

Е. В. СОЛОВЬЕВ, В. Г. КАРМАНОВ, Е. И. ЕРМАКОВ

АВТОМАТИЧЕСКИЙ ТЕРМОКОНДУКТОМЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ РЕЖИМА CO_2 В ПОЧВАХ

Рассматриваются возможности применения термокондуктометрического метода для автоматического измерения интенсивности выделения CO_2 с поверхности и из объема почвенных образцов, а также определения вертикальных и горизонтальных профилей распределения CO_2 в почве. Описана аппаратура отбора газовых проб, используемая при работе с автоматическим анализатором CO_2 .

Углекислый газ, содержащийся в почвенном воздухе, усваивается растениями в процессе фотосинтеза и в виде разнообразных органических соединений принимает участие в формировании урожая. Показатели интенсивности выделения CO_2 с поверхности почвы и его содержание в почвенном воздухе характеризуют биологическую активность корнеобитаемой среды, содержание влаги в почве и аэрацию, напряженность физиологических процессов и могут быть, таким образом, использованы для оценки эффективности влияния на почву различных агротехнических воздействий.

Особый интерес при этом представляет исследование динамических, в частности переходных, процессов, изучение которых открывает новые возможности в познании закономерностей круговорота CO_2 в системе почва — приземный воздух — растение и дальнейшем увеличении продуктивности сельскохозяйственных культур.

Решение поставленной задачи предполагает использование быстродействующей аналитической и газоотборной аппаратуры с максимальной автоматизацией всего комплекса измерений. Специфические требования, предъявляемые к подобной аппаратуре при измерении газообмена почв, ограничивают возможность применения существующих анализаторов промышленного типа и заставляют исследователей продолжать поиск новых методов и средств измерений.

Получившие в настоящее время широкое применение в практике исследований газообмена почв химические методы измерения CO_2 (волюмометрия, калориметрия, кондуктометрия, титрометрия и др.) требуют длительных экспозиций и мало поддаются автоматизации измерений. Определенное сокращение времени анализов обеспечивает газо-адсорбционный метод, привлекающий исследователей высокой чувствительностью (при незначительном объеме пробы) и селективностью. Однако и в этом случае принципиальным ограничением метода является цикличность режима работы измерительной аппаратуры.

Автоматизацию измерений при изучении динамики углекислотного газообмена почв можно осуществить с помощью оптико-акустического метода. Высокие метрологические характеристики (малая инерционность, большая чувствительность и селективность), а также широкий выбор типов выпускаемых промышленных газоанализаторов CO_2 позволили с успехом использовать их при изучении фотосинтетической деятельности растений [1, 7, 17 и др.], миграции CO_2 в припочвенном воздухе [3, 18] и других исследованиях.

В полевых условиях применение оптико-акустических газоанализаторов сопряжено с трудностями, связанными в первую очередь со сложностью измерительной схемы и высокой чувствительностью аппаратуры к воздействию окружающей среды. К тому же относительно большой объем рабочих камер обуславливает значительный расход анализируемой пробы (до 50—60 л/час), что при измерении содержания CO_2 связано с установкой крупногабаритных зондов с большой площадью контактирующей поверхности [16], а это нарушает структуру почвенного слоя и во многих случаях недопустимо, так как объем пробы почвенного воздуха не должен превышать 0,1—0,2 л.

Известны попытки преодоления отмеченных недостатков оптикоакустических газоанализаторов путем периодического впуска пробы малого объема в непрерывный поток газа-носителя. Помимо увеличения погрешности измерений такому способу присущи все недостатки методов с разделением во времени процессов отбора пробы и ее анализа.

Анализ литературных источников позволяет считать, что используемые в настоящее время в почвоведении методы и средства измерения CO_2 , дополняя друг друга, имеют определенные ограничения для комплексной автоматизации анализа газовой фазы почвы, измерений интенсивности выделения CO_2 с поверхности и из ее объема. Это обстоятельство особенно важно при проведении полевых исследований, где необходимо располагать портативной и достаточно простой аппаратурой измерения CO_2 . В этой связи мы хотели бы обратить внимание на перспективность использования для обсуждаемых целей автоматического термокондуктометрического метода. Этот метод весьма успешно применялся при изучении фотосинтеза и измерении концентрации CO_2 в различных воздушных средах [10, 14 и др.].

