

МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ И ПРОФИЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ДИОКСИДА УГЛЕРОДА В ВОЗДУХЕ ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ГЛЕЕВАТОЙ СУПЕСЧАНОЙ ПОЧВЫ

П. И. Трофименко¹, Н. В. Трофименко¹, Ф. И. Борисов²,
В. И. Зацерковный¹

*¹Институт геологии Киевского национального университета
им. Тараса Шевченко, г. Киев, Украина*

*²Житомирский национальный агроэкологический университет,
г. Житомир, Украина*

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы в исследованиях почвоведов, экологов, геохимиков, биологов и других ученых пристальное внимание уделяется проблемам инвентаризации источников эмиссии CO_2 и других парниковых газов в атмосферу. Многочисленными исследованиями установлено, что почвенная эмиссия биогенных газов, в первую очередь диоксида углерода, представляет собой весомый источник их поступлений в атмосферу [1, 2]. Поэтому даже незначительные трансформации почвенного дыхания в глобальном масштабе могут привести к повышению концентрации CO_2 в атмосфере и к усилению парникового эффекта. Общеизвестно, что мировой объем двуокиси углерода оценивается в 60–75 Гт [3], две трети из которых являются следствием деятельности микроорганизмов, остальные – результатом его выделения корнями растений. В контексте указанной проблемы инвентаризации отдельных пулов органического вещества почв приобретают особое значение. К тому же концентрация CO_2 , как известно, служит одним из индикаторов биологической активности почвы. При этом для обеспечения надежных результатов исследований очень важным является использование простых и научно обоснованных инструментальных методов изучения профильного распределения концентрации в почвенном воздухе диоксида углерода и других биогенных газов.

Анализ последних исследований. Как известно, в слое 0–100 см с увеличением глубины концентрация CO_2 в почвенном воздухе большинства почв постепенно повышается [4, 5, 6]. Однако по данным Безбородова А. и др. (2005), на сероземе типичном тяжелосуглинистом под пшеницей озимой после восстановления ее вегетации характерное увеличение концентрации CO_2 с глубиной происходило неравномерно, достигая максимума на глубине 80 см [7]. По данным этого же автора, расчеты концентрации диоксида углерода по известным уравнениям [8, 9], которые описывают его профильное распределение для орошаемых суглинистых почв, дали довольно неоднозначные результаты.

Наряду с эмиссией CO_2 с поверхности почв важное значение в круговороте органического углерода играет его распределение по почвенному профилю, отдельные пулы которого находятся в твердой, жидкой или газообразной фазах

почвы. В верхней части профиля величина концентрации CO_2 в значительной мере обусловлена интенсивностью течения воздухообмена с атмосферой, что вполне закономерно. Однако с увеличением глубины концентрация двуокиси углерода в большей степени зависит от гранулометрического состава почвы, уровня залегания грунтовых вод, пространственного распространения корневых систем растений, степени и типа засоления.

Постоянный воздухообмен между почвой и атмосферой по своей сути является «дыханием почвы». Поэтому наиболее известные устройства для определения биологической активности на разных горизонтах почвы преимущественно базируются на измерениях выделений CO_2 из глубин почвы или спада эквивалентной концентрации O_2 , который расходовался на почвенное дыхание.

Однако следует понимать, что современная интерпретация биологической активности почвы шире и базируется на учете результатов функционирования имеющихся в нем микроорганизмов, выделений корней растений (ризосферного дыхания) и живых организмов в виде диоксида углерода, метана, окислов азота и соединений серы: $\text{CO}_2 \leftrightarrow (\text{O}_2)$, CH_4 , CO , NO , N_2O , NO_2 , NH_3 , SO_2 , H_2S . Как известно, воздух в почвенной среде и снаружи (в атмосфере) существенно отличается по структурному составу и концентрации газов и постоянно претерпевает трансформации во времени. Последние обусловлены влиянием различных факторов: изменения барометрического и парциального давления газов, динамики влажности и температуры почвы в суточном и сезонном циклах. Кроме того, плотность сложения почвы вместе с особенностями пространственного развития корневой системы сельскохозяйственных культур в соответствии с этапами их органогенеза, являются важными определяющими газового состава почвенного воздуха.

