https://vestnik.mrsu.ru ISSN 2658-4123, eISSN 2658-6525

ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ / TECHNOLOGIES, MACHINERY AND EQUIPMENT

https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202502.318-332
EDN: https://elibrary.ru/wygvcz
УДК 631.31

Оригинальная статья / Original article

Моделирование эмиссии углекислого газа при обработке почвы

Н. И. Джабборов[1], **А. В. Добринов**[1] ✉, **А. П. Мишанов**[1], **А. П. Савельев**[2]
[1] *Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства (ИАЭП) – филиал ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация*
[2] *Национальный исследовательский Мордовский государственный университет, г. Саранск, Российская Федерация*
✉ *a.v.dobrinov@yandex.ru*

Аннотация

Введение. Актуальность темы исследования связана с проблемой снижения выбросов климатически активных веществ на используемых сельскохозяйственных угодьях. По оценкам ученых 25–40 % выделяемых газов (особенно оксида азота и углекислого газа) имеют почвенное происхождение. На величину их выделения с пахотных земель, наряду с температурой и влажностью, оказывают существенное влияние способы обработки почвы. В связи с этим математическое моделирование эмиссии углекислого газа при различных системах обработки почвы является актуальной задачей.
Цель исследования. Разработка математической модели для определения и прогнозирования эмиссии углекислого газа в результате различных способов обработки почвы.
Материалы и методы. Применялись методы математического моделирования процесса эмиссии углекислого газа с учетом данных по измерению выделения газа с использованием метода камер и датчика CDD 24 HTL.
Результаты исследования. Разработана математическая модель для определения и прогнозирования эмиссии углекислого газа при различных способах обработки почвы. На основе экспериментальных данных получены значения постоянных величин и угловых коэффициентов, характеризующих интенсивность эмиссии углекислого газа в конкретных условиях проведения основной отвальной обработки почвы. Для рассматриваемого технологического процесса основной отвальной обработки почвы эмиссия углекислого газа находилась в пределах от 11,3 до 92,4 кг с 1 га площади (или от 1,13 до 9,23 г с 1 м^2).
Обсуждение и заключение. Эмиссия углекислого газа, поступающего в атмосферу вследствие деятельности человека и применения им разных способов обработки почвы при производстве продукции растениеводства, оказывает негативное влияние на состояние окружающей среды. На величину эмиссии воздействуют почвенно-

© Джабборов Н. И., Добринов А. В., Мишанов А. П., Савельев А. П., 2025

Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

климатические особенности региона, поэтому ее величина может существенно отличаться. Это обстоятельство требует проведения работ по изучению величины эмиссии для условий конкретного региона. Проводимые исследования направлены на совершенствование методов оценки прогнозирования эмиссии газов и могут быть использованы в растениеводстве.

Ключевые слова: эмиссия диоксида углерода, растениеводство, способы обработки почвы, моделирование процесса

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Джабборов Н.И., Добринов А.В., Мишанов А.П., Савельев А.П. Моделирование эмиссии углекислого газа при обработке почвы. *Инженерные технологии и системы.* 2025;35(2):318–332. https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202502.318-332

Simulating Carbon Dioxide Emissions when Cultivating Soil

N. I. Jabborov[a], **A. V. Dobrinov**[a] ✉,
A. P. Mishanov[a], **A. P. Savelyev**[b]
[a] *Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production (IEEP) branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM, St. Petersburg, Russian Federation*
[b] *National Research Mordovia State University, Saransk, Russian Federation*
✉ *a.v.dobrinov@yandex.ru*

Abstract
Introduction. The urgency of the study is related to the problem of reducing emissions of climate-impacting substances used on agricultural areas. According to current estimates of scientists, 25–40% of climate-impacting gases (especially nitrous oxide and carbon dioxide) are of soil origin. The methods of soil cultivation together with temperature and humidity significantly affected the emissions of climate-impacting gases from plowed lands. In this regard, mathematical simulation of carbon dioxide emissions when using different methods of soil cultivation is a topical task.
Aim of the Study. The study is aimed at developing a mathematical model for determining and forecasting carbon dioxide emissions from soil cultivated with different methods.
Materials and Methods. In the study, there were used the methods of mathematical simulation of the carbon dioxide emission process taking into account the data on gas emission assessing through using the chamber and the sensor CDD 24 HTL.
Results. A mathematical model has been developed for assessing and forecasting carbon dioxide emission from soil cultivated with different methods. Based on the experimental data, there have been obtained the constant values and angular coefficients characterizing the intensity of carbon dioxide emission in specific conditions of basic moldboard soil cultivation. For the technological process of basic moldboard soil cultivation, the carbon dioxide emission was in the range from 11.3 to 92.4 kg from 1 ha of area (or from 1.13 to 9.23 g per 1 m^2).
Discussion and Conclusion. The carbon dioxide emission into the atmosphere caused by human activities and by using different methods of soil cultivation in producing crop products has a negative impact on the environment. The soil and climatic features of the region influence the emission values, so these values can vary significantly. This fact requires the study of the emission value for the conditions of a particular region. The study is aimed at improving the methods for assesing and forecasting gas emissions and can be used in crop production.

Keywords: carbon dioxide emissions, crop production, soil cultivation methods, process simulation

Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest.

For citation: Jabborov N.I., Dobrinov A.V., Mishanov A.P., Savelyev A.P. Simulating Carbon Dioxide Emissions when Cultivating Soil. *Engineering Technologies and Systems*. 2025;35(2):318–332. https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202502.318-332

Введение. Технологии возделывания сельскохозяйственных культур связаны с обработкой почвы различными способами и техническими средствами, оказывающими определенное негативное влияние на окружающую среду. При обработке почвы движители машино-тракторных агрегатов создают значительное давление, из-за чего происходит переуплотнение поверхности поля, изменение в структурно-агрегатном состоянии почвы. Обработка почвы меняет ее биологические свойства (главным образом состав и численность микроорганизмов) и влияет на содержание в ней гумуса. Также обработка почвы оказывает существенное воздействие на выделение парниковых газов.