Обоснование принципа работы и рассмотрение результатов первых испытаний лабораторных макетов термокондуктометрических газоанализаторов (ТКГ) показали, что при предельно простой схеме измерительного тракта удается обеспечить высокую надежность его работы.

Эти качества играют не последнюю роль при построении современных универсальных датчиков газового состава [2, 13]. Однако малая селективность и высокая чувствительность ТКГ к нестабильности окружающей среды являются причиной отсутствия стандартных анализаторов CO_2 средней и высокой чувствительности [19]. Отечественные и зарубежные ТКГ со шкалами 0—5% CO_2 и выше мало пригодны для изучения CO_2 в почвах.

Вместе с тем результаты наших предварительных испытаний ТКГ подтвердили возможность дальнейшего совершенствования термокондуктометрического метода и построения автоматического газоанализатора CO_2 для изучения CO_2 в почвах. При этом основными направлениями совершенствования характеристик такого анализатора наряду с повышением селективности и стабильности показаний является также уменьшение рабочих камер датчика, во многом определяющих инерционность измерений.

Высокая чувствительность к нестабильности температуры окружающей среды, определяемая принципом работы ТКГ, и является основным его недостатком. Потери тепла нагретым термочувствительным элементом зависят от свойств исследуемой газовой среды. Увеличение или уменьшение содержания какого-либо компонента в этой среде вызывает изменение ее теплопроводности и теплового потока от чувствительного элемента ТКГ, в результате чего меняется его температура. Однако температура тела чувствительного элемента, которая с помощью мостовой схемы преобразуется в выходное напряжение датчика, функционально связана с температурой среды. Поэтому любые ее флуктуации передаются на выход наравне с полезным сигналом.

Основным способом борьбы с нестабильностью температуры среды является тщательное термостатирование датчика. Водяное ультратермостатирование датчика резко увеличивает габариты и вес проектируемой аппаратуры, ухудшает ее транспортабельность и усложняет эксплуатацию, особенно в полевых условиях. Применение активного воздушного термостатирования приводит к необходимости включения в состав газоанализатора дополнительного блока с прецизионной схемой терморегулирования.

При разработке модели ТКГ для полевых условий нами применено двойное пассивное воздушное термостатирование датчика в сочетании с тщательной обработкой приемов идентификации чувствительных элементов ТКГ.

Идентичность электротепловых характеристик чувствительных элементов (при включении их по дифференциальной схеме измерения) в значительной степени определяет эффективность компенсации колебаний температуры окружающей среды. Следует отметить, что даже незначительное расхождение их характеристик приводит к температурному дрейфу нуля и повышенным флюктуациям выходного сигнала термокондуктометрического датчика (катарометра).

Одним из методов идентификации характеристик является отбор элементов по паспортным параметрам — «холодному сопротивлению» (R_{20}) и температурному коэффициенту (β_{20}). Однако такой отбор полупроводниковых терморезисторов в подогревном режиме, который как раз и характеризует работу чувствительных элементов катарометра, оказывается малоэффективным, так как появляется необходимость учитывать еще один параметр — коэффициент рассеяния (K). Коэффициент рассеяния зависит от конструкции и технологии изготовления чувствительного элемента, условий эксплуатации и окружающей среды и пр. При таких обстоятельствах подбор термочувствительных элементов с высокой точностью одновременно по трем параметрам (R_{20} , β_{20} , K) вряд ли возможен. Более реальной представляется задача управления характеристиками элементов, уже установленных в датчиках ТКГ.

Нами разработано несколько оригинальных способов коррекции электротепловых характеристик чувствительных элементов катарометра [5, 11]. В сочетании с предварительным отбором по «холодным» параметрам разработанные способы управления характеристиками чувствительных элементов повысили стабильность работы ТКГ [6] и разрешающую способность газоанализатора (0,0010% CO_2 об.).