В связи с вышеизложенным разработка современной методологии определения концентрации CO_2 в почвенном воздухе и оценки его запасов представляют собой важную научную задачу. А отсутствие систематизированных данных о запасах Сорг в почвенном воздухе стало весомой причиной проведения данных исследований.

Во время выполнения исследований ставились следующие задачи:

- научно обосновать и разработать методологию определения профильного распространения концентрации биогенных газов (на примере двуокиси углерода) в почвенном воздухе;
- определить степень обусловленности концентрации CO_2 значениями влажности почвы и оценить величину запасов органического углерода.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследование профильного распределения диоксида углерода в почвенном воздухе проведены в 2018 году на территории опытного поля Житомирского национального агроэкологического университета. Научные наблюдения проведены на дерново-подзолистой глееватой супесчаной почве на водно-ледниковых отложениях, под посевом ржи озимой ($B = 5^\circ 50' 26''$ $8,835''$ $L = 28^\circ 41' 40,454''$, $H = 258,29$ м, WGS 84, картографическая проекция UTM – универсальная проекция Меркатора).

Выполнение исследований предусматривало закладку шурфов диаметром 140 мм через каждые 10 см до глубины 0,50 м с последующим использованием специально разработанного устройства (рис. 1.).

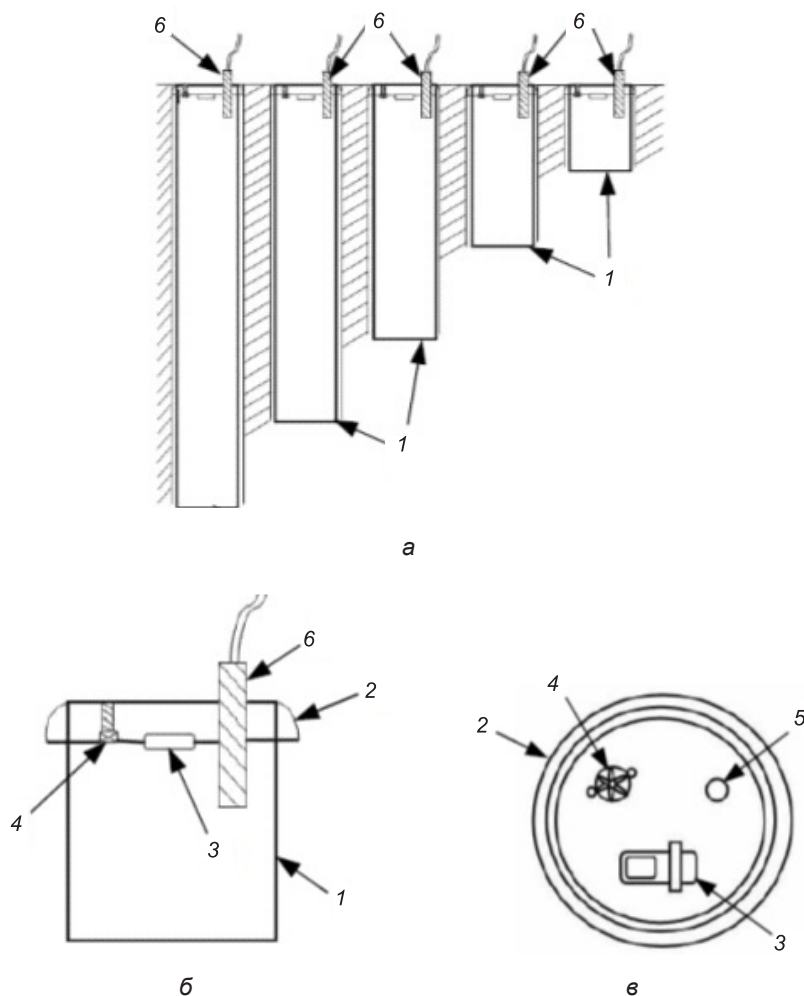


Рис. 1. Устройство для определения концентрации CO_2 и других биогенных газов в почвенном воздухе:

а – комплект изолирующих камер; б – увеличенное изображение одной из изолирующих камер; в – вид сверху на съемную крышку; 1 – изолирующая камера; 2 – съемная крышка из прозрачного материала; 3 – портативная метеостанция; 4 – вентилятор с бесколлекторным электродвигателем; 5 – отверстие; 6 – зонд газоанализатора

Каждая изолирующая камера снабжена съемной крышкой с отверстием для зонда газоанализатора с возможностью блокировки доступа воздуха в камеру, вентилятором и метеостанцией для измерения температуры и давления воздушной смеси.