Необходимость обеспечения населения продуктами питания и получения продукции на экспорт вынуждает сельскохозяйственных производителей наращивать объемы производства. Это происходит за счет применения интенсивных технологий в растениеводстве и увеличения поголовья скота. Данные действия способствуют повышению антропогенного воздействия на окружающую среду. Использование химических удобрений и пестицидов с нарушением правил их применения наносит существенный вред природе и негативно сказывается на здоровье человека [1].

Для снижения негативного влияния технологических процессов и технических средств на окружающую среду необходимо контролировать текущее состояние и прогнозировать эмиссию климатически активных веществ, а на основании прогноза управлять процессами выбросов. Разработка высоко вероятностных моделей прогнозирования выбросов парниковых газов позволит создать эффективные технико-технологические решения по их снижению во время возделывания сельскохозяйственных культур.

Целью работы является моделирование эмиссии CO_2 при различных способах обработки почвы.

Обзор литературы. Глобальное изменение климата ученые связывают с увеличением поступления парниковых газов в атмосферу. Основным источником данного поступления считается деятельность человека, имеющая тенденцию к постоянному росту. Объемы выделения в атмосферу климатически активных веществ (КАВ) от агропромышленного комплекса Российской Федерации занимают третье место и составляют порядка 121,28 млн т CO_2-экв. (по состоянию на 2021 г.), что соответствует 5,6 % от общих выбросов [1]. Для сокращения поступления КАВ необходимо проведение работ по изучению факторов, влияющих на их возникновение применительно ко всем отраслям производства, включая растениеводство.

Одним из направлений в растениеводстве, ориентированным на снижение негативной нагрузки на окружающую среду, является возделывание растений в органическом земледелии. Это связано с запретом на использование минеральных удобрений и пестицидов. При этом особое внимание уделяется применению

научно обоснованных севооборотов и приемам обработки почвы, способствующих сокращению количества эмиссии газов. Необходимо учитывать, что переход на органическое земледелие, в силу действующих ограничений на законодательном уровне, влечет снижение урожайности и увеличение себестоимости конечной продукции минимум на первоначальном этапе [1].

Актуальность проблемы, связанной с увеличением эффекта парниковых газов привлекла внимание ученых всего мира. В настоящее время имеется целый ряд исследований, посвященных данной проблеме. Экспериментально установлено, что на выбросы газов влияют водный и температурный режимы почвы, нормы вносимых удобрений, способы обработки почвы и сезонные колебания температуры [2; 3]. Мульчирование поверхности поля влияет на водный режим в почве, что способствует снижению выбросов парниковых газов [4]. Данный вариант может быть рассмотрен в качестве мер по снижению выбросов КАВ в растениеводстве. Минерализация растительных остатков происходит с участием микроорганизмов, скорость работы которых зависит от влияния факторов окружающей среды [5]. Установлено, что растительные остатки играют очень важную роль в сельском хозяйстве, поскольку они могут быть использованы как в качестве экологически безопасной стратегии управления отходами, так и в качестве средства повышения органического вещества в почве. Минерализация растительных остатков в почве требует соответствующих стратегий управления, которые поддерживают растениеводство и защищают качество поверхностных и грунтовых вод. При этом нехватка воды и выбросы CO_2 могут серьезно угрожать устойчивости сельского хозяйства [6]. Авторы данной работы считают, что интегрированная система может повысить урожайность и улучшить сбор воды, одновременно увеличивая потенциал поглощения углерода растениями.

Одной из важных задач обеспечения баланса потребления и выделения углекислого газа является поддержание здоровья почвы. Одним из возможных вариантов является мульчирование растительных остатков, которое способствует сохранению здоровья почвы и повышению продуктивности культур за счет умеренного влияния на температурный режим почвы и усиленного удержания влаги [7]. Мульчирование соломой способствует поддержанию сравнительно более высокого содержания влаги в почве (примерно на 2 %) и снижению температуры почвы (примерно на 1,72 °C) в период роста культуры. Одними из факторов, оказывающих влияние на эмиссию КАВ из почвы, являются варианты внесения навоза под различные культуры и способы обработки почвы. При проведении исследований влияния указанных факторов на пахотных темно-каштановых почвах наблюдались высокие значения выбросов парниковых газов [8]. Значения эмиссии CO_2 зависят от температуры почвы и воздуха, однако авторами [9] выявлено, что большее влияние оказывает влажность почвы, которая напрямую зависит от количества выпадающих осадков.

В растениеводстве, с точки зрения изучения величины выбросов КАВ в атмосферу, особое внимание необходимо уделять виду и дозам внесеных удобрений, а также способам обработки почвы. При сравнении воздействия на величину парникового эффекта применение удобрений оказывается выше, чем от проведения технологических операций обработки почвы [10]. Каждый из способов обработки почвы (отвальная вспашка, мелкая безотвальная обработка и т. д.) по-своему

оказывает влияние на эмиссию азота из серых лесных среднесуглинистых почв. Вспашка с применением минеральных удобрений приводит к наиболее высокой эмиссии N_2O. В теплый период года эмиссия CO_2 может до 4,5 раз превышать эмиссию в холодный период[1]. Концентрация CO_2 повышается с увеличением глубины участка. На глубине порядка 50 см наблюдается наибольшая концентрация. При этом содержание кислорода при увеличении глубины снижается [11].

