);
Объемная влажность почвы (об. %);
Температура воздуха (°C);
Высота снега (см);
Примечания (наличие снега, дождя, состояние снежного покрова и пр.).

Лист 3: Обобщенные данные по экспериментальному определению скорости эмиссии CO_2 из почв и расчетные оценки суммарных годовых потоков CO_2 на основе разных подходов

Код площадки наблюдений;
Почва, ценоз;
Среднемесячная эмиссия CO_2 из почв (г С / м² сут) и месячные потоки CO_2 из почв (г С / м² мес) (опционно: январь — декабрь);

Среднемесячная эмиссия CO_2 из почв в июле ($\text{г С} / \text{м}^2 \text{сут}$);
 Средняя эмиссия CO_2 из почв за летний период, июнь-август ($\text{г С} / \text{м}^2 \text{сут}$);
 Средняя эмиссия CO_2 из почв за вегетационный период ($\text{г С} / \text{м}^2 \text{сут}$);
 Сезонные (зима, весна, лето, осень) потоки CO_2 из почв ($\text{г С} / \text{м}^2 \text{сезон}$);
 Годовой поток CO_2 из почв ($\text{г С} / \text{м}^2 \text{год}$);
 Оценка доли летнего сезона в общей годовой эмиссии CO_2 из почв на основе среднегодовой температуры воздуха, C_s (%);
 Оценка годового потока CO_2 из почв по величине летнего потока CO_2 из почв и доле C_s ($\text{г С} / \text{м}^2 \text{год}$);
 Оценка годового потока CO_2 из почв средней интенсивности эмиссии CO_2 из почв в период со среднесуточной температурой выше 5°C ($\text{г С} / \text{м}^2 \text{сут}$);
 DT_5 — продолжительность теплого периода со среднесуточной температурой выше 5°C (дней);
 Доля гетеротрофного (микробного дыхания) — экспериментальная или расчетная;
 Годовое микробное дыхание почв ($\text{г С} / \text{м}^2 \text{год}$);
 Q_{10} — температурный коэффициент для периода $T_p > 1^\circ\text{C}$;
 SR_{10} — референсное значение для эмиссии CO_2 из почв на основе Q_{10} ;

Лист 4: Метеорологические индексы для площадок наблюдений (по данным ближайшей метеостанции)

MAT — среднегодовая температура ($^\circ\text{C}$);
 ST_{5-9} — сумма среднемесячных значений $T_{\text{возд}}$ с мая по сентябрь ($^\circ\text{C}$);
 ST_{5-8} — тоже с мая по август ($^\circ\text{C}$);
 ST_{6-8} — тоже с июня по август ($^\circ\text{C}$);
 $SumT_{10}$ — сумма среднесуточных температур выше 10°C ($^\circ\text{C}$);
 $SumT_5$ — то же для 5°C ($^\circ\text{C}$);
 $SumT_0$ — то же для 0°C ($^\circ\text{C}$);
 MAP — среднегодовое количество осадков (мм);
 SP_{5-9} — сумма осадков с мая по сентябрь (мм);
 SP_{5-8} — тоже с мая по август (мм);
 SP_{6-8} — тоже с июня по август (мм);
 $Prec_{10}$ — сумма осадков при среднесуточной температуре выше 10°C (мм);
 $Prec_5$ — то же для 5°C (мм);

Prec_0 — то же для 0 °C (мм);
 НТС₆₋₈ — гидротермический коэффициент Селянинова за летний период (июнь–август) — отношение суммы осадков (мм) к сумме температур за этот же период, деленное на 10;
 НТС₁₀ — гидротермический коэффициент (отношение Prec₁₀ к SumT₁₀, деленное на 10) за период с среднесуточной температурой выше 10 °C;
 НТС₅ — то же для 5 °C;
 НТС₀ — то же самое для 0 °C;
 WI₅₋₉ — индекс влажности для периода с мая по сентябрь, который представляет собой $\lg \left(\frac{SP_{5-9}}{ST_{5-9}} \right)$;
 WI₅₋₈ — тоже с мая по август $\lg \left(\frac{SP_{5-8}}{ST_{5-8}} \right)$;
 WI₆₋₈ — тоже с июня по август $\lg \left(\frac{SP_{6-8}}{ST_{6-8}} \right)$;
 IndW — индекс влажности, рассчитанный как отношение SumT₀ к MAP;
 DT₁₀ — Продолжительность теплого периода со среднесуточной температурой выше 10 °C (сут);
 DT₅ — то же для 5 °C (сут);
 DT₀ — то же для 0 °C (сут);