Малые габариты примененных нами чувствительных элементов (микротерморезисторы МТ-64 конструкции В. Г. Карманова с диаметром буинки < 1 мм) позволили резко сократить объем рабочих камер датчика (до $0,2 \text{ см}^2$) и время однократного измерения.

Существенного повышения селективности удается достичь включением в газовый тракт ТКГ поглотителя измеряемого компонента. В описываемом приборе сосуд с твердым поглотителем CO_2 включен между измерительной и сравнительной камерами датчика ТКГ. Это несколько увеличивает инерционность измерений (запаздывание показаний 2 мин.), но при малых емкостях поглотительных сосудов ($30\text{--}50 \text{ см}^3$) незначительно изменяет величину анализируемой пробы.

Непрерывный отбор анализируемой пробы при работе прибора ТКГ производится мембранным микрокомпрессором ($40\text{--}50 \text{ мл/мин}$), создающим небольшое разряжение в месте отбора пробы (передача пробы осуществляется по полихлорвиниловому шлангу). Далее через поглотитель влаги анализируемая смесь проходит через измерительную камеру датчика с чувствительным элементом (поглотитель CO_2) и поступает в сравнительную камеру [12]. При такой коммутации сигнал на выходе оказывается пропорциональным изменению содержания CO_2 в анализируемой пробе. Этот сигнал усиливается с помощью стандарт-

ного усилителя постоянного тока И-37 и регистрируется самопишущим прибором И-37, входящими в комплект анализатора (рис. 1).

Переключение диапазонов измерений CO_2 (шкалы 0—0,05; 0—0,1; 0—0,25; 0—0,5; 0—1; 0—2,5; 0—5; 0—10; 0—25% от объема) — клавишное (на передней панели усилителя И-37). С учетом инерционности прибора (2 мин.) при проведении однократного измерения отбирается 80—100 мл почвенного воздуха. Основные узлы газоанализатора CO_2 (датчик CO_2 с измерительной мостовой схемой, газовый тракт с поглотителями влаги и CO_2 , мембранный микрокомпрессор, батарейный источник питания и др.) скомпонованы в одном блоке переносной конструкции (рис. 1).

Применение высокоомных ($R_{20}=41,6 \text{ ком}$) микротерморезисторов МТ-64 обеспечивает длительную (в течение 1 месяца) непрерывную работу датчика CO_2 от батарейного источника, установленного в измерительном блоке. Если влажность исследуемой газовой смеси составляет 10 г/кг, а объемная концентрация CO_2 не превышает 1%, то емкость поглотительных сосудов при расходе 5 л/час обеспечивает непрерывную работу газоанализатора (без перезарядки) в течение 150 часов.

Газоанализатор может работать как от сети 220 в 50 гц, так и от аккумуляторной батареи 12 в. В последнем случае побудитель расхода и самописец заряжаются от двух малогабаритных стандартных преобразователей напряжения типа П-39.

При исследовании газообмена почв автоматизация измерений CO_2 должна сочетаться с автоматизацией отбора газовой пробы. Для автоматического определения состава и содержания CO_2 почвенный воздух необходимо непрерывно засасывать с помощью трубок или буров, установленных на определенных глубинах. Модернизация этой аппаратуры, равно используемой и при дискретных методах анализа газового режима почв, сводится к уменьшению «мертвого» объема (в зонде Рихтера [20] с внутренним диаметром 0,9 мм этот объем уменьшен до 0,3 мл). Однако при любой конструкции зонда непрерывный отбор почвенного воздуха предполагает периодический контроль за неискажаемостью вертикального профиля распределения CO_2 во времени. При этом степень опасности засасывания наружного воздуха или подсоса почвенного воздуха из других горизонтов зависит от физических свойств исследуемых почв (плотности, размера образцов, порозности, влагоемкости и т. д.) и глубины взятия пробы.