Процессы, протекающие в почве и оказывающие влияние на выбросы, зависят не только от способов ее обработки, но и от возраста почвы. При разработке мер по снижению эмиссии КАВ в технологии производства продукции растениеводства необходимо учитывать погодные условия, особенно количество выпадающих осадков [12; 13]. Применение нулевой обработки почвы позволяет сократить на 7,6 % выделение парниковых газов с сохранением урожайности культуры, по сравнению с традиционной обработкой почвы. Помимо доз внесения удобрений на выбросы оказывают влияние физико-химические свойства почвы и соотношение C:N [14]. Ежегодное проведение отвальной обработки почвы способствует возникновению наибольшей эмиссии N_2O, по сравнению с другими видами обработки почвы [15]. В процессе вспашки происходит нарушение целостности пласта, что приводит к немедленному высвобождению CO_2 из почвы [16]. Пики потоков N_2O увеличиваются при отвальной обработке почвы в период с относительно теплыми и влажными погодными условиями [17; 18]. Сокращение интенсивности обработки почвы затрудняет переработку органического вещества микроорганизмами и снижает потери углерода и азота из почвы, а любое механическое вмешательство способствует ускорению минерализации азота, увеличивая его эмиссию [19]. При возделывании различных культур требуется применение различных доз и типов удобрений, а также приемов подготовки почвы, что по-разному сказывается на величину эмиссии парниковых газов[2]. Обеспечение изоляции материала отвала от доступа кислорода при рекультивации почвы позволяет снизить поступление КАВ в атмосферу[3]. Обеспечение данного условия также может быть использовано как один из вариантов снижения эмиссии КАВ при обработке почвы.

Для реализации возможности определения объемов выбросов и прогнозирования КАВ необходимо создание моделей, полученных на основании многочисленных эмпирических данных, причем в различных регионах данные модели могут иметь различную адекватность. Авторы исследования [20] разработали модель для оценки эмиссии парниковых газов из органических почв как с природным растительным

[1] Павлик С. В. Оценка эмиссии парниковых газов из сельскохозяйственных почв при использовании различных агротехнологий : автореф. дис. ... канд. биол. наук. СПб., 2012. 26 с.

[2] Карашаева А. С. Оценка размеров эмиссии парниковых газов при выращивании сельскохозяйственных культур // Развитие современной аграрной науки: актуальные вопросы, достижения и инновации : Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. памяти заслуженного деятеля науки РСФСР, д-ра сельскохозяйственных наук, проф. П. Г. Лучкова (8 февраля 2024 г., г. Нальчик). Нальчик : Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет имени В. М. Кокова, 2024. С. 92–98. https://elibrary.ru/hgvyhh

[3] Рекультивированные отвалы как депонирующая среда актуального и отложенного углеродного следа / П. П. Кречетов [и др.] // Почвы и окружающая среда : Всеросс. науч. конф. с междунар. участием, посвящ. 55-летию Института почвоведения и агрохимии СО РАН (2 – 6 октября 2023 г., г. Новосибирск). Новосибирск : Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт почвоведения и агрохимии Сибирского отделения РАН, 2023. С. 543–548. https://elibrary.ru/yzfupm

фоном, так и при возделывании продукции растениеводства. Модель позволяет учитывать поступление углерода в почву, связанное с разложением растительных остатков и органики почвы. Специфика выделения и поглощения газов растениями, особенности природно-климатических условий, суточные колебания эмиссии усложняют получение достоверных данных. Оценка эмиссии климатически активных веществ, проведенная только за период вегетации растений, может оказаться заниженной из-за того, что газ перераспределяется и скапливается в толще почвы [21].

Авторами для проведения данного исследования на первоначальном этапе была проведена классификация критериев экологической безопасности технических средств [22], обоснованы основные показатели оценки эффективности технологий в растениеводстве [23], на их основе получена математическая модель для прогнозирования эмиссии парниковых газов от уровня применяемых технологий [24]. В дальнейшем разработана методика оценки и прогнозирования негативного влияния машинно-тракторных агрегатов на окружающую среду, а также методика уровня выбросов парниковых газов при возделывании сельскохозяйственных культур [25; 26], которые являются сформированной базовой составляющей для моделирования процессов выделения КАВ в технологической системе обработки почвы.

Материалы и методы. Объектом исследований является технологический процесс обработки почвы отвальным, безотвальным и минимальным способами. Закономерности изменения потоков углекислого газа (CO_2) при различных способах обработки почвы на соответствующих им агрофонах являются предметом исследования.

При проведении настоящих исследований применялись методы математического моделирования, обобщения экспериментальных данных в процессе исследования эмиссии CO_2 в зависимости от вида обработки почвы.

Для проверки адекватности предлагаемой математической модели на агроэкологическом полигоне опытной станции ИАЭП – филиала ФГБНУ ФНАЦ ВИМ в 2024 г. были проведены измерения эмиссии CO_2 при различных способах обработки почвы. Измерения проводили на опытных делянках размером 120×80 м при следующих условиях: температура воздуха 24–26 °С; влажность почвы 18 %; скорость ветра 1–3 м/с; атмосферное давление 767 мм рт. ст.; тип почвы – дерново-подзолистая на карбонатном суглинке; наклон рельефа поля не более 2°.

До начала обработки твердость почвы в слое 0...10 см составляла 0,54 МПа; в слое 10...20 см – 0,73 МПа; в слое 20...30 см – 2,93 МПа.

На рисунках 1–3 представлено проведение отвальной, безотвальной и минимальной обработки почвы с соответствующими почвообрабатывающими орудиями при агрегатировании трактором МТЗ-82.1.

Измерение величины выбросов CO_2 из почвы при проведении различных операций выполняли, используя метод закрытых камер. Камера выполнена из элемента трубы с раструбом и заглушки (d = 160 мм), изготовленной из поливинилхлорида. Внутри камеры размещена измерительная часть серийно выпускаемого датчика CDD 24 HTL, позволяющая одновременно с CO_2 измерять температуру и влажность внутри камеры (рис. 4).

