



**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭМИССИИ CO₂ ИЗ ПОЧВ КАМЕРНЫМ МЕТОДОМ
В РАЗЛИЧНЫХ ТИПАХ ЭКОСИСТЕМ
(краткая инструкция)**



Предисловие

Предлагаемое вашему вниманию краткое руководство по определению эмиссии CO₂ из почв посвящено вопросам использования разных модификаций метода закрытых камер (Closed Chamber Method), который на настоящий момент наиболее распространен в мировом научном сообществе. Руководство содержит практические рекомендации по использованию камерного статического метода, включающего периодический отбор газовых проб из камер шприцами в полевых условиях с последующим определением в них концентрации CO₂ в лаборатории, а также камерного динамического метода с использованием модифицированных портативных инфракрасных газоанализаторов на основе приборов производства AZ Instrument, Измеркон или других возможных аналогов. Использование портативных инфракрасных анализаторов ведущих зарубежных производителей, таких как Li-COR, PP system, Picarro и других мы не рассматриваем, так как эти приборы комплектуются подробными инструкциями для их использования.

Настоящее пособие имеет своей целью максимально унифицировать процедуру определения эмиссии CO₂ из почв, что является ключевым условием при создании и поддержании единой действующей сети измерений эмиссии CO₂ на территории РФ в рамках реализации Важнейшего инновационного проекта государственного значения *«Разработка системы наземного и дистанционного мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов на территории Российской Федерации, обеспечение создания системы учета данных о потоках климатически активных веществ и бюджете углерода в лесах и других наземных экологических системах»*.

Авторы пособия: Курганова И.Н., Гончарова О.Ю., Замолодчиков Д.Г., Карелин Д.В., Лопес де Гереню В.О., Мошкина Е.В., Осипов А.Ф., Хорошаев Д.А.

Пушино, 2023 г.

ПОДГОТОВИТЕЛЬНЫЙ ЭТАП

Выбор участка и частота измерений

Место для проведения наблюдений за эмиссией CO_2 из почвы (далее — площадка) выбирают в центре наиболее репрезентативного участка той площади (биогеоценоза, экосистемы), где планируется проводить измерения (как правило, в доминирующем элементе растительной мозаики). Площадка должна быть относительно ровной и довольно типичной в отношении растительного покрова для того чтобы охарактеризовать экосистему в целом. Учитывая высокую пространственную неоднородность эмиссии CO_2 из почв, на каждой отдельной площадке наблюдений рекомендуем установить не менее 5, а лучше 10 камер. Их можно расположить по трансекте 10–20 м (или более), с расстоянием между камерами 2–4 м (или более). Площадка наблюдений должна соответствовать определённому типу экосистемы, включая разные элементы мезо- и микрорельефа в её пределах. Например, в тундро-

вой экосистеме отдельные площадки можно расположить на вершинах бугров и в пространстве между ними. Подразумевается, что измеряемый поток CO_2 из почв характеризует 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. Если такая возможность отсутствует, то зеленые части травянистых растений перед установкой камер срезают на уровне поверхности почвы. Лесную подстилку (или свежий опад в осенний период) с поверхности почвы не удаляют. Подстилку аккуратно подрезают острым ножом или ножницами по периметру основания для предотвращения её замятия внутрь почвы при врезании камеры. Измерительные камеры в лесных экосистемах желательно устанавливать в пристволовой части, под кронами и в



Рисунок 1. Расположение камер по трансекте в агроценозе и лесу на серой лесной почве (Московская область). Фото И.Н. Кургановой, Д.В. Сапронова (ИФХиБПП РАН).

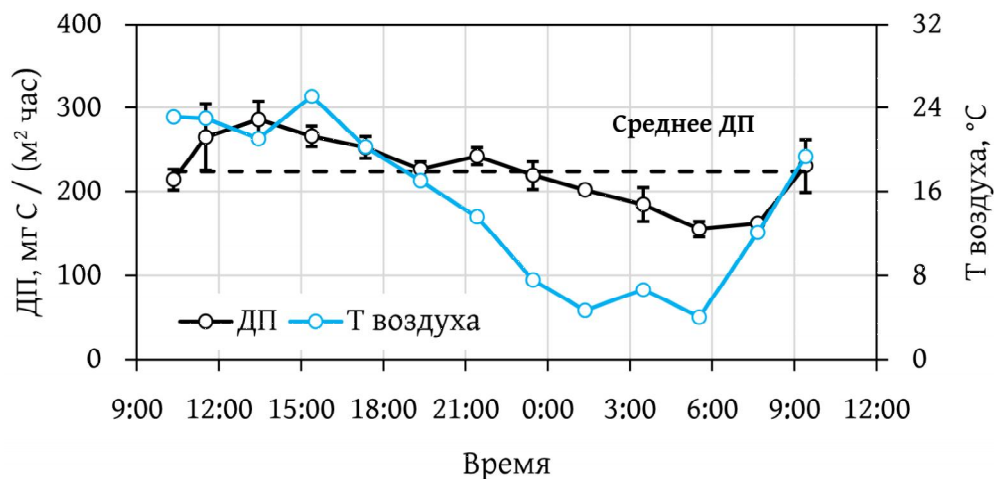


Рисунок 2. Пример определения внутрисуточной динамики дыхания почвы под луговой растительностью в южном Подмоскowie в ясную погоду 18-19 июня. Данные В.О. Лопес де Гереню, А.В. Почикалов (ИФХиБПП РАН).

межкрановом пространстве. Если крона дерева малого диаметра (например, у сосны), то пристволовую и крановую зоны можно объединить.