Проведенные нами измерения показали, что при анализе почвенного воздуха в почвах легкого и среднего механического состава и средней влагоемкости непрерывный отбор пробы с объемной скоростью, не пре-

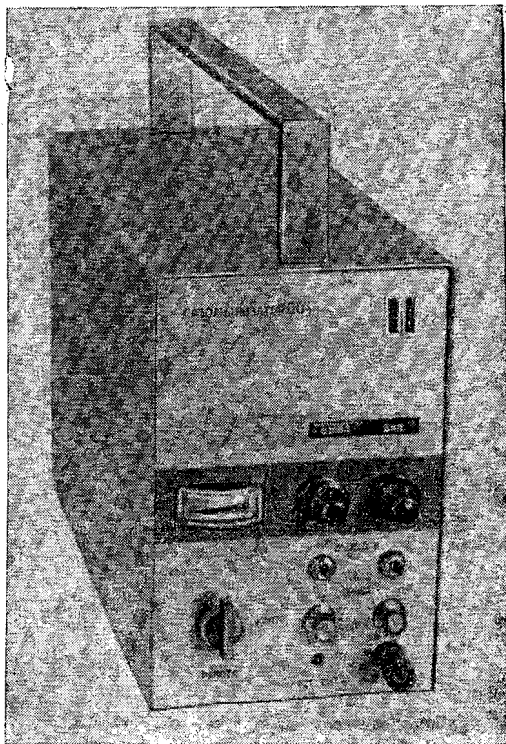


Рис. 1. Измерительный блок автоматического термокондуктометрического газоанализатора CO_2

вышающей 4 л/час, в течение длительного времени не нарушает профиль распределения CO_2 по вертикали и горизонтали.

Специфика количественного определения содержания CO_2 в почвенном воздухе разными методами состоит в том, что необходимо обеспечить отбор из почвы различных объемов газовой пробы. При скорости отбора менее 4 л/час для проведения однократного определения содержания CO_2 термокондуктометрическим методом (с учетом инерционно-

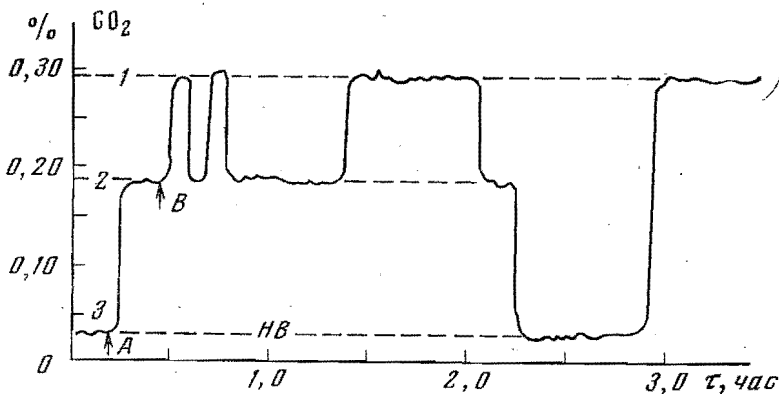


Рис. 2. Уровни концентрации CO_2 в почвенном воздухе супесчаной среднеподзолистой почвы на глубине 15 см (2) и 30 см (1) при различных экспозициях отбора проб (начало и конец экспозиций совпадают с подъемом и спадом кривых концентрации CO_2 на графике)

сти показаний 2 мин.) извлекается 0,1 л почвенного воздуха, что не превышает рекомендуемого объема газовой пробы в общеизвестных методах. Хорошее совпадение полученных результатов с измерениями волюмометрическим методом (объем пробы 100 мл) выявлено нами экспериментально на многих объектах.

Результаты измерений термокондуктометрическим методом содержания CO_2 в почвенном воздухе (на глубине 15 и 25 см), извлекаемом с помощью латунных трубок из дерново-среднеподзолистой супесчаной почвы (объемный вес 1,1 г/см³, весовая влажность 25%), приведены на рис. 2.