Использован комплект изолирующих камер высотой 10, 20, 30, 40 и 50 см выполненных в соответствии с глубиной измерений с объемами: $V = 0,0015386 \text{ м}^3$, $V = 0,0030772 \text{ м}^3$, $V = 0,0046158 \text{ м}^3$, $V = 0,0061544 \text{ м}^3$, $V = 0,0076930 \text{ м}^3$ соответс-

твенно. Глубина врезки камеры в почву – 2 см. Во время измерений использован газоанализатор с инфракрасным сенсором Testo 525. С целью уменьшения влияния градиента концентрации на результат измерений перемешивание воздушной смеси проводили непосредственно перед началом измерения в течение 1 минуты. Интенсивность выделения диоксида углерода ECO_2 проводили в соответствии с ранее опубликованной методикой [10, 11]. Экспозиция измерения эмиссии CO_2 с поверхности почвы и на соответствующей глубине составляла 6 часов с периодичностью измерений 30 мин. Принцип определения концентрации CO_2 в почвенном воздухе заключался в достижении его величины в изолирующей камере, при которой наблюдалось постепенное замедление эмиссии двуокиси углерода с достижением минимальных значений. При этом достигалось состояние относительного динамического равновесия, при котором течение процесса эмиссии $\leftrightarrow$ депонирования двуокиси углерода почвой происходит в закрытой системе, когда его количество приблизительно равно количеству депонированного. В таких условиях при достаточном истечении времени концентрации CO_2 почвенного воздуха и воздуха изолирующей камеры будут максимально близкими.

Определение величины влажности почвы (в % объемной влажности) на глубине измерений проводили методом частотной рефлектометрии с использованием влагомера MST 3000+ с сенсором SMT 100.