Следующий важный вопрос — когда проводить измерения эмиссии CO_2 из почв. Необходимо, чтобы точечные (мгновенные) измерения максимально соответствовали среднесуточным значениям эмиссии CO_2 из почв. Оптимальным решением для выбора времени отбора проб следует признать проведение круглосуточных измерений эмиссии CO_2 из почв каждые 1.5–2 часа в ясные дни и каждые 3 часа — в пасмурные, с тем чтобы выбрать то время, когда интенсивность выделения CO_2 из почв будет наиболее близка к среднесуточным значениям этого параметра (рис. 2). Это время может не совпадать в разных экосистемах, поскольку зависит от внутрисуточной динамики температуры почвы, а также от особенностей ассимиляции углерода растениями в течение суток. Однако, далеко не всегда получается организовать круглосуточные измерения. В этом случае нужно ориентироваться на общие закономерности. Считается, что при выраженной внутрису-

Планирование работы. Для правильного планирования измерений рекомендуем провести предварительные исследования на местности. При этом следует оценить необходимое количество площадок наблюдений, расстояние между ними, транспортную доступность и прочие особенности местности. Планирование последовательности измерений и времени, необходимого для проведения работ складывается из следующих составляющих: установку почвенных камер, измерение потока CO_2 , вспомогательные манипуляции, измерение сопутствующих параметров среды (температуры воздуха и почвы, влажность почвы и пр.), перемещение между пробными площадями. Практика показывает, что подготовленный специалист способен за 4 часа без учета времени на дорогу провести наблюдения на 3–6 компактно расположенных (не более 10–15 мин. пешего хода) пробных площадях при 5 измерительных камерах на каждой площадке наблюдений.

Выбор репрезентативных участков. Репрезентативный участок для организации регулярных наблюдений выбирается на основе анализа картографических материалов и осмотра местности. Точки опробования желательнее располагать на выровненных участках, избегая нетипичных неровностей рельефа, а также микроповышений и микропонижений, если их анализ не входит в план обследования. Не стоит располагать точки опробования на участках с чрезмерно густой или разреженной растительностью, в также на участках, резко отличающихся по своему виду от окружающего пространства. Желательно расположить точки измерения потока CO_2 на всех характерных элементах экосистемы.

Для исключения последствий регулярного посещения ПП и рекреационной нагрузки (вытаптывание, нарушение почвенного покрова, уплотнение почвы) по возможности следует предусмотреть наличие мостков.



Рисунок 4. Пример нарушения пробной площади по мониторингу за потоками CO_2 (слева), Пример организации системы мостков на пробной площади по мониторингу за потоками CO_2 (справа). Фото Е.В. Мошкиной, А.В. Мамай (ИЛ КарНЦ РАН).

точной динамике эмиссии CO_2 величины близкие к среднесуточным можно наблюдать дважды в сутки — утром и вечером. Точное время переходов зависит от широты местности и сезона. В тундровой зоне можно принять, что с мая по июль измерения оптимально проводить в 8 и 19 ч по местному времени, а с июля по октябрь измерения более корректно делать в 9 и 20 ч. В умеренных широтах эмиссию CO_2 из почв следует измерять с 8 до 11 и с 17 до 20 ч, когда её скорость наиболее близка к среднесуточной. В холодный период года внутрисуточной динамики дыхания почвы практически не отмечается, поэтому время измерений в этот период не играет существенного значения.

Многолетний опыт проведения измерений в различных экосистемах умеренно-континентального климата 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 (8–10 ч), 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, а также в лесных насаждениях с со-

мкнутостью крон более 70% измерения эмиссии CO_2 из почв можно проводить в течение всего светового дня (И.А. Сморкалов, личное сообщение).

Как часто необходимо проводить наблюдения? Анализ данных по определению ежедневной динамики эмиссии CO_2 из почв, проведенной в ИФХиБПП РАН в начале 1990-х А.А. Ларионовой показал, что еженедельное проведение измерений эмиссии CO_2 из почв хорошо соответствует среднемесячным значениям, полученным при проведении ежедневных измерений. Таким образом, измерение эмиссии CO_2 из почв еженедельно или подекадно (3–5 раз в месяц) позволит получить наиболее реалистичные оценки сезонных и годовых потоков CO_2 из почв. Однако часто, из-за удаленности площадок наблюдений, еженедельные определения эмиссии CO_2 из почв являются малореализуемыми. Поэтому, мы рекомендуем измерения проводить не реже 2-х раз в месяц и желательно при разных погодных условиях. В таких случаях также необходимо устанавливать автоматические датчики регистрации температуры почвы (термохроны) на глубине 5 см, которые могут быть очень полезны для дальнейших расчетов эмиссии CO_2 из почв с использованием температурных коэффициентов.

ПРОВЕДЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ

Для метода закрытых камер имеет-ся две общие техники измерения пото-ка CO_2 из почвы: метод статических и динамических камер. Второй подход, в отличие от первого, предполагает фор-мирование замкнутого циркулирующе-го потока воздуха между камерой и измерительной ячейкой анализатора.

Метод закрытых статических камер с отбором газовых проб

Модификацию камерного метода, подразумевающую отбор газовых проб шприцами, можно использовать круг-логодично. Особую актуальность дан-ный метод приобретает в зимний период, когда работа с инфракрасными газоанализаторами затруднена и не всегда надежна. Отбор газовый проб шприцами в полевых условиях более производителен и поэтому предпочти-телен тех в случаях, когда необходимо провести большое количество измере-ний в ограниченный период времени. Подготовленный специалист в течение часа может провести отбор проб из 30 и более стационарно установленных ка-мер, если они расположены недалеко друг от друга, и затем в лаборатории определить концентрацию CO_2 в газо-

вых пробах с использованием хромато-графа или инфракрасного газоанализатора.