Р и с. 1. Вспашка почвы агрегатом МТЗ-82.1+ПКМП-3-40Р

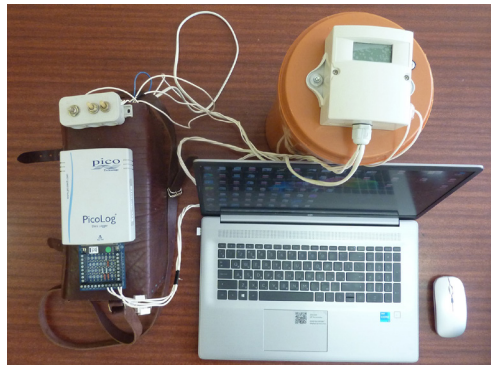
F i g. 1. Plowing the soil with the MTZ-82.1+PKMP-3-40R unit

Р и с. 2. Глубокое рыхление почвы агрегатом МТЗ-82.1+УКПА 2.4-2

F i g. 2. Chiseling the soil with the MTZ-82.1+UKPA 2.4-2 unit

Р и с. 3. Культивация агрегатом МТЗ-82.1+Kombi-3

F i g. 3. Cultivation with the MTZ-82.1+Kombi-3 unit



Р и с. 4. Оборудование для измерения величины выбросов CO_2 из почвы

F i g. 4. Equipment for measuring the CO_2 emissions from soil

Источник: фотографии для рисунков 1–4 сделаны А. В. Добриновым при проведении эксперимента по измерению эмиссии CO_2 при различных способах обработки почвы (03.09.2024 г.).

Source: photographs for figures 1–4 were taken by the A. V. Dobrinov during an experiment to measure CO_2 emissions with using various soil cultivation methods on 03.09.2024.

Стандартную ошибку выборочного среднего значения массы выбросов CO_2 в эксперименте рассчитывали по формуле:

$$S_{\bar{M}_{\text{ПГ}}} = \frac{\sigma_{M_{\text{ПГ}}}}{\sqrt{n}},$$

где $\sigma_{M_{\text{ПГ}}}$ – среднее квадратическое отклонение массы CO_2, г·ч/га; n – объем выборки.

Ошибка выборочного среднего значения $S_{\bar{M}_{\text{ПГ}}}$ массы CO_2 варьировалась в пределах от 3,37 до 6,02 г·ч/га.

Полученные в процессе экспериментальных исследований опытные данные обрабатывались по стандартной методике системы Excel.

Результаты исследования. Выделение климатически активных веществ из почвы зависит от таких весомых факторов, как температура, влажность, степень биологической активности, способов обработки почвы, а также вида, нормы и приемов внесения удобрений.

Разрабатываемая математическая модель должна описывать формализированный процесс эмиссии КАВ из почвы, характерные его закономерности изменения и охватить влияние основных факторов, перечисленных выше, не затрагивая несущественные второстепенные показатели.

Для этого рассмотрим в качестве детерминированной функции $f(x)$ характер эмиссии CO_2 из почвенного горизонта, установленный на основе экспериментальных данных в зависимости от времени начала и окончания технологического процесса обработки, температуры и влажности почвы. Аппроксимировав данные линейной функцией и разбив ее на три отрезка прямых (рис.5), получим:

$$Y = f(x) = \begin{cases} f_1(x) = A_1 + B_1(x) \text{ при } x \le x_1; \\ f_2(x) = A_2 + B_2(x) \text{ при } x_1 \le x \le x_2; \\ f_3(x) = A_3 + B_3(x) \text{ при } x_2 \le x \le x_3, \end{cases} \quad (1)$$

где A_1, A_2, A_3 – постоянные величины, которые определяются по формулам:

$$A_1 = \mathrm{CO_2}e(x_0); \quad (2)$$

$$A_2 = \mathrm{CO_2}e(x_2) + \frac{\left[\mathrm{CO_2}e(x_2) - \mathrm{CO_2}e(x_1)\right]}{(x_2 - x_1)}; \quad (3)$$

$$A_3 = \mathrm{CO_2}e(x_3) + \frac{\left[\mathrm{CO_2}e(x_3) - \mathrm{CO_2}e(x_2)\right]}{(x_3 - x_2)}; \quad (4)$$

B_1, B_2, B_3– угловые коэффициенты, которые определяются из выражений:

$$B_1 = \frac{\left[\mathrm{CO_2}e(x_1) - \mathrm{CO_2}e(x_0)\right]}{(x_1 - x_0)}; \quad (5)$$

$$B_2 = \frac{\left[\mathrm{CO_2}e(x_2) - \mathrm{CO_2}e(x_1)\right]}{(x_2 - x_1)}; \quad (6)$$

$$B_3 = \frac{\left[\mathrm{CO_2}e(x_3) - \mathrm{CO_2}e(x_2)\right]}{(x_3 - x_2)}, \quad (7)$$

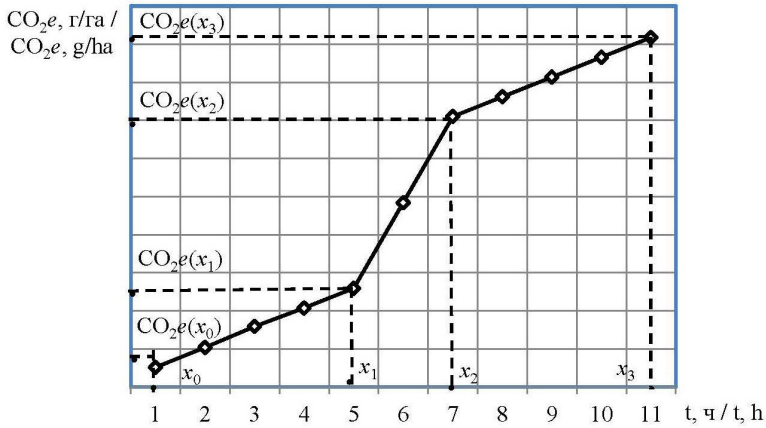
где x_0 – значение аргумента, соответствующее началу измерений эмиссии до обработки почвы; x_1–значение аргумента, соответствующее началу проведения технологической операции интенсивному выбросу из почвы; x_2 – значение аргумента, соответствующее окончанию интенсивного выброса из почвы; x_3 – значение аргумента, соответствующее началу последующей технологической операции; $\mathrm{CO_2}e(x_0)$ – выбросы углекислого газа в начале измерений до обработки почвы, г·ч/га; $\mathrm{CO_2}e(x_1)$ – выбросы углекислого газа в начале проведения технологической операции, г·ч/га; $\mathrm{CO_2}e(x_2)$ – выбросы углекислого газа, соответствующие

окончанию интенсивности от проведения операции, г·ч/га; $CO_2e(x_3)$ –выбросы углекислого газа в начале последующей операции, г·ч/га.