Измерения проводили в следующей последовательности: для извлечения почвенного воздуха в корнеобитаемом слое устанавливали латунные трубки (внутренний диаметр 1,0 мм) с воздухозаборными отверстиями на глубине 15 и 25 см. Трубку в исследуемом слое почвы (например, $h=15$ см) с помощью полихлорвинилового шланга подключали к входному штуцеру прибора «вход пробы». При переводе газового крана в положение «установка 0» на ленте самописца записывался уровень нуля по CO_2 (рис. 2, 3), после чего кран в момент А (рис. 2) переводили в режим «измерение» и через 2 мин. фиксировали содержание CO_2 на исследуемой глубине (рис. 2, 2). Затем в момент В (рис. 2) подключали следующую трубку ($h=25$ см). Циклы измерений при этом могут проводиться в разной последовательности с периодическим (через 20—30 мин.) измерением «0» (для снижения погрешностей измерений из-за дрейфа нуля прибора).

Неизменность уровней концентрации CO_2 при различных экспозициях забора проб почвенного воздуха (от 2 мин. до 1,5 часов) свидетельствует о возможности длительной работы анализатора в непрерывном режиме без нарушения вертикального распределения CO_2 в почвах исследуемого типа.

В слабо-воздухопроницаемых глинистых почвах, а также в почвах с высокой увлажненностью (более 80% полной влагоемкости), когда за-

полненные воздухом поры изолированы водными пробками и почти не сообщаются между собой, длительный непрерывный отбор (более 25 мин.) становится невозможным как вследствие заполнения зонда водой, так и в результате искажения профиля распределения CO_2 . В этом случае возникает необходимость подключения в параллель нескольких зондов или перехода к периодическому отбору пробы.

Для определения интенсивности выделения CO_2 с поверхности почвы применяют три метода: 1 — обогащения, 2 — абсорбции и 3 — прокачки (проветривания). Первые два метода предполагают периодический отбор газовой пробы или измерение остатка свободной щелочи в титрованном растворе. В соединении с аппаратурой непрерывного измерения наиболее приемлемо использование метода прокачки, сущность которого заключается в протягивании наружного воздуха через изолятор, установленный на поверхности почвы. За счет диффундирующего из глубины почвы CO_2 на выходе изолятора разность концентрации CO_2 превышает входную и с учетом объемной скорости газового потока и площади покрытия почвы может служить мерой интенсивности протекающих в почве процессов.

При использовании метода прокачки важное значение имеет правильный выбор скорости воздушного потока в изоляторе над исследуемой поверхностью почвы — при больших объемных скоростях прокачки возможны нарушения непрерывным потоком воздуха естественной диффузии между почвой и атмосферой. Однако при малых расходах анализируемой пробы (3—10 л/час) и соответствующей конструкции пробоотборного устройства возникающий в изоляторе ветровой поток над почвой будет иметь линейную скорость менее

1 см/сек, что почти полностью исключает возникновение вынужденной конвекции и нарушение процесса свободной диффузии при сохранении достаточно быстрого обмена воздуха в изолированном объеме.

Можно показать (и это подтверждается поставленными экспериментами), что создающийся между внутренним объемом изолятора и окружающей средой градиент давления ΔP при малых расходах невелик и не превосходит нескольких мм водного столба. Следовательно, вызванное этим увеличение коэффициента диффузии

$$D = D_0 \left(\frac{T}{T_0} \right)^m \left(\frac{P_0}{P_0 - \Delta P} \right)$$

также незначительно и находится в пределах ошибок измерений.

Нами разработана конструкция приемника (рис. 3), в которой линейная скорость частиц потока над любой точкой поверхности почвы, покрытой приемником, сохраняется на постоянном уровне. Это достиг-