В последние годы широкое распро-странение получили камеры, изготов-ленные из пластиковых канализацион-ных труб диаметром 110 мм и заглушек к ним. В теплый сезон обычно исполь-зуют стационарно установленные тру-бы высотой 15–25 см, зимой — от 40 см и выше, которые при необходимости (по мере увеличения высоты снежного покрова) наращивают дополнительны-ми секциями по 20–30 см. Герметич-ность установки крышки на камеру во время проведения замера осуще-ствляется с использованием резиновой манжеты-уплотнителя, слоя силикона или пенополиуретанового кольца.

В бесснежный период года в каче-стве камер также можно использовать небольшие стальные цилиндрические сосуды-изоляторы, высотой около 15 см и диаметром 10 см. Такие камеры-изо-ляторы изготавливаются на заказ. На почвах легкой текстуры или торфяных почвах в качестве камер зачастую ис-пользуют металлические консервные банки со срезанной крышкой и



Рисунок 3. Установка измерительных камер в лесном, луговом и агроценозах (Московская область). Фото И.Н. Кургановой, В.О. Лопес де Гереню (ИФХиБПП РАН).



Рисунок 4. Два типа измерительных камер для определения эмиссии CO_2 из почвы в зимний период (Московская область). Фото И.Н. Кургановой, Д.В. Сапронова (ИФХиБПП РАН).

объемом от 0.8 до 1.5 литров. В верхнюю часть таких камер необходимо поместить резиновую мембрану для отбора газовых проб (рис. 3). Металлические камеры врезаются в почву на глубину 3–4 см непосредственно перед определением интенсивности дыхания почв. Тонкие стенки сосуда и острая кромка минимизируют нарушения почвы при врезании позволяя проводить измерения сразу после установки их в почву. При аккуратности исследователя и определенном навыке, который приходит довольно скоро, концентрация CO_2 в нулевой пробе будет близка к концентрации CO_2 в воздухе, что как раз свидетельствует о минимальных нарушениях при установке камер.

Отбор газовых проб из камер производят медицинским пластиковым шприцем с резиновым 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, не-

посредственно перед взятием газовой пробы из камеры-изолятора. Возможно использование одноразовых вакуетированных. Если предполагается измерение концентрации CO_2 с помощью ИК-анализатора, недолгое (до суток) хранение газовых проб допускается и в шприцах без снятия иглы. Для обеспечения изоляции кончика иглы можно использовать небольшой кусочек силиконовой резины, помещенный в окончание предохранительного колпачка иглы или специальных заглушек.

Сразу после установки металлической камеры или после закрытия ПВХ-камеры крышкой, необходимо взять нулевую газовую пробу. Для забора газовой пробы необходимо сделать несколько прокачиваний (3–5 раз) внутрикамерного воздуха шприцем, равномерно забирая воздух из камеры и затем возвращая его, не вытаскивая шприца. Интервал отбора газовых проб и общее время экспозиции надо устанавливать опытным путем. Они будут зависеть от многих причин: времени года, типа экосистемы, почвенной текстуры и др. Для южного Подмосковья, в теплый 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.

В полевом дневнике необходимо регистрировать интервал отбора проб, температуру воздуха и почвы на глубине 5 см и высоту камер над поверхностью почвы (и снега в холодных период), а также особенности погодных условий (облачность, скорость ветра, осадки и др.), что может быть полезным при дальнейшей работе с данными.

В лаборатории анализ газовых проб проводят на газовом хроматографе (напр. Кристалл-5000) или с помощью ИК-газоанализаторов (напр. LI-COR 830). Определение концентрации CO_2 во флаконах (или шприцах) желательно проводить в день отбора проб. В ИК-газоанализатор вводят всю газовую пробу, находящуюся в шприце. Объем газовой пробы должен быть заведомо выше внутреннего объема анализатора. Для введения газовых проб в хроматограф обычно используют инсулиновый шприц объемом 1 мл.

Метод закрытых динамических камер

Метод динамических закрытых камер подразумевает проведение измерения скорости эмиссии CO_2 из почв в полевых условиях с использованием портативных инфракрасных газоанализаторов. Почвенная камера и газоанализатор создают закрытый контур внутри которого происходит циркуляция воздуха с заданной скоростью. В последние годы наиболее популярным становится использование модифицированного портативного газоанализа-

тора закрытого типа, созданного на основе серийного промышленного инфракрасного газоанализатора AZ (AZ Instrument, Тайвань) или его аналогов с диапазоном измерения концентраций от 0 до 5000 ppm (частей на миллион), разрешением 1 ppm и погрешностью в рабочем диапазоне ± 30 ppm. Анализатор работает в пределах от -10 до $+35$ °C, а с подогревом в корпусе с помощью лампочки и с утеплителем он может работать при температуре до -30 °C. Для поддержания циркуляции внутри замкнутого воздушного контура используется встроенная микропомпа. Емкости полностью заряженного аккумулятора емкостью 7 Ач хватает на 12–24 ч автономной работы в зависимости от температуры среды и общего времени использования помпы.

Измерительная система представляет собой соединенные непроницаемыми для CO_2 шлангами анализатор и изолятор из труб ПВХ (рис. 4). Изолятор в рабочем режиме герметично врезан в почву. Соединение с анализатором обеспечивается крышкой, через которую поток воздуха под действием помпы проходит через изолятор, поступая затем в анализатор (рис. 4). Опытным путем установлено, что время единичной экспозиции при измерениях потоков CO_2 должно составлять не менее 3 минут. При слабых потоках (зимний период, слишком плотная или малопродуктивная по дыханию почва), необходимы период экспозиции может возрастать до 6 мин, редко больше.