Из выражения (1) и рисунка 5 видно, что выбросы CO_2 из почвы определяются линейной зависимостью, то есть $Y = A + Bx$. При нормальном законе распределения аргумента (времени начала и окончания процесса) имеем:

$$\overline{Y} = A + Bm_x.$$

Таким образом, математическое ожидание (или среднее значение) выходного показателя, то есть выделение CO_2 из почвы совпадает с детерминированной функцией.



Р и с. 5. Зависимости эмиссии CO_2 из почвы от времени проведения технологической операции

F i g. 5. Dependence of CO_2 emission from soil on the time of the technological operation

Источник: графики для рисунков 5, 6 составлены авторами статьи.
Source: the graphs for figures 5, 6 were compiled by the authors of the article.

Примечание: $x_0...x_1$ – участок, соответствующий выбросам CO_2 в период от начала измерений до начала обработки почвы; $x_1…x_2$ – участок, соответствующий выбросам CO_2 в период от начала обработки почвы до окончания их интенсивного выделения; $x_2…x_3$ – участок, соответствующий выбросам CO_2 в период от окончания их интенсивности до начала следующей обработки почвы.

Note: $x_0…x_1$ – interval corresponding to CO_2 emissions in the period from the beginning of measurements to the beginning of soil cultivation; $x_1…x_2$ – interval corresponding to CO_2 emissions during the period from the beginning of soil cultivation to the end of their intensive emission; $x_2…x_3$ – interval corresponding to CO_2 emissions from the end of their intensity until the beginning of the next soil cultivation.

С учетом выражения (1) общее количество выбросов CO_2 с поля, где возделывается сельскохозяйственная культура, можно определить по формуле:

$$CO_2e = \left[(A_1 + B_1x_1) + (A_2 + B_2x_2) + (A_3 + B_3x_3)\right], \text{ г} \cdot \text{ч} / \text{га}, \qquad (8)$$

где A_1, A_2, A_3, B_1, B_2, B_3 – постоянные величины и угловые коэффициенты (2)–(7).

Необходимо отметить, что исходным материалом для определения постоянных величин A_1, A_2, A_3 и угловых коэффициентов B_1, B_2, B_3 служат случайные числа – $CO_2e(x_0)$, $CO_2e(x_1)$, $CO_2e(x_2)$, $CO_2e(x_3)$ и x_0, x_1, x_2, x_3, которые определяются

экспериментальным путем для конкретных условий проведения технологических процессов.

В качестве примера произведем расчет эмиссии CO_2 по результатам полученных значений эмиссии CO_2 в процессе основной отвальной обработки почвы, проведенной на агроэкологическом полигоне опытной станции (рис. 1).

В результате расчета определены постоянные величины и угловые коэффициенты, соответствующие почвенно-рельефным и климатическим условиям исследований.

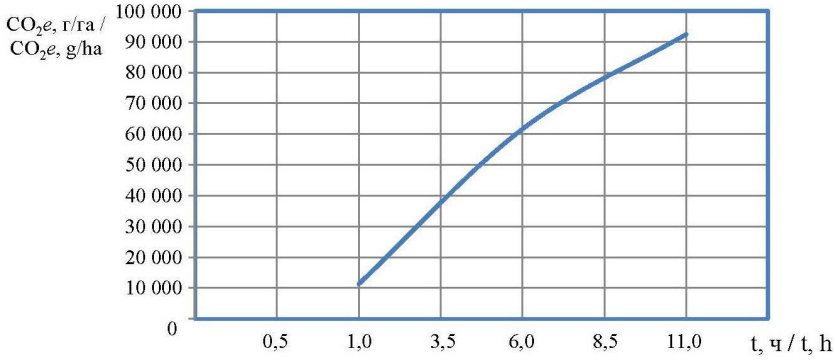
В результате расчета определены постоянные величины, г·ч/га: A_1 – 1 030,00; A_2 – 18 711,50; A_3 – 19 357,25. Также определены угловые коэффициенты, г/га: B_1 – 2 057,00; B_2 – 4 510,50; B_3 – 1 036,25, соответствующие почвенно-рельефным и климатическим условиям проведения исследований.

Наличие математической модели (8) позволяет спрогнозировать эмиссию и по другим способам обработки почвы с учетом интервалов времени до и после выполнения процесса.

В результате расчета эмиссии CO_2 по конкретным периодам во время вспашки почвы пахотным агрегатом МТЗ-82.1+ПКМП-3-40Р получены следующие значения: эмиссия CO_2 до начала обработки почвы (в течение 5 ч) – 11,3 кг/га; эмиссия CO_2 от начала обработки почвы до окончания его интенсивного выделения (в течение 7 ч) – 61,6 кг/га; эмиссия CO_2 от окончания его интенсивности до начала следующей обработки почвы (в течение 11 ч) – 92,3 кг/га.

Таким образом, для рассматриваемого технологического процесса в конкретных условиях его выполнения эмиссия CO_2 варьирует в пределах от 11 315 до 92 356 г с 1 га площади (или от 1,13 до 9,23 г с 1 м^2) в течение 11 ч перед началом вспашки до начала последующей технологической операции.

На основе полученных значений была построена зависимость усредненной суммарной эмиссии CO_2 от продолжительности технологического процесса основной отвальной обработки почвы пахотным агрегатом (рис.6).