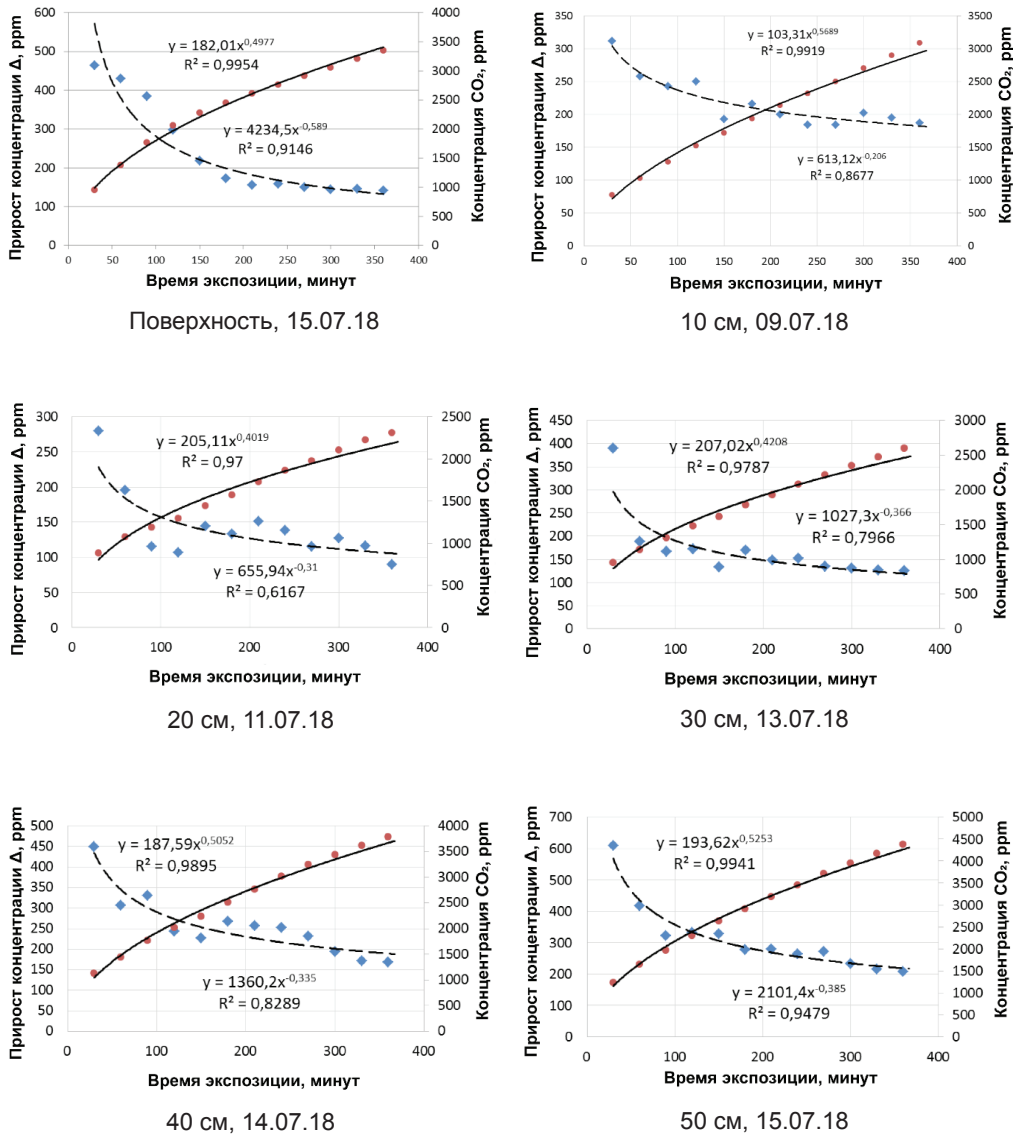
Почвенный профиль дерново-подзолистой глееватой супесчаной почвы на водно-ледниковых отложениях является типичным для переходной зоны Полесья Украины: A_0 – 0–24 см, A_2 – 25–35 см, A_2B – 36–55 см, $BA_2(gl)$ – 56–90 см, $B(gl)$ – 91–130 см.

В отобранном из слоя почвы 0–30 см почвенном образце определяли углерод органического вещества ДСТУ 4289 – 0,78 %; гранулометрический состав – по Качинскому ДСТУ 4730:2007, физическая глина – 15,35 %; сумму поглощенных оснований – по МВИ 31-497058-007 ННЦ «Институт почвоведения и агрохимии имени А. Н. Соколовского» – 2,2 ммоль/100 г почвы; нитратный и аммонийный азот – ДСТУ 4729–3,57 и 14,04 мг/кг соответственно; подвижный фосфор и обменный калий – ДСТУ 4115-2002-133,4 и 201,8 мг/кг соответственно; гидролитическую кислотность – ГОСТ 26212-2, 11 ммоль/100 г почвы; pH водный – ГОСТ 26423-85-5,5; pH солевой – ГОСТ 26483-85-4,56.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Как видно из приведенных данных, снижение интенсивности эмиссии CO_2 вследствие повышения концентрации в изолирующей камере по профилю почвы происходит с определенной закономерностью (рис. 2). Выявлено, что начало постепенного замедления эмиссионной активности почвы на разных горизонтах более рельефно наблюдается после пересечения степенных кривых: насыщения воздушной смеси двуокисью углерода (I) и прироста концентрации CO_2 (II) (рис. 2).

Указанное пересечение в большинстве случаев наблюдалось примерно на 100-й минуте экспозиции, за исключением глубины 10 см (рис. 2). Относительный минимум эмиссионных выбросов начинался примерно после 300-й минуты измерений. При этом значение разницы между приращениями концентрации (ΔC) последующего и предыдущего измерений находилось в пределах точности газоанализатора (<2 %).



Умовні позначення

- — концентрация диоксида углерода в изолирующей камере (I)
- прирост концентрации CO_2 в камере (ΔC) (II).