После установки камер-изоляторов на площадке включаются прибор и помпа. Перед началом измерений прибор рекомендуется откалибровать по воздуху. После запуска прибора и стабилизации значений концентрации CO_2



Рисунок 5. Анализатор CO_2 закрытого типа, созданный на основе промышленного инфракрасного газоанализатора тайваньского производителя AZ Instrument (Карелин и др., 2015)

воздуха крышка вставляется в базу (с предварительным проветриванием камеры возвратно поступательными движениями с использованием подручных предметов (папки, шапки, блокнота и пр.). Дышать при этом необходимо осторожно и желательнее в сторону, противоположную от камер и прибора. Далее следует подождать с включенной помпой около 1-2 мин для установления равновесия в измерительной системе. Если по истечении этого времени показания прибора начали равномерно и без скачков расти, то в полевой дневник нужно записать значение концентрации в нулевой момент времени, одновременно запустив секундомер. Значения концентрации CO_2 необходимо записывать через каждые 20-60 секунд в течение 2-5 минут (не менее 5 отсчетов за измерение. Важным критерием качества измерений является сходимост отсчетов, получаемых в течение одного измерения. Наличие резких скачков (например, ряд 500, 505, 540, 501, 600 ppm) либо заметных трендов (ряд 500, 600, 650, 620, 610 ppm) в именовании концентрации CO_2 между отсчетами свидетельствует о проблемах в измерительной

системе. Например, это может быть нарушение герметичности, обрыв контакта вентилятора, отказ прибора.

После окончания измерения крышка снимается с камеры с включенной помпой и система прибора с шлангами проветривается. Затем вся процедура повторяется на других камерах. Желательно чтобы крышки измерительных камер были оснащены вентилятором.

Необходимо (и очень важно!) измерить и записать высоту каждой камеры-изолятора, чтобы рассчитать ее объем. При этом следует помнить, что каждый прибор обладает своим индивидуальным внутренним объемом. Обычно внутренний объем каждого прибора обозначен на нем изготовителем и варьирует между отдельными экземплярами от 230 до 250 мл. Если такие данные не приведены, то его следует оценить самостоятельно. Дополнительно следует рассчитать объем соединительных трубок. Эти величины надо суммировать с рассчитанным объемом камеры для получения общего объема измерительной системы.

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.

Важным моментом при проведении измерений является предварительное ожидание после вкапывания камер. Если камеры устанавливаются на почву временно, при каждом измерении (такой вариант, например, обычен для агроэкосистем или городских почв), то период предварительного ожидания должен составлять не менее 2 ч. Это позволяет избежать эффекты от повышенных значений эмиссии в результате прямого выдавливания CO_2 из почвы камерой при вкапывании, или травмирования корней.

Особенности измерения эмиссии CO_2 из почв в зимний период

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. Предложенная нами модификация камерного метода, основанная на использовании стационарно врезанных в почву (до наступления заморозков) прямоугольных стальных или ПВХ оснований, высоту которых затем наращивали 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.

В последние годы в холодное время

года также становится популярным использование ПВХ-оснований и дополнительных секций для увеличения их высоты при необходимости (рис. 5). Измерение потоков CO_2 в зимний период зачастую осложняется наличием высокого снежного покрова, в связи с чем содержание твердой фазы (льда) в снеге в течение зимнего периода может изменяться в широких пределах: от 10 до 60 объемных процентов, хотя обычно оно находится в пределах от 15 до 35% об. Поэтому, 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 объема воздуха в камере, необходимо учитывать плотность и высоту снежного покрова в камере (она обычно ниже, чем уровень снега вне камеры). Для этого необходимо периодически (не реже одного раза в месяц, а при резких сменах погоды, например, чередующихся оттепелях и морозах — чаще) брать пробы снега (керна на всю высоту снега) на площадке измерения 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.

Расчет объема воздуха в камере, ча-

стично заполненной снегом, происходит по следующим формулам:

$$V_B = V_K - V_{CH} \rho_{CH} / \rho_L, \quad (1)$$

где:

V_B — объема воздуха в камере, частично заполненной снегом, мл;

V_K — объема камеры, мл;

V_{CH} — объем снега в камере, мл;

ρ_{CH} — плотность снега, г/см³;

ρ_L — плотность льда, ~0.92 г/см³

Объем снега в камере рассчитывается, как сумма цилиндрического и выпуклого (вогнутого) сегментов. Высота цилиндрического сегмента определяется как разность высоты камеры и среднего значения четырех измерений от верхнего края камеры до снега:

$$H_{CH} = H_K - h_{1-4}, \quad (2)$$

где:

H_K — высота камеры, см;

h_{1-4} — среднее значение измеренных расстояний от верхнего края камеры до снега, см.

Объем выпуклого сегмента:

$$V_{сегм} = \pi R h_{сегм}^2 - \frac{1}{3} \pi h_{сегм}^3, \quad (3)$$

где:

R — радиус камеры, см;

$h_{сегм}$ — высота сегмента (разница между измерениями в центре камеры и вдоль стенок), см.

Следует отметить, что описанный выше способ определения эмиссии CO₂ из почв прошел многолетнюю апробацию для почв разной текстуры и разного землепользования. Он пригоден для измерений в круглогодичном режиме и позволяет получать качественные и сравнимые данные. Поскольку интенсивность выделения CO₂ из почв в разных регионах различается, то для

каждой экосистемы необходимо подбирать индивидуально оптимальное время экспозиции и интервал отбора газовых проб.

Изготовление почвенных камер

В качестве почвенных камер удобно использовать имеющиеся в продаже промышленные пластиковые трубы: полипропиленовые (PP) или из непластифицированного поливинилхлорида (НПВХ). Трубы и крышки нужно подбирать индивидуально, чтобы крышка входила в раструб плотно и без щелей. Если крышка входит не плотно, то стоит использовать уплотнительную манжету. Стоит обратить внимание на качество изготовления труб — они не должны быть тонкостенными и деформированными. Желательно использовать крышки с выступающим краем, за который будет удобно браться при её надевании и снятии.

Край трубы, предназначенный для врезания в почву необходимо заточить любым способом под острым углом. Также на внешней стенке необходимо обозначить глубину врезания: стойким маркером или насечкой. Использование клейких лент для этой цели нецелесообразно из-за их неустойчивости.