Р и с. 6. Зависимость усредненной суммарной эмиссии CO_2 от продолжительности технологического процесса основной обработки почвы пахотным агрегатом МТЗ-82.1+ПКМП-3-40Р

F i g. 6. Dependence of the average total CO_2 emission on the duration of the technological process of primary soil cultivation by the plowing unit MTZ-82.1+PKMP-3-40R

Представленная закономерность для конкретных условий функционирования процесса вспашки пахотным агрегатом МТЗ-82.1+ПКМП-3-40Р описывается эмпирическим выражением:

$$CO_2e = -390,58t^2 + 12\,791,06t - 1\,085,48.$$

Аналогичным образом на основании данных характеристики почвы, ее температуры, влажности, степени биологической активности, уровня минерального питания и временных составляющих технологического процесса с помощью разработанной модели можно определить и спрогнозировать выделение КАВ, в частности CO_2, для процессов глубокого безотвального рыхления и мелкой поверхностной обработки почвы.

Обсуждение и заключение. Разработана математическая модель для определения и прогнозирования выбросов углекислого газа при различных способах обработки почвы и приведен пример расчета эмиссии CO_2 от вспашки. Предложенная модель позволяет описать закономерность выделения газа за весь период проведения отдельной технологической операции.

Для повышения точности вычислений требуются дополнительные экспериментальные исследования по уточнению значений постоянных величин, угловых коэффициентов предложенной модели для различных способов обработки почвы с учетом почвенно-рельефных и климатических условий конкретной зоны возделывания сельскохозяйственных культур. Полученные значения должны быть учтены и структурированы в определенную базу данных о потоках CO_2 при производстве сельскохозяйственной продукции растениеводства.

Для решения проблемы прогнозирования выбросов климатически активных веществ от технологий возделывания сельскохозяйственных культур на основе предложенной модели необходимо разработать обобщенную математическую модель с учетом временных, почвенных и погодных условий региона. Обобщенная математическая модель должна обеспечить с высокой вероятностью прогнозирование суммарной эмиссии климатически активных веществ от начала полевых работ до уборки урожая.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/ REFERENCES

1. Ахметшина Л.Г., Порвадов М.Г., Шангутов А.О. Оценка выбросов парниковых газов при возделывании сельскохозяйственных земель в концепте государственной экологической политики. *Международный сельскохозяйственный журнал.* 2023;66(6):566–571. https://doi.org/10.55186/25876740_2023_66_6_566
   Akhmetshina L.G., Porvadov M.G., Shangutov A.O. Assessment of Greenhouse Gas Emissions from the Cultivation of Agricultural Land in the Concept of State Environmental Policy. *International Agricultural Journal*. 2023;66(6):566–571. (In Russ., abstract in Eng) https://doi.org/10.55186/25876740_2023_66_6_566
2. Mühlbachová G., Kusá H., Růžek P., Vavera R. CO_2 Emissions in a Soil Under Different Tillage Practices. *Plant*, *Soil and Environment.* 2022;68(6):253–261. https://doi.org/10.17221/110/2022-PSE
3. Wang W., Akhtar K., Ren G., Yang G., Feng Y., Yuan L. Impact of Straw Management on Seasonal Soil Carbon Dioxide Emissions, Soil Water Content, and Temperature in a Semi-Arid Region of China. *Science of The Total Environment.* 2019;652:471–482. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.207

4. Nishigaki T., Sugihara S., Kilasara M., Funakawa S. Carbon Dioxide Flux and Soil Carbon Stock as Affected by Crop Residue Management and Soil Texture in Semi-Arid Maize Croplands in Tanzania. *Soil Use and Management.* 2021;37(1):83–94. https://doi.org/10.1111/sum.12680
5. Grzyb A., Wolna-Maruwka A., Niewiadmska A. Environmental Factors Affecting the Mineralization of Crop Residues. *Agronomy.* 2020;10(12):1951. https://doi.org/10.3390/agronomy10121951
6. Guo Y., Yin W., Chai Q., Fan Z., Hu F., Fan H., et al. No Tillage with Previous Plastic Covering Increases Water Harvesting and Decreases Soil CO_2 Emissions of Wheat in Dry Regions. *Soil and Tillage Research.* 2021;208:104883. https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104883
7. Noor M.A., Nawaz M.M., Ma W., Zhao M. Wheat Straw Mulch Improves Summer Maize Productivity and Soil Properties. *Italian Journal of Agronomy.* 2021;16(1):1623. https://doi.org/10.4081/ija.2020.1623
8. Кусаинова М.Д., Тойшиманов М.Р., Таменов Т.Б., Сыздык А.Б. Джикуан Ч. Изучение эффективности различных систем землепользования для смягчения климата посредством измерения эмиссии парниковых газов. *Центральноазиатский журнал исследований водных ресурсов.* 2023;9(2):17–34. https://doi.org/10.29258/CAJWR/2023-R1.v9-2/17-34
Kussainova M.D., Toishimanov M.R., Tamenov T.B., Syzdyk A.B., Jiquan C. Studying the Climate Mitigation Efficiency of Various Land-Use Systems by Measuring Greenhouse Gas Emissions. *Central Asian Journal of Water Resources Research.* 2023;9(2):17–34. (In Russ., abstract in Eng.) https://doi.org/10.29258/CAJWR/2023-R1.v9-2/17-34
9. Спыну М.Т., Тихонова М.В., Илюшкова Е.М., Бузылёв А.В., Жигалева Я.С. Динамика эмиссии парниковых газов в почвах экологического стационара РГАУ-МСХА имени К. А. Тимирязева. *АгроЭкоИнфо.* 2022;(4). https://doi.org/10.51419/202124429
Spynu M.T., Tikhonova M.V., Glushkova E.M., Buzylev A.V., Zhigalova Ya.C. [Dynamics of Greenhouse Gas Emissions in Soils of the Ecological Station of the Russian State Agrarian University-Moscow Agricultural Academy named after K. A. Timiryazeva]. *AgroEcoInfo*. 2022;(4). (In Russ.) https://doi.org/10.51419/202124429
10. Shao H. Agricultural Greenhouse Gas Emissions, Fertilizer Consumption, and Technological Innovation: A Comprehensive Quantile Analysis. *Science of the Total Environment.* 2024;926:171979. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171979
11. Кидин В.В., Прасолова А.А. Газообразные потери азота и динамика почвенного дыхания из разных слоев дерново-подзолистой почвы. *Агрохимический вестник.* 2014;(5):29–31. https://elibrary.ru/stilot
Kidin V.V., Prasolova A.A. Gaseous Nitrogen Losses and Soil Breath Dynamics of Different Layers from Sod-Podzolic Soils. *Agrochemical Herald*. 2014;(5):29–31. (In Russ., abstract in Eng.) https://elibrary.ru/stilot
12. Bhattacharyya S.S., Dorilêo Leite F.F.G., France C.L., Adekoya A.O., Ros G.H., de Vries W., et al. Soil Carbon Sequestration, Greenhouse Gas Emissions, and Water Pollution Under Different Tillage Practices. *Science of the Total Environment.* 2022;826:154161. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154161
13. Zhao J., Hu Ya., Wang J., Gao W., Liu D., Yang M., et al. Greenhouse Gas Emissions from the Growing Season are Regulated by Precipitation Events in Conservation Tillage Farmland Ecosystems of Northeast China. *Science of the Total Environment.* 2024;948:174716. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.174716
14. Shakoor A., Shahbaz M., Farooq T.H., Sahar N.E., Shahzad S.M., Altaf M.M., et al. A Global Meta-Analysis of Greenhouse Gases Emission and Crop Yield Under No-Tillage as Compared to Conventional Tillage. *Science of the Total Environment.* 2021;750;142299. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142299
15. Зинченко С.И., Бучкина Н.П. Влияние приемов основной обработки серой лесной почвы на эмиссию закиси азота. *Владимирский земледелец.* 2018;(4):7–11. https://doi.org/10.24411/2225-2584-2018-10032