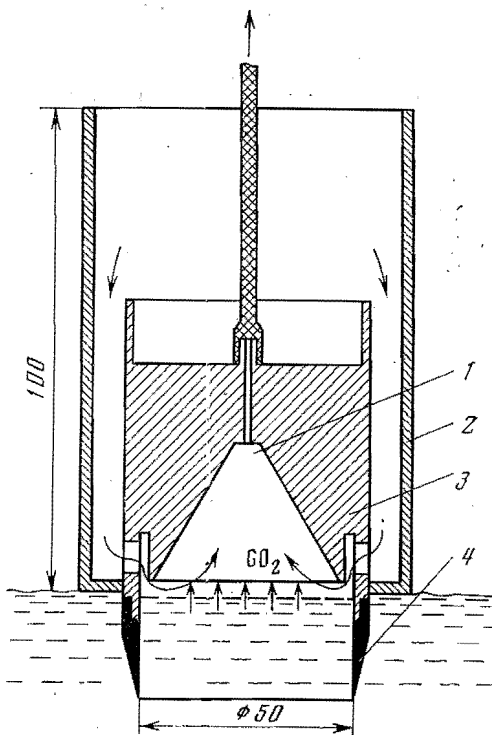


Рис. 3. Приемник для отбора проб при автоматическом измерении интенсивности выделения CO_2 с поверхности почвы. Объяснения в тексте

нуто за счет выбора (при заданном расходе газовой смеси) определенной конусности центральной воронки (1) приемника. Наружный воздух поступает внутрь по периметру в зазор между внешним (2) и центральным (3) стаканами. Нижнее ножевое кольцо (4), выполненное из металла, при установке приемника вдавливаются на 5 см в почву до ограничительного внешнего стакана. В этом случае наружный воздух забирается из слоев на высоте 10 см над поверхностью почвы.

Забор наружного воздуха с большей высоты (через длинный шланг) приводит к нежелательному увеличению перепада давления между внутренним объемом приемника и внешней средой. В то же время длительные измерения концентрации CO_2 , выполненные Хубером [Huber, 17] на высоте 3 и 150 см над свободной от растительности почвой, показали отсутствие какого-либо градиента между ними. В гидропонных теплицах (при закрытых форточках) незначительное различие в содержании CO_2 на высоте от 20 см до 4 м наблюдалось лишь в весенние месяцы [9].

В наших экспериментах отличие концентрации CO_2 в воздухе на высоте 3 и 120 см (культура томата) составило менее $(0,5-1,0) \cdot 10^{-3}\%$ от объема, что не вызывает существенной динамической ошибки в измерении интенсивности выделения CO_2 . В плотном травостое градиент концентрации CO_2 возрастает, и для снижения возможных ошибок измерений на внешний стакан (рис. 3, 2) рекомендуется одеть дополнительное ограничительное кольцо большей высоты.

Рабочая площадь покрытия разработанного приемника составляет $2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$ при внутреннем объеме 35 см^3 . При расходе 3 л/час линейная скорость газового потока под воронкой приемника (над поверхностью почвы) не превышает 10 см/мин, а время запаздывания показаний (с учетом инерционности анализатора) с момента установки приемника на поверхность почвы до окончания переходного процесса — 4 мин.

Методика измерения интенсивности выделения CO_2 с поверхности почвы сводится к следующему. Приемник устанавливают на подставку на высоте 10—15 см над поверхностью почвы и шлангом подключают к штуцеру анализатора «вход пробы» и, как и в случае измерения содержания CO_2 в почвенном воздухе, измеряют концентрацию CO_2 в окружающей среде $C_{\text{вх}}$. После этого камеру устанавливают на поверхность почвы, вдавливая ножевое кольцо в почву, и через 3—4 мин. фиксируют показания анализатора — равновесную концентрацию CO_2 на выходе колпака-изолятора $C_{\text{вых}}$. Величину интенсивности выделения CO_2 с единицы поверхности почвы подсчитывают по формуле

$$q = \rho (C_{\text{вых}} - C_{\text{вх}}) \frac{V_P}{S},$$

где S — площадь поверхности почвы, покрытая приемником; V_P — объемная скорость прокачиваемого воздуха, ρ — плотность CO_2 . Определение объемной скорости V_P производят подключением к штуцеру анализатора «выход пробы» расходомера на 0—20 л/час.