Если пробы планируется отбирать шприцами, то в крышке необходимо высверлить отверстие под резиновую пробку. Удобным вариантом будет использование пробок от пенициллиновых флаконов. Отверстие под пробку должно быть на 2–3 мм меньше диаметра пробки. Если диаметр отверстия с внешней стороны крышки будет немного меньше диаметра отверстия с внутренней стороны таким образом, чтобы в отверстии образовался скос стенок, то это позволит пробке сидеть

крепче и не выпадать из отверстия.

Если измерение потока CO_2 из почвы планируется динамическим методом, то в крышке необходимо предусмотреть два фитинга (деталь для соединения нескольких трубок). Лучше использовать готовые фитинги, используемые в пневматических установках, однако их можно сделать и из подручных материалов, например, из пластиковой пипетки или стержня от гелевой

ручки. В этом случае в крышке высверливается отверстие необходимого диаметра, в которое устанавливается отрез пипетки и герметизируется по кругу термоклеем или эпоксидной смолой.

Желательно предусмотреть в крышке небольшое отверстие, закрываемое конической пробкой. При надевании крышки пробка временно вынимается, чтобы лишний воздух из камеры вышел через отверстие.

Дополнительные рекомендации

Из общих рекомендаций можно отметить тот факт, что измерительные камеры или основания, на которые камеры будут установлены, должны врезаться как минимум за 2 часа до начала измерений, так как при этой процедуре происходит нарушение стационарных условий газообмена между почвой и атмосферой. Это может приводить к кратковременному увеличению потока CO_2 из почвы и необходимо время для его стабилизации. По мнению Д.Г. Замолотчикова камеры должны врезаться как минимум за 6 часов до начала измерений.

Измерение общего почвенного дыхания почвы предполагает удаление зеленых частей растений внутри камер-изоляторов. При этом моховой и лишайниковый покров рекомендуется не удалять, т.к. это приводит к резкому изменению условий газообмена между почвой и атмосферой в случае однократных измерений. Если основания камер устанавливаются стационарно, на продолжительное время, то нарушается и температурно-водный режим почвы. Но в этом случае надо отмечать, что измеряется дыхание почвы и напочвен-

ного мохово-лишайникового покрова. Мертвые растительные остатки (опад, подстилка, степной войлок и т.д.) при установке камеры не удаляются.

Если определение почвенного дыхания проводится на лугу с густой растительностью, то перед измерением приходится срезать большое количество травянистых растений. Дыхание корней поврежденных растений значительно изменяется с течением времени (рис. 6). Поэтому необходимо определить промежуток, когда завышение значений после установки камеры будет нивелировать снижение эмиссии CO_2 , обусловленное срезанием растительности.

Во время подготовки к измерениям не стоит разговаривать с коллегами, которые могут находиться рядом, выдыхать воздух в сторону прибора или открытого изолятора и не курить: это может помешать измерениям и даже повредить датчик анализатора.

Во время измерений ни в коем случае нельзя ходить или «топтаться» около основания камеры: это может искусственно усилить поток CO_2 из почвы. Вообще надо помнить, что измерение эмиссии – процесс достаточно

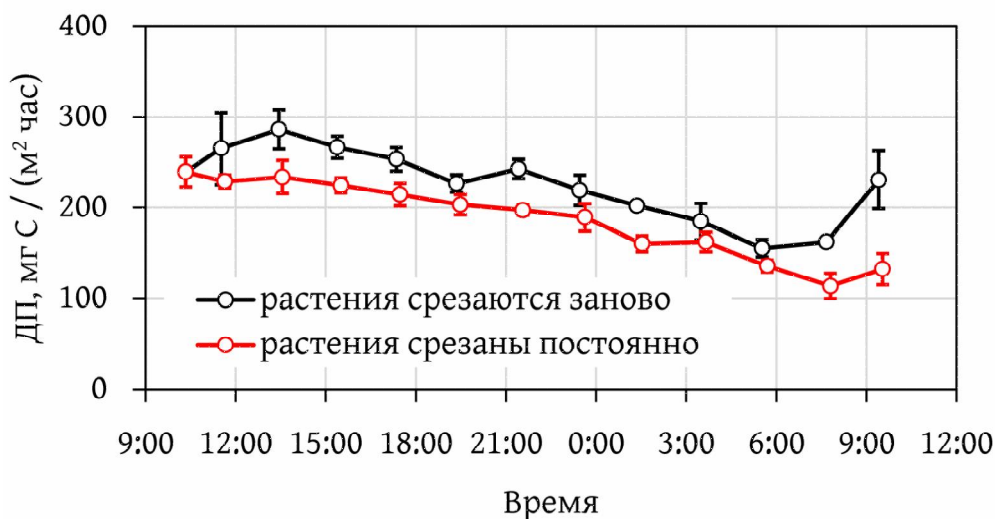


Рисунок 6. Эффект удаления растительного покрова на дыхание почвы в луговом биоценозе Приокско-Террасного биосферного заповедника (Московская область) в ясную погоду 18-19 июня 2009 г. Данные В.О. Лопес де Гереню (ИФХиБПП РАН), А.В. Почикалова (ИГ РАН).

деликатный и не терпит небрежности, невнимательности или посторонних разговоров.

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. Калибровать прибор на основе датчика AZ потому лучше только после окончания прогрева. Только затем можно начинать работу.

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. Калибровка приборов на базе газоанализатора AZ производится по окружающему хорошо перемешиваемому ветром воздуху снаружи помещений. Предполагается, что концентрация CO_2 в таком воздухе составляет около 400 ppm. Ежедневная калибровка обязательна перед самым началом измерений, после прогрева

прибора.