Zinchenko S.I., Buchkina N.P. Influence of Gray Forest Soil Tillage Methods on Nitrogen Oxide Emission. *Vladimir Agricolist.* (In Russ., abstract in Eng.) 2018;(4):7–11. https://doi.org/10.24411/2225-2584-2018-10032

16. Willems A.B., Augustenborg C.A., Hepp S., Lanigan G., Hochstrasser T., Kammann C., et al. Carbon Dioxide Emissions from Spring Ploughing of Grassland in Ireland. *Agriculture, Ecosystems and Environment.* 2011;144(1):347–351. https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.10.001
17. Bleken M.A., Rittl T.F. Soil pH-Increase Strongly Mitigated N_2O Emissions Following Ploughing of Grass and Clover Swards in Autumn: A Winter Field Study. *Science of the Total Environment.* 2022;828:154059. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154059
18. Gong Y., Li P., Lu W., Nishiwaki J., Komatsuzaki M. Response of Soil Carbon Dioxide Emissions to No-Tillage and Moldboard Plow Systems on Andosols in a Humid, Subtropical Climate, Japan. *Geoderma.* 2021;386:114920. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114920
19. Соколов М.С., Глинушкин А.П., Спиридонов Ю.Я., Торопова Е.Ю., Филипчук О.Д. Технологические особенности почвозащитного ресурсосберегающего земледелия (в развитие концепции ФАО). *Агрохимия.* 2019;(5):3–20. URL: https://sciencejournals.ru/view-article/?j=agro&y=2019&v=0&n=5&a=Agro1905003Cokolov (дата обращения: 28.09.2024).
Sokolov M.S., Glinushkin A.P., Spiridonov Yu.Ya., Toropova E.Yu., Filipchuk O.D. Technological Features of Soil-Protecting Resource-Saving Agriculture (in Development of the FAO Concept). *Agrochemistry*. 2019;(5):3–20. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: https://sciencejournals.ru/view-article/?j=agro&y=2019&v=0&n=5&a=Agro1905003Cokolov (accessed 28.09.2024).
20. Полевой А.Н., Микитюк А.Ю. Моделирование эмиссии CO_2, CH_4, NO, N_2O из органических почв (Peat-GHG-Model). *Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем.* 2016;27(1):5–26. https://doi.org/10.21513/0207-2564-2016-1-5-26
Polevoy A.N., Mykytiuk A.Yu. Modeling Emissions of CO_2, CH_4, NO, N_2O from Organic Soils (Peat-GHG-Model). *Problems of Ecological Monitoring and Ecosystem Modelling*. 2016;27(1):5–26. (In Russ., abstract in Eng.) https://doi.org/10.21513/0207-2564-2016-1-5-26
21. Смагин А.В., Садовникова Н.Б., Щерба Т.Э., Шнырев Н.А. Абиотические факторы дыхания почв. *Экологический вестник Северного Кавказа.* 2010;6(1):5–13. URL: http://ecokavkaz.ru/en/journal/2010/t-6-1 (дата обращения: 28.09.2024).
Smagin A.V., Sadovnikova N.B., Sherba T.E., Shnyrev N.A. Abiotic Factors of Soil's Respiration. *The North Caucasus Ecological Herald.* 2010;6(1):5–13. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: http://ecokavkaz.ru/en/journal/2010/t-6-1 (accessed 28.09.2024).
22. Джабборов Н.И., Мишанов А.П., Добринов А.В. Прогнозирование выбросов парниковых газов в растениеводстве от уровня применяемых технологий. *АгроЭкоИнженерия.* 2024;(1):70–82. https://doi.org/10.24412/2713-2641-2024-1118-70-82
Dzhabborov N.I., Mishanov A.P., Dobrinov A.V. Forecasting of Greenhouse Gas Emissions in Crop Production Depending on Applied Technology Level. *AgroEcoEngineering*. 2024;(1):70–82. (In Russ., abstract in Eng.) https://doi.org/10.24412/2713-2641-2024-1118-70-82
23. Джабборов Н.И., Семенова Г.А. Классификация критериев оценки экологической безопасности технических средств в растениеводстве. *АгроЭкоИнженерия.* 2022;(1):84–102. https://doi.org/10.24412/2713-2641-2022-1110-84-102
Dzhabborov N.I., Semenova G.A. Classification of Criteria for Assessing the Environmental Friendliness of Machines and Equipment in Crop Production. *AgroEcoEngineering*. 2022;(1):84–102. (In Russ., abstract in Eng.) https://doi.org/10.24412/2713-2641-2022-1110-84-102
24. Добринов А.В., Джабборов Н.И., Сухопаров А.И. Показатели оценки эффективности и экологической безопасности технологий и технических средств производства продукции растениеводства. *АгроЭкоИнженерия.* 2022;(3):39–50. https://doi.org/10.24412/2713-2641-2022-3112-39-50
Dobrinov A.V., Dzhabborov N.I., Sukhoparov A.I. Indicators for Assessing the Efficiency and Environmental Safety of Technologies, Machines and Equipment for Crop Production. *AgroEcoEngineering*. 2022;(3):39–50. (In Russ., abstract in Eng.) https://doi.org/10.24412/2713-2641-2022-3112-39-50