Рис. 2. Зависимость прироста концентрации CO_2 в изолирующей камере (ΔC) от концентрации диоксида углерода в воздушной смеси в течение экспозиции, ppm.

Вычисление значений концентрации проводили на основе полученных уравнений повышения концентрации CO_2 (табл.).

Таблица

Уравнения степенной зависимости концентрации диоксида углерода в почвенном воздухе дерново-подзолистой глееватой супесчаной почвы на водно-ледниковых отложениях и величины профильного распределения CO₂.
Период наблюдений 09.07.2018–15.07.2018 года

Генетический горизонт	Глубина измерения, см	Уравнения регрессии	Объемная влажность %	Концентрация CO ₂ мг/м ³	Масса	
					CO ₂	С
Ап	0	$y = 182,01 \cdot x^{0,4977}$ RI = 0,995	12,2	6107	2,280*	0,602**
	10	$y = 103,31 \cdot x^{0,5689}$ RI = 0,991	15,1	5636	1,739	0,474
Ап	20	$y = 205,11 \cdot x^{0,4019}$ RI = 0,970	15,0	4219	1,326	0,362
	30	$y = 207,02 \cdot x^{0,4208}$ RI = 0,979	16,9	4743	1,403	0,383
А ₂	40	$y = 187,59 \cdot x^{0,5052}$ RI = 0,989	18,1	6903	2,107	0,575
	50	$y = 193,62 \cdot x^{0,5253}$ RI = 0,994	18,6	7989	8,783	2,396
Общая масса CO ₂ и С в слое 0–50 см					8,783	2,396

* Масса CO₂ в слоях почвы 0–10, 11–20, 21–30, 31–40, 41–50;

** масса С в слоях почвы 0–10, 11–20, 21–30, 31–40, 41–50.

Массу диоксида углерода в почвенном воздухе исследуемой почвы определяли по формуле

$$M_{CO_2} = 10^{-2} \cdot A \cdot C_{CO_2} \cdot (P_{total} - P_{water}), \quad (1)$$

где M_{CO_2} – масса CO₂ кг/га; А – мощность горизонта, м; C_{CO_2} – концентрация CO₂, мг/м³; P total – общая пористость почвы, выраженная десятичной дробью; P water – объемная влажность почвы, выраженная десятичной дробью; 10⁻² – величина, которая является результатом вычислений и пересчета единиц отдельных составляющих формулы: концентрации, массы и площади.

Для расчета массы углерода в почвенном воздухе по профилю использованы величины общей пористости дерново-подзолистой почвы в соответствии с результатами исследования Воронина А. Д. (1986) [12].

Как свидетельствуют результаты исследований, концентрация CO₂ в воздухе дерново-подзолистой глееватой супесчаной почвы на водно-ледниковых отложениях в целом увеличивается от поверхности до нижележащих горизонтов (рис. 3). Выявлено, что величина массы CO₂ в почвенном воздухе в профиле почвы колеблется в пределах от 1,326 (слой 20–30 см) до 2,208 кг/га (слой 0–10 см).

На фоне перманентного повышения влажности почвы с глубиной наблюдается постепенное повышение концентрации CO₂. Однако в слое 10–30 см зафиксировано незначительное ее снижение (рис. 3). Обнаруженная особенность, по нашему мнению, обусловлена сосредоточенностью большей, по сравнению с нижними слоями корневой массы, ржи озимой в верхнем слое почвы и началом

разложения той ее части, которая в связи с завершением периода активной вегетации является отмершей. Зависимости влияния температуры на концентрацию CO_2 по профилю дерново-подзолистой глееватой супесчаной почвы не выявлено.