Если в процессе измерений придется сделать технический перерыв, то лучше прибор не выключать и оставить его снаружи. Прибор обычно вообще не выключают до окончания измерений в течении дня.

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 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. В условиях, когда источники электричества недоступны или находятся далеко, не лишним будет иметь с собой запасную батарею.

Рекомендуется не выключать помпу во время каждого 3 мин измерения, и отключать ее только между отдельными

ми измерениями или при перемещении от одного биотопа к другому. Необходимо, собираясь на измерения, своевременно заряжать батарею, а также иметь запасной вариант аккумулятора.

Следует иметь в виду, что шланги (трубки, воздухопроводы) должны быть соединены с крышкой и газоанализатором постоянно и очень плотно. Если их каждый раз снимать, то на концах они постепенно потеряют упругость и герметичность соединения. Длина их не должна быть слишком большой или слишком короткой. Оптимально – около 1 м каждый. Материал шлангов (трубок) также важен, поскольку любой материал, из которого делают гибкие трубопроводы так или иначе пропускает CO_2 . Лучше всего использовать гибкие и упругие полиэтиленовые трубки 3-4 мм (внутренний диаметр). Такие трубки используются всеми мировыми производителями газоанализаторов. Они температурно-устойчивы (это важно при зимних измерениях) и меньше других гибких полимеров пропускают газы. Вместо них можно использовать трубки нужных диаметров из других плотных, но достаточно гибких и упругих современных полимеров (тайгон и проч.). При выборе важно чтобы материал трубок был одновременно достаточно плотным (с этим связана его проницаемость для газов), но при этом трубки должны упруго гнуться (но не перегибаться на сгибах).

Определение температуры и влажности почвы

Определение температуры почвы и воздуха во время измерения эмиссии CO_2 из почв удобно осуществлять с помощью электронных термометров, термомпара которых расположена в

металлическом щупе. Щуп погружают в почву на глубину 5 см. Температуру воздуха нужно измерять в тени. Если измерения проводятся на лугу или на пашне, то проще всего использовать тень самого наблюдателя или организовать ее с помощью зонтика. Частота измерений температуры воздуха зависит от ее внутрисуточной динамики. Обычно при 5–10 точках измерений в одном биотопе, достаточно измерять ее в начале и в конце этой серии. Однако если измерения происходят рано утром или поздно вечером, а также при контрастных температурных условиях (например, горные или пустынные экосистемы), то это придется делать при каждом единичном измерении.

Влажность почвы (обычно используется т.н. объемная влажность ($\text{см}^3/\text{см}^3$, т.е. объем воды в единице объема почвы), которая меняется в диапазоне от 0 до 100%) измеряют с помощью электронного влагомера профессионального уровня (например, влагомер HH2) или весовым методом. Для измерения влажности почвы весовым методом отбирают образцы почвы из слоя 0–5 см (в 3–5 повторностях) пробоотборником известного объема и помещают их взатем в бюксы или пакеты. Образцы почвы затем высушиваются до абсолютно сухой массы (24 часа при $105\text{ }^\circ\text{C}$) и взвешиваются в лаборатории. Также рекомендуется определять влажность лесной подстилки и травяного войлока в луговых и степных биоценозах.

При измерении влажности почвы электронным влагомером следует обратить внимание на тот факт, что они измеряют объемную влажность почвы, которая зависит от плотности сложения. В условиях естественного

варьирования почвенного покрова рекомендуется проводить не менее 5–10 измерений для получения усреднённой величины влажности почвы. Если камеры устанавливаются не на постоянной основе, а переносятся после каждого измерения, то температуру и влажность почвы рекомендуется определять внутри камеры после завершения определения эмиссии CO₂ из почвы. Это позволит более точно оценить связь эмиссии CO₂ с гидро-термическими характеристиками почвы. Для оснований камер, которые установлены стационарно, лучше это делать снаружи от основания (но как можно ближе к нему), чтобы избежать стимулирующего влияния на эмиссию отверстий в почве от датчиков.

Полевой дневник

Полевой дневник должен иметь жесткую износостойкую обложку и качественную не гляцевую плотную бумагу. Дневник желательно предварительно расчертить для фиксации всех необходимых параметров. Рекомендуются варианты устойчивого к влаге дневника для полевых исследований (<https://www.riteintherain.com/>).

Что взять с собой в поле?

Измерение влажности почвы, температуры и т.д.

Влагомер электронный с запасной батареей, или бюксы или пакеты («зиплок») + мерная лопатка или пробоотборник для почвенных проб;

Электронный термометр (при наличии — анемометр, барометр).

Измерение потоков CO₂ из почвы

А. с окончанием на газовом хроматографе:

Шприцы для отбора газовых проб (2–3 штуки);

Запасные иголки к шприцам;

Вакутейнеры в прочных контейнерах (по количеству отбираемых газовых проб, плюс 2–3 запасных);

Камеры (не менее 5 штук).

Б. с окончанием на инфракрасном газоанализаторе:

Шприцы с резиновыми заглушками (не менее 3 шт. на одну камеру);

Контейнеры для шприцев;

Запасные шприцы (2–3 штуки);

Запасные иголки к шприцам;

Камеры (не менее 5 штук).

В. с помощью газоанализатора in situ

Газоанализатор;

Запасной аккумулятор;

Камеры (не менее 5 штук);

Герметичная крышка + соединительные трубки.

Дополнительно при себе иметь

Одежда, обувь и головной убор, соответствующие погоде и условиям работы;

Полевой дневник;

Карандаш + ручка;

Нож для врезания камер в почву;

Ножницы хозяйственные для срезания травы;

Линейка (или мерная рулетка);

Перчатки;

Запасные пакеты.