25. Джабборов Н.И., Захаров А.М., Жуйков И.И. Методика оценки и прогнозирования негативного влияния машинно-тракторных агрегатов на окружающую среду. *АгроЭкоИнженерия.* 2023;(2):82–97. https://doi.org/10.24412/2713-2641-2023-2115-82-96
Dzhabborov N.I., Zakharov A.M., Zhuykov I.I. Methodology for Assessing and Forecasting the Adverse Effect of Machine-Tractor Units on the Environment. *AgroEcoEngineering*. 2023;(2):82–97. (In Russ., abstract in Eng.) https://doi.org/10.24412/2713-2641-2023-2115-82-96
26. Джабборов Н.И., Мишанов А.П., Захаров А.М., Добринов А.В. Методика оценки уровня выбросов парниковых газов при возделывании сельскохозяйственных культур. *Сельскохозяйственные машины и технологии.* 2024;18(3):75–81. https://doi.org/10.22314/2073-7599-2024-18-3-75-81
Dzhabborov N.I., Mishanov A.P., Zakharov A.M., Dobrinov A.M. Methodology for Assessing the Level of Greenhouse Gas Emissions in Agricultural Crops Production. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2024;18(3):75-81. (In Russ., abstract in Eng.) https://doi.org/10.22314/2073-7599-2024-18-3-75-81

Об авторах:

Джабборов Нозим Исмоилович, доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник отдела агроэкологии в растениеводстве Института агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства – филиала ФГБНУ ФНАЦ ВИМ (196634, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, п. Тярлево, Фильтровское ш., д. 3), ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8910-2625, Researcher ID: A-7780-2019, nozimjon-59@mail.ru

Добринов Александр Владимирович, кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник отдела агроэкологии в растениеводстве Института агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства – филиала ФГБНУ ФНАЦ ВИМ (196634, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, п. Тярлево, Фильтровское ш., д. 3), ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3242-1235, Researcher ID: AAC-9655-2020, a.v.dobrinov@yandex.ru

Мишанов Алексей Петрович, старший научный сотрудник отдела агроэкологии в растениеводстве Института агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства – филиала ФГБНУ ФНАЦ ВИМ (196634, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, п. Тярлево, Фильтровское ш., д. 3), ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9838-5508, amishanov@mail.ru

Савельев Анатолий Петрович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры безопасности жизнедеятельности Национального исследовательского Мордовского государственного университета (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевистская, д. 68), ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0361-0827, Researcher ID: AAB-2078-2021, tbsap52@mail.ru

Вклад авторов:

Н. И. Джабборов – контроль, лидерство и наставничество в процессе планирования и проведения исследования; формулирование идеи исследования, целей и задач.

А. В. Добринов – применение статистических, математических, вычислительных и других формальных методов для анализа данных исследования; создание и подготовка рукописи: написание черновика рукописи, включая его перевод на иностранный язык.

А. П. Мишанов – осуществление научно-исследовательского процесса, включая выполнение экспериментов и сбор данных; создание и подготовка рукописи: визуализация результатов исследования и полученных данных.

А. П. Савельев – осуществление научно-исследовательского процесса, включая выполнение экспериментов и сбор данных; создание и подготовка рукописи: визуализация результатов исследования и полученных данных.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Поступила в редакцию 20.01.2025; поступила после рецензирования 05.02.2025;
принята к публикации 14.02.2025

About the authors:

Nozim I. Jabborov, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Leading Researcher of the Department of Agroecology in Crop Production, Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production (IEEP) branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM (3 Filtrovskoye Shosse, Tiarlevo, St. Petersburg 196625, Russian Federation), ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8910-2625, Researcher ID: A-7780-2019, nozimjon-59@mail.ru

Aleksandr V. Dobrinov, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor, Senior Researcher of the Department of Agroecology in Crop Production, Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production (IEEP) branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM (3 Filtrovskoye Shosse, Tiarlevo, St. Petersburg 196625, Russian Federation), ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3242-1235, Researcher ID: AAC-9655-2020, a.v.dobrinov@yandex.ru

Aleksei P. Mishanov, Senior Researcher of the Department of Agroecology in Crop Production, Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production (IEEP) branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM (3 Filtrovskoye Shosse, Tiarlevo, St. Petersburg 196625, Russian Federation), ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9838-5508, amishanov@mail.ru

Anatoliy P. Savelyev, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Chair of Life Safety, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0361-0827, Researcher ID: AAB-2078-2021, tbsap52@mail.ru

Authors contribution:

N. I. Jabborov – controling, leading and mentoring the process of planning and conducting the study; formulating the study idea, aims and objectives.

A. V. Dobrinov – using the statistical, mathematical, computational and other formal methods to analyze the study data; preparing the manuscript: writing a manuscript draft including its translation into a foreign language.

A. P. Mishanov – conducting the study, including carrying out experiments and collecting data; preparing the manuscript: visualizing the study results and obtained data.

A. P. Savelyev – conducting the study process, including carrying out experiments and collecting data; preparing the manuscript: visualizing the study results and obtained data.

All authors have read and approved the final manuscript.

Submitted 20.01.2025; revised 05.02.2025; accepted 14.02.2025