Для конструкции приемника, изображенного на рис. 3 ($S = 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$), при расходе $V_P = 3 \text{ л/час}$ и нормальных условиях (температуре 20°С и давлении 760 мм рт. ст.) $\rho = 1,96 \text{ г/л}$, и рабочая формула для расчета интенсивности выделения CO_2 с единицы поверхности почвы принимает вид

$$q = 3 \cdot 10^{-2} \Delta C,$$

где ΔC — разность концентрации CO_2 на входе и выходе приемника в тысячных долях $\% \text{ CO}_2$.

Для определения работоспособности метода протягивания результатов ряда проведенных измерений сопоставляли с данными измерений адсорбционным методом Штатнова. При этом измерения обоими метода-

ми проводили в модельных опытах при выращивании культуры томата (плотность посадки 36 раст./м^2) на дробленном керамзите в регулируемых условиях при искусственном освещении. Интенсивность выделения CO_2 из субстрата в период цветения достигала $350\text{--}390 \text{ мг CO}_2/\text{м}^2\text{час}$ — по методу Штатнова и $570\text{--}720 \text{ мг CO}_2/\text{м}^2\text{час}$ — по методу прокачки. Такое расхождение обусловлено в первую очередь тем, что абсорбционные методы в 1,5—3 раза занижают результаты исследований [8]. Следовательно, полученные нами данные по методу прокачки ближе к истинной производительности CO_2 корнеобитаемой средой.

Для более полной характеристики процессов углекислотного газообмена почвы наши знания о вертикальном и горизонтальном распределении CO_2 и интенсивности выделения CO_2 с поверхности почвы должны быть дополнены измерениями интенсивности продуцирования CO_2 определенными слоями или объемами почвы. Автоматизация таких измерений также не вызывает принципиальных или технических трудностей. Выбор экспериментального сосуда и объемной скорости протягиваемого воздуха через образец (навеску) почвы диктуется как чувствительностью используемой газоаналитической аппаратуры, так и условиями проведения эксперимента [4, 15]. В наших опытах для снятия зависимости скорости продуцирования CO_2 от температуры и влажности почвы разработан термостатируемый сосуд прямоугольной формы, внутренний объем (2,25 л) которого позволяет во многих случаях использовать монолитный образец почвы с минимальным изменением его структуры. Кроме того, выбранный объем обеспечивает четкую регистрацию CO_2 (концентрация CO_2 на выходе сосуда значительно превышает пороговую концентрацию анализатора) при достаточном осреднении по объему почвенного образца.

Выводы

1. Анализ современного состояния газоаналитических методов и существующей аппаратуры для автоматического измерения углекислотного режима почв показал, что на основе усовершенствованного термокондуктометрического метода можно разработать газоанализатор, имеющий по сравнению с оптико-акустическим газоанализатором более простую и надежную схему измерения.

2. Разработан автоматический термокондуктометрический газоанализатор CO_2 с широким диапазоном измеряемых концентраций (9 поддиапазонов измерений от 0,05 до 25% CO_2 от объема) и инерционностью показаний 3 мин. Газоанализатор в комплекте с преобразователем П-39 может быть использован в полевых условиях.

3. При малом расходе анализируемой смеси (3—5 л/час) газоанализатор позволяет выполнять измерения не только интенсивности выделения CO_2 с поверхности почвы и из ее объема, но и снимать в непрерывном режиме горизонтальные и вертикальные профили распределения CO_2 в почве.

4. Разработана аппаратура отбора воздушных проб для непрерывного анализа выделения CO_2 с поверхности почв и из корнеобитаемой среды.

Литература

1. Беликов П. С., Моторина М. В., Куркова Е. Б. Опыт применения инфракрасного газоанализатора (ГИП-5) для определения интенсивности фотосинтеза. Изв. ТСХА, вып. 3, 1960.
2. Бражников В. В. Дифференциальные детекторы для газовой хроматографии. «Наука», 1974.
3. Гиршович Ю. Е., Кобак К. И. Исследование фотосинтетической деятельности агрофитоценозов. Тр. ГГО, вып. 229, 1968.
4. Горбунов Н. И., Школьник Р. Я., Морозова Т. М. Методы определения углекислоты в почвенном воздухе. Почвоведение, 1941, № 2.