Алгоритм измерений методом закрытых статических камер

1. Предполагается, что камеры/основания были врезаны в почву, а поток CO_2 вернулся в равновесное состояние. Если есть возможность, то камеры рекомендуется установить вечером, чтобы утром начать измерения;

2. Надеваем крышку на врезанную камеру;

3. Нулевая проба воздуха берется незамедлительно. Иглой шприца необходимо проколоть пробку, после чего несколькими полными движениями поршня (одинаковым количеством, 3–4 раза, для всех камер) воздух внутри камеры перемешивается. Последним движением поршня отбирается проба воздуха для последующего анализа в лаборатории. На шприц надевается колпачок с резиновой пробкой, которая должна закрыть отверстие на кончике иглы. Если пробы воздуха планируется анализировать на хроматографе, то содержимое шприца переносится в предварительно вакуумированные флаконы;

4. Пп. 2–3 повторяются для всех повторностей (камер) в ряду через выбранные фиксированные промежутки времени. Например, каждая следующая нулевая проба отбирается через 1 минуту. Таким образом, если на площадке имеется 5 повторностей (врезано 5 камер-изоляторов), и мы принимаем отбор нулевой пробы на первой повторности за отсчет времени, то на 4 минуте будет отобрана нулевая проба на пятой повторности;

5. Когда нулевая проба отобрана на всех повторностях, необходимо выждать фиксированный отрезок времени и начать отбирать первую пробу воздуха, следуя тем же маршрутом и с теми же временными интервалами между повторностями, что и при отборе нулевой пробы. Оптимальным временным интервалом между двумя отборами проб воздуха для скоростей 50–300 мг С/(м² час), типичным для большинства экосистем можно принять 10 мин. Зимой, при низких потоках CO_2 из почвы и увеличении высоты камеры, целесообразно увеличить время экспозиции до 30–60 минут. При очень высоких потоках CO_2 из почвы можно сократить время экспозиции между отборами проб до 5 минут или немного увеличить высоту камеры-изолятора.

Таким же образом отобрать 2 и 3 пробу (итого 4 пробы на камеру). Если наблюдается дефицит времени или количество камер достаточно велико (более 10–15), то можно ограничиться 0, 1 и 2 пробами. Несколько проб нужно, чтобы при расчете использовать то время, которое соответствовало линейному росту концентрации. 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. Но если, например, 1 проба почему-то была неудачной, то при расчете приходится использовать 2 пробу.

6. Шприцы или вакутейнеры необходимо доставить в лабораторию и определить концентрацию CO_2 в пробах на имеющемся газометрическом оборудовании (ячейка с инфракрасным детектором или хроматограф).

7. Для расчета скорости эмиссии CO_2 из почвы (F , мг С м⁻² час⁻¹) используют базовую формулу (без поправки на температуру и давление):

$$F = (a \cdot 60 \cdot V \cdot M[C] \cdot 10000) / (S \cdot t \cdot V_m \cdot 100) \quad (4)$$

где: a [%/мин], V [мл] — объём камеры, 60 — коэффициент перевода a из %/мин в %/час, $M[C]$ [мг/ммоль] = 12 — молярная масса углерода, 10000 — коэффициент перевода площади основания камеры из см² в м², S [см²] — площадь основания камеры, t [час] = 1 — время, для которого рассчитывается поток CO_2 , V_m [мл/ммоль] = 22.4 — молярный объём идеального газа при стандартных условиях, 100 — коэффициент перевода % CO_2 в безразмерные доли.

Алгоритм измерений

методом закрытых динамических камер

1. Предполагается, что камеры/основания были врезаны в почву, а поток CO_2 вернулся в равновесное состояние. Если есть возможность, то камеры рекомендуется установить вечером, чтобы утром начать измерения;

2. Прибор должен быть прогрет и проветрен. Помпа включена. Показания концентрации CO_2 внутри ячейки стабильны и отражать фоновую концентрацию CO_2 в воздухе;

3. В зависимости от конструкции камеры надеваем крышку на врезанную трубу или устанавливаем камеру на основание с водяным затвором;

4. Изменение давления при закрытии почвенной камеры, работа помпы и разность концентраций CO_2 в разных точках приводят к нестабильным показаниям прибора в первое время после замыкания внутреннего пространства системы изолятор-прибор. Концентрация CO_2 должна быть примерно одинаковой по всему объему замкнутой системы, а поток CO_2 из почвы — выйти на устойчивый уровень. Для разных приборов этот «мертвый» отрезок времени индивидуален. Он зависит от скорости работы помпы, объема системы, эффективности перемешивания воздуха, чувствительности и типа измерительной ячейки. Так, для высокоточных проточных измерительных ячеек с продуманной системой перемешивания воздуха это время может составлять 10–20 сек, а для датчиков с диффузионной мембраной достигать 2 мин.

5. После выхода прироста концентрации CO_2 внутри системы на устойчивый уровень необходимо записать нулевую точку и далее делать записи показаний через фиксированные отрезки времени. Фиксация значений концентрации 3–4 точках через 20–60 сек достаточна для качественной аппроксимации прироста концентрации CO_2 внутри системы. Так как при сильном росте концентрации CO_2 его прирост замедляется из-за сокращения градиента концентрации CO_2 между внутрпочвенным воздухом и атмосферой внутри камеры, то при расчетах необходимо учитывать начальный (линейный) прирост. Если прирост концентраций CO_2 в камере очень медленный, то нужно увеличить временные интервалы до тех значений, которые позволят фиксировать достоверные изменения концентраций CO_2 .

6. Для расчета скорости эмиссии CO_2 из почвы (F , $\text{мг С м}^{-2} \text{ час}^{-1}$) используют базовую формулу (без поправки на температуру и давление):

$$F = (a \cdot 60 \cdot V \cdot M[C] \cdot 10000) / (S \cdot t \cdot V_m \cdot 100)$$

Расшифровка множителей приведена выше (4).