Лист 5 — Основные почвенные характеристики для слоев 0–10 и 10–30 см

Код площадки наблюдений

Тип почв

Ценоз (формула древостоя для лесных площадок)

Содержание физической глины

Название текстуры почв по Качинскому

Соотношение песок:ил:глина

Плотность почвы, г/см³

Значение pH (водная и/или солевая вытяжки)

Содержание Сорг и/или Собщ (г С/кг почвы) с указанием метода определения

Содержание Нобщ (г N/кг почвы) с указанием метода определения

Отношение C/N

Запас C (кг C/м²)

Запас N (кг N/м²)

Содержание микробного углерода, Смик (метод СИД)

Для лесных площадок (дополнительно)

Мощность подстилки, см

Масса подстилки, г /м²

рН подстилки (водная вытяжка)

Содержание Сорг (г С/кг материала) с указанием метода определения

Содержание Нобщ (г N/кг материала) с указанием метода определения

(A Global Database of Soil Respiration Data, Version 5.0 (ornl.gov); Jian, J., R. Vargas, K.J. Anderson-Teixeira, E. Stell, V. Herrmann, M. Horn, N. Kholod, J. Manzon, R. Marchesi, D. Paredes, and B.P. Bond-Lamberty. 2021. A Global Database of Soil Respiration Data, Version 5.0. ORNL DAAC, Oak Ridge, Tennessee, USA. <https://doi.org/10.3334/ORNLDAAC/1827>

| | | |
|------------------------|----------------------|---------------------|
| 1. Record_number | 32. Soil_silt | 63. GPP |
| 2. Entry_date | 33. Soil_clay | 64. ER |
| 3. Study_number | 34. MAT | 65. NEP |
| 4. Author | 35. MAP | 66. NPP |
| 5. Duplicate_record | 36. PET | 67. ANPP |
| 6. Quality_flag | 37. Study_temp | 68. BNPP |
| 7. Contributor | 38. Study_precip | 69. NPP_FR |
| 8. Country | 39. Meas_method | 70. TBCA |
| 9. Region | 40. Collar_height | 71. Litter_flux |
| 10. Site_name | 41. Collar_depth | 72. Rootlitter_flux |
| 11. Site_ID | 42. Chamber_area | 73. TotDet_flux |
| 12. Study_midyear | 43. Time_of_day | 74. Ndep |
| 13. YearsOfData | 44. Means_interval | 75. LAI |
| 14. Latitude | 45. Annual_coverage | 76. BA |
| 15. Longitude | 46. Partition_method | 77. C_veg_total |
| 16. Elevation | 47. Rs_annual | 78. C_AG |
| 17. Manipulation | 48. Rs_annual_err | 79. C_BG |
| 18. Manipulation_level | 49. Rs_interann_err | 80. C_CR |
| 19. Age_ecosystem | 50. Rlitter_annual | 81. C_FR |
| 20. Age_disturbance | 51. Ra_annual | 82. C_litter |
| 21. Species | 52. Rh_annual | 83. C_soilmineral |
| 22. Biome | 53. RC_annual | 84. C_soildepth |
| 23. Ecosystem_type | 54. Rs_spring | 85. Notes |
| 24. Ecosystem_state | 55. Rs_summer | |
| 25. Leaf_habit | 56. Rs_autumn | |
| 26. Stage | 57. Rs_winter | |
| 27. Soil_type | 58. Rs_growingseason | |
| 28. Soil_drainage | 59. Rs_wet | |
| 29. Soil_BD | 60. Rs_dry | |
| 30. Soil_CN | 61. RC_seasonal | |
| 31. Soil_sand | 62. RC_season | |