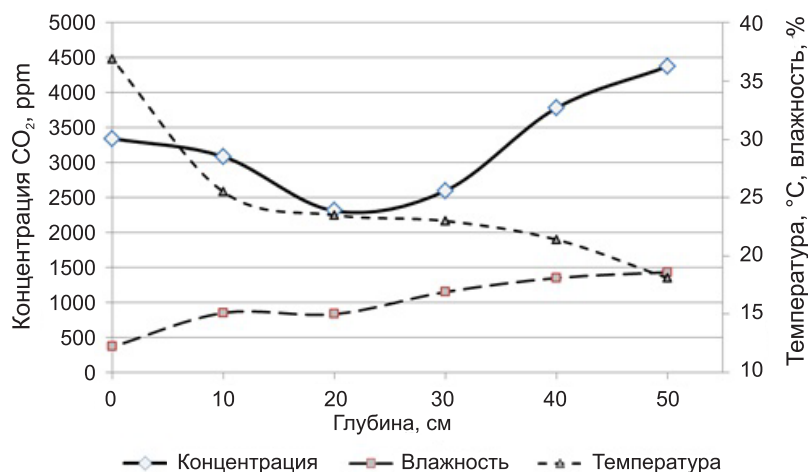


Рис. 3. Профильное распределение концентрации CO_2 и абiotических факторов в дерново-подзолистой глееватой супесчаной почве на водно-ледниковых отложениях под рожью озимой

Повышение концентрации CO_2 в почвенном воздухе с глубины 30 см не привело к пропорциональному увеличению его массы. Параллельно с увеличением глубины произошло закономерное уменьшение объема свободных пор P_{AEP} (пор аэрации), где содержится газ ($P_{\text{total}} - P_{\text{water}}$). Установлено, что при изменении в относительных процентах значений объемной влажности почвы (+7,6), пористости аэрации (–24,7), концентрации CO_2 (+27,9), увеличение абсолютной массы диоксида углерода составило 50,1 %. Соответственно, масштабы увеличения величины массы газа почти вдвое превосходили увеличение объема пространства, где он находился. Следовательно, можно утверждать, что с увеличением глубины повышение концентрации на глубине 31–50 см действительно произошло и его причиной вероятнее всего является ухудшение газообмена между почвой и атмосферой.

Результаты достаточно хорошо коррелируют с данными других авторов, полученными на дерново-подзолистой супесчаной почве под лесом [6] и многолетними травами [5], а также сероземе тяжелосуглинистом под пшеницей озимой [7]. По своей сути, углерод, содержащийся в воздухе почв, вместе с углеродом жидкой фазы представляет собой наиболее лабильную часть запасов органического вещества. Несмотря на относительно незначительные запасы CO_2 в почвенном воздухе на момент исследований, отсутствие видимой ощутимой связи с внешними факторами атмосферы и внутренними условиями среды позволяет сделать вывод об их определенной стабилизирующей роли. В этом смысле сосредоточенный в почвенном воздухе углекислый газ выступает в роли стабилизирующего буфера между органическим углеродом твердой фазы почвы и диоксидом углерода приземного слоя атмосферы. Вне сомнения, усиление

уровня интенсивности антропогенного воздействия на почву в виде использования агротехнических приемов (глубина и частота обработок) неизбежно приведет к изменению параметров профильного распределения концентрации CO_2 в почвенном воздухе.

ВЫВОДЫ

В результате исследований установлено, что предложенный алгоритм определения элементов газового режима почв на разной глубине вполне пригоден к использованию и предлагается в качестве относительно простого способа исследования концентрации биогенных газов в условиях *in situ*.

Полученные величины профильного распределения концентрации диоксида углерода в дерново-подзолистой глееватой супесчаной почве на водно-ледниковых отложениях указывают на их определенную дифференциацию в зависимости от общей пористости (P_{total}), содержания влаги (P_{water}) и глубины измерения. Значения концентрации CO_2 на глубинах почвы 10, 20, 30, 40, 50 см составляют 5636, 4219, 4743, 6903, 7989 мг/м^3 соответственно.