Если имеются данные по давлению и температуре, предпочтительно использовать более точную формулу с поправкой на температуру и давление:

$$F = ((a \cdot 60 \cdot V \cdot M[C] \cdot 10000) / (S \cdot t \cdot 100)) \cdot (P / (R \cdot (T + T_K)))$$

где: R [$\text{м}^3 \text{ Па К}^{-1} \text{ моль}^{-1}$] = 8.31446261815324 — универсальная газовая постоянная, T [$^{\circ}\text{C}$] — температура, T_K [$^{\circ}\text{C}$] = 273.15 — коэффициент перевода в градусы Кельвина, P [кПа] — давление. Расшифровка остальных множителей приведена выше (4).

Примечание: при расчетах следует помнить про объем трубок и прибора, который прибавляется к объему камеры.

Приложение

Фрагмент таблицы для расчета скорости эмиссии CO₂ из почв (камерный статический метод)

Дата	Время	Площадка	№ камеры	Высота, см				Т возд. °С	Т почвы °С	W почвы %	W опада %	Время, мин			ppm/мин	Эмиссия CO ₂ мг С / (м ² час)
				1	2	3	Ср.					0	10	20		
<i>Концентрация CO₂, ppm</i>																
01.06.2023	10:30	Луг	1	10.5	12.1	11.6	11.4	24	13.5	12.0		442	1415	2211	88	324
01.06.2023	10:30	Луг	2	12.4	12.1	12.0	12.2	24	15.1	15.5		434	1262	1935	75	293
01.06.2023	10:30	Луг	3	11.8	12.6	12.5	12.3	24	14.6	13.0		437	1026	1604	58	231
01.06.2023	10:30	Луг	4	12.3	11.5	12.5	12.1	24	15.4	14.0		436	1462	2422	99	386
01.06.2023	10:30	Луг	5	12.3	12.0	11.7	12.0	24	15.1	20.0		432	1168	1920	74	287
01.06.2023	11:10	Лес	6	10.9	11.3	11.8	11.3	18.5	10.5	21.0	15.0	488	814	1125	32	116
01.06.2023	11:10	Лес	7	11.5	11.5	13.1	12.0	18.5	12.1	19.0	13.0	500	1015	1523	51	198
01.06.2023	11:10	Лес	8	11.9	11.4	10.7	11.3	18.5	11.6	25.0	9.0	476	1071	1558	54	197
01.06.2023	11:10	Лес	9	10.8	11.8	12.0	11.5	18.5	12.4	23.0	8.5	491	954	1377	44	164
01.06.2023	11:10	Лес	10	12.1	12.1	12.1	12.1	18.5	12.1	22.5	11.0	480	1011	1460	49	191

Фрагмент таблицы для расчета скорости эмиссии CO₂ из почв (камерный динамический метод)

Дата	Время	Площадка	№ камеры	Высота, см				D основания см	S основания см ²	V камеры мл	V трубок мл	V прибора мл	V tot мл
				1	2	3	Ср.						
01.06.2023	10:30	Луг	1	10.5	12.1	11.6	11.4	10.0	78.5	895.4	20.0	250.0	1243.9
01.06.2023	10:30	Луг	2	12.4	12.1	12.0	12.2	10.0	78.5	955.6	20.0	250.0	1225.6
01.06.2023	10:30	Луг	3	11.8	12.6	12.5	12.3	10.0	78.5	966.0	20.0	250.0	1236.0
01.06.2023	10:30	Луг	4	12.3	11.5	12.5	12.1	10.0	78.5	950.3	20.0	250.0	1220.3
01.06.2023	10:30	Луг	5	12.3	12.0	11.7	12.0	10.0	78.5	942.5	20.0	250.0	1212.5
01.06.2023	11:10	Лес	6	10.9	11.3	11.8	11.3	10.0	78.5	890.1	20.0	250.0	1160.1
01.06.2023	11:10	Лес	7	11.5	11.5	13.1	12.0	10.0	78.5	945.1	20.0	250.0	1215.1
01.06.2023	11:10	Лес	8	11.9	11.4	10.7	11.3	10.0	78.5	890.1	20.0	250.0	1160.1
01.06.2023	11:10	Лес	9	10.8	11.8	12.0	11.5	10.0	78.5	905.8	20.0	250.0	1175.8
01.06.2023	11:10	Лес	10	12.1	12.1	12.1	12.1	10.0	78.5	950.3	20.0	250.0	1220.3

продолжение

Т возд. °С	Т почвы °С	W почвы %	W опада %	Время, мин					ppm/мин	Эмиссия CO ₂ мг С / (м ² час)
				0	1	2	3	4		
<i>Концентрация CO₂, ppm</i>										
24	13.5	12.0		399	472	499	562	633	56	283
24	15.1	15.5		401	464	524	565	596	49	247
24	14.6	13.0		400	464	510	536	654	58	294
24	15.4	14.0		399	453	494	555	627	56	279
24	15.1	20.0		401	432	501	562	644	62	307
18.5	10.5	21.0	15.0	400	453	508	564	594	50	237
18.5	12.1	19.0	13.0	401	467	509	564	622	54	269
18.5	11.6	25.0	9.0	399	473	496	554	594	47	223
18.5	12.4	23.0	8.5	399	470	503	555	722	73	352
18.5	12.1	22.5	11.0	400	459	506	567	603	51	257

Фрагмент таблицы для записи полученных результатов, включая гидротермические характеристики

Дата	Время	Площадка	Т возд.	Т почвы		W почвы		W опада		Поток, мг С / (м ² час)		
				Ср.	SD	Ср.	SD	Ср.	SD	Ср.	SD	CV
01.06.2023	10:30	Луг	24.0	14.7	0.8	14.9	3.1			304	57	19%
01.06.2023	11:10	Лес	18.5	11.7	0.8	22.1	2.2	11.3	2.7	173	35	20%