5. Карманов В. Г., Соловьев Е. В., Мухин В. П. Термокондуктометрический детектор для анализа газов. Авт. свид. № 269564, Бюл. изобр., № 15, 1970.
6. Карманов В. Г., Соловьев Е. В., Мухин В. П. Катарометр на полупроводниковых терморезисторах с пониженным дрейфом нуля. Приборы и системы управления, 1973, № 12.
7. Карпушкин Л. Т. Применение инфракрасного газоанализатора для изучения CO₂-газообмена растений. В сб.: Биофизические методы в физиологии растений. «Наука», 1971.
8. Макаров Б. Н., Мацкевич В. Б. Методы определения состава почвенного воздуха и интенсивности газообмена между почвой и атмосферой. В сб.: Физико-химические методы исследования почв. «Наука», 1966.
9. Митрофанов Б. А. и др. Углекислотный режим гидропонных теплиц. Физиология и биохимия культурных растений, т. 8, вып. 3, 1976.
10. Семененко В. Е. Установка для изучения кинетики индукционного периода фотосинтеза с дифференциальным газоанализатором углекислоты на терморезисторах. Физиология растений, т. 5, вып. 6, 1958.
11. Соловьев Е. В., Карманов В. Г. Повышение стабильности катарометра на полупроводниковых терморезисторах. Бюл. НТИ по агрон. физике, № 17—18, 1973.
12. Соловьев Е. В., Карманов В. Г. Автоматический переносный прибор для изучения углекислотного газообмена растений. Тез. докл. всес. совещ. «Газометрическое исследование фотосинтеза и дыхания растений». Тарту, 1976.
13. Фарзани Н. Г., Иллсов Л. В. Автоматические детекторы газов. «Энергия», 1972.
14. Aufdemgarten H. Zur Kenntnis der sogenannten Induktionsvorgänge bei der Kohlensäureassimilation. «Planta», Archiv für wiss. Botanik, Bd 29, H. 4, 1939.
15. Domsch K. H. Bodenatmung. Sammelbericht über Methoden und Ergebnisse. Zbl. Bakteriologie, Abt. 2, Bd 116, H. 1, 1962.
16. Grabert D., Steinbrenner K. Einige Grundlagenuntersuchungen zur Unterbodenverbesserung bei Sandboden. I Mitt.: Die Zusammensetzung der Bodenluft und die Bodenatmung. Zbl. Bakt., II, Bd 127, H. 5, 1972.
17. Huber B. Registrierung des CO₂-Gefülles und Berechnung des CO₂-Stromes über Pflanzengesellschaften mittels Ultrarotabsorptionschreibers. Ber. d. Deutsch. Bot. Ges., Bd 63, H. 1, 1950.
18. Huber B. Über die vertikale Reichweite vegetationsbedingter Tagesschwankungen im CO₂ Gehalt der Atmosphäre, Forst-Wissenschaftliches Zentralblatt, Bd 71, H. 7/8, 1952.
19. Karthaus H. Verfahren und Geräte zur Bestimmung einzelner Komponenten in Gasgemischen auf Grund der Wärmeleitfähigkeit. Gaswärme, Bd 6, 1956.
20. Richter J. Zur Methodik des Bodengashaushaltes. II. Ergebnisse und Diskussion. Z. Pflanzenernährung und Bodenkunde, Bd 132, 1958.

Агрофизический
институт ВАСХНИЛ

Дата поступления
14.IV.1977 г.

E. V. SOLOVYOV, V. G. KARMANOV, E. I. ERMASHOV

AN AUTOMATIC THERMOCONDUCTOMETRICAL METHOD FOR STUDYING CO₂ REGIME IN SOILS

The paper deals with the use of a thermoconductometrical method for measuring the intensity of CO₂ outgo from the surface and the volume of soil samples, and for the determination of vertical and horizontal profiles of CO₂ distribution in the soil. The apparatus for taking gas samples with automatic analyzer of CO₂ is discussed.