Диапазон величин массы CO_2 в почвенном воздухе колеблется пределах от 1,326 до 2,208 кг/га , достигая наибольших значений в слоях 0–10 см (2,208 кг/га) и 41–50 см (2,107 кг/га). Выявлено, что общая масса CO_2 и С в профиле дерново-подзолистой глееватой супесчаной почвы на водно-ледниковых отложениях под пшеницей озимой для слоя 0–50 см составляет соответственно 8,783 и 2,396 кг/га . Более значительная в верхнем слое почвы по сравнению с нижележащими слоями масса диоксида углерода объясняется следствием скопления в этой части профиля отмерших корней ржи озимой и начала процесса их разложения с соответствующим выделением CO_2 . Установлено, что повышение концентрации CO_2 в слое почвы 31–50 см связано с ухудшением режима аэрации с глубиной.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bouwman, A. F. Spatial Issue – Soil and climate change / A. F. Bouwman, J. C. Germon // Introduction, Biology and Fertility Soils. – 1998. – Vol. 27. – 219 p.*
2. *Кудеяров, В. Н. Пулы и потоки углерода в наземных экосистемах / В. Н. Кудеяров. – М.: России, 2007. – 315 с.*
3. *Кудеяров, В. Н. Роль почв в круговороте углерода / В. Н. Кудеяров // Почвоведение. – 2005. – № 8. – С. 915–923.*
4. *Ковда, В. А. Основы учения о почвах / В. А. Ковда. – М.: Наука, 1973. – Кн. 1. – 447 с.*
5. *Макаров, Б. Н. Газовый режим почвы / Б. Н. Макаров. – М.: Агропромиздат, 1985. – 105 с.*
6. *Ястребов, М. Я. Влияние важнейших биологических факторов на состав почвенного воздуха в пойменных почвах р. Клязьмы / М. Я. Ястребов // Почвоведение. – 1958. – № 10. – С. 81–88.*
7. *Безбородов, Г. А. Профильное распределение углекислого газа и метана в воздухе орошаемых сероземов / Г. А. Безбородов, А. Г. Безбородов, Ю. Г. Безбородов // Почвоведение. – 2008. – № 1. – С. 68–74.*

8. *Авдеенко А.П.* Расчет содержания углекислого газа и кислорода в орошаемых суглинистых почвах / А. П. Авдеенко // Исследования по мелиорации болот и минеральных почв. – Горки: БСХА, 1969. – Т. 59. – С. 180–183.

9. *Безбородов, А. Г.* Мелиорирующий эффект при мульчировании полиэтиленовой пленкой орошаемых почв сероземной зоны / А. Г. Безбородов, Ю. Г. Безбородов // Почвоведение. – 2000. – № 7. – С. 861–866.

10. *Трофименко, П. І.* «Спосіб визначення інтенсивності емісії газів з ґрунту» Пат. № 117911 Україна, МПК G01N 33/24 (2006.01) G01N 7/14 (2006.01) / П. І. Трофименко, Ф. І. Борисов; заявник і патентовласник Житомирський національний агроекологічний університет. – заявка № а 2014 12734, 25.10.2018, бюл. № 20.

11. *Трофименко, П. І.* Наукове обґрунтування алгоритму застосування камерного статичного методу визначення інтенсивності емісії парникових газів із ґрунту / П. І. Трофименко, Ф. І. Борисов // Агрохімія і ґрунтознавство. – 2015. – № 83. – С. 17–24.

12. *Воронин, А. Д.* Основы физики почв / А. Д. Воронин. – М.: изд-во Моск. ун-та, 1986. – 245 с.

RESEARCH METHODOLOGY AND PROFILE DISTRIBUTION OF THE CARBON DIOXIDE CONCENTRATION IN THE AIR OF SOD-POD-STYLE GLAYED SOUP SOIL

P. I. Trofymenko, N. V. Trofymenko, F. I. Borysov, V. I. Zatserkovnyi

Summary

The article discusses the methodology of determination and character of the profile distribution of carbon dioxide concentration in the air of sod middle podzolic gleyic sandy soil on waterborne and glacier sediments of Polissya of Ukraine.

It has been shown that the differentiation of carbon dioxide concentrations in soil air depends on P (total), moisture content (P water), and depth of measurement. It has been established that the range of values of CO₂ concentration in soil air at depths 10, 20, 30, 40, 50 cm is 5636, 4219, 4743, 6903 and 7989 mg/m³, respectively. It was found that the total mass of CO₂ and organic carbon in soil air of sod-podzolic glued suppository soil on winter-winter wheat winter ice and winter ice compartments is 8,783 and 2,396 kg/ha, respectively.

Поступила 09.01.19