

ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

Научная статья

УДК 543.544.3

doi: 10.17308/sorpchrom.2025.25/13474

Верификация модели DNDC для оценки эмиссии углекислого газа на сельскохозяйственных полях с использованием метода газовой хроматографии

Владимир Игоревич Платонов^{1✉}, Наталья Михайловна Троц²,
Светлана Александровна Платонова¹, Сергей Владимирович Ворон³,
Анна Алексеевна Бокова², Алексей Александрович Курепов¹

¹Самарский национальный исследовательский университет имени С.П. Королева, Самара, Россия,
govvv@yandex.ru[✉]

²Самарский государственный аграрный университет, Кинель, Россия

³Судебно-экспертное учреждение федеральной противопожарной службы «Испытательная пожарная лаборатория» по Самарской области, Самара, Россия

Аннотация. Впервые исследована и верифицирована эмиссия парникового газа CO₂, на двух тестовых сельскохозяйственных полях с различным способом обработки почвы (no-till, традиционная отвальная вспашка) газохроматографическим методом с использованием планарных микрофлюидных систем и имитационной модели DNDC на территории Самарской области. Показано, что разработанная аналитическая система на основе планарной микрофлюидной газовой хроматографии может успешно применяться для прямого газохроматографического измерения эмиссии парниковых газов и способствует упрощению аналитического комплекса и сокращению времени анализа. Показано, что значения эмиссии CO₂, полученные с использованием имитационной модели DNDC хорошо согласуются с экспериментальными при корректировке внутренних параметров программы. Лучшая сходимость данных наблюдается для сельскохозяйственного поля с использованием традиционной обработки почвы, тогда как моделирование потоков парниковых газов на полях с нулевой обработкой, вероятно, можно улучшить путем введения дополнительных корректировочных коэффициентов. После параметризации и верификации модели DNDC расчет выбросов углекислого газа за 2024 год показал, что применение no-till технологии приводит к небольшому увеличению суммарного потока углекислого газа в 1.1 раза по сравнению с полем с традиционной обработкой почвы, что объясняется повышенной активностью и количеством почвенных микроорганизмов в почве при использовании no-till технологии и является вполне закономерным для данного типа почв. Кроме того, разница в эмиссии из почвы на двух тестовых полях нивелируется (около 2 т С/га) при учете суммарных выбросов углекислого газа (почвенное дыхание, работа сельскохозяйственной техники и т.д.), которые показывают значительное увеличение общего потока CO₂ для поля с традиционной обработкой (порядка 9.77 т С/га для традиционной вспашки по сравнению с 2.5 т С/га при использовании технологии no-till). Таким образом, использование no-till технологии приводит к общему снижению потоков CO₂ за счет снижения сжигания топлива при работе сельскохозяйственной техники и применении природосберегающих практик. Моделирование с использованием DNDC показало, что нулевая обработка почвы характеризуется в 2 раза большим содержанием почвенных микроорганизмов, а общее содержание органического углерода в почве на конец года для поля с no-till выше в 1.3 раза по сравнению с традиционно обрабатываемым полем, что способствует сохранению здоровья и увеличению плодородия почвы.

Ключевые слова: парниковые газы, газовая хроматография, эмиссия, DNDC, моделирование, no-till, традиционная вспашка, микрофлюидные системы.

Благодарности: работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, проект FSSS-2024-0022 (регистрационный номер: 1023112900147-4 от 31.01.24).

Для цитирования: Платонов В.И., Троц Н.М., Платонова С.А., Ворон С.В., Бокова А.А., Курепов А.А. Верификация модели DNDC для оценки эмиссии углекислого газа на сельскохозяйственных полях с



использованием метода газовой хроматографии // Сорбционные и хроматографические процессы. 2025. Т. 25, № 6. С. 826-838. <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2025.25/13474>

Original article

Verification of the DNDC model for estimating carbon dioxide emissions from agricultural fields using gas chromatography

Vladimir I. Platonov¹✉, Natalya M. Trots², Svetlana A. Platonova¹,
Sergey V. Voron³, Anna A. Bokova², Alexey A. Kurepov¹

¹Samara National Research University, Samara, Russian Federation, rovvv@yandex.ru✉

²Samara State Agrarian University, Kinel, Russian Federation

³Federal State Budgetary Institution "Forensic Institution of the Federal Fire Service "Fire Testing Laboratory" for the Samara Region", Samara, Russian Federation

Abstract. For the first time, the emission of greenhouse gas CO₂ was investigated and verified in two test agricultural fields with different tillage methods (no-till, traditional dump plowing) using the gas chromatographic method using planar microfluidic systems and a DNDC simulation model in the Samara region. It is shown that the developed analytical system based on planar microfluidic gas chromatography can be successfully used for direct gas chromatographic measurement of greenhouse gas emissions and helps simplify the analytical complex and reduce the analysis time. It is shown that the CO₂ emission values obtained using the DNDC simulation model are in good agreement with the experimental values when adjusting the internal parameters of the program. The best convergence of data is observed for an agricultural field using traditional tillage, while modeling greenhouse gas fluxes in fields with zero tillage can probably be improved by introducing additional adjustment coefficients. After parameterization and verification of the DNDC model, the calculation of carbon dioxide emissions for 2024 showed that the use of no-till technology leads to a slight increase in the total carbon dioxide flux by 1.1 times compared to the field with traditional tillage, which is explained by the increased activity and number of soil microorganisms in the soil when using no-till technology and is quite natural for this type of soil. In addition, the difference in soil emissions from the two test fields is offset (about 2 t/ha) when taking into account total carbon dioxide emissions (soil respiration, agricultural machinery, etc.), which show a significant increase in the total CO₂ flux for a field with traditional cultivation (about 9.77 t/ha for traditional plowing compared to 2.5 t/ha when using no-till technology). Thus, the use of no-till technology leads to an overall reduction in CO₂ fluxes by reducing fuel combustion during the operation of agricultural machinery and the application of environmentally friendly practices. Modeling using DNDC showed that zero tillage is characterized by a 2-fold higher content of soil microorganisms, and the total organic carbon content in the soil at the end of the year for a field with no-till is 1.3 times higher than in a traditionally cultivated field, which contributes to maintaining health and increasing soil fertility.

Keywords: greenhouse gases, gas chromatography, emission, DNDC, modeling, no-till, traditional plowing, microfluidic systems.

Acknowledgments: the study was supported by the Ministry Education and Science of the Russian Federation under project FSSS-2024-0022 (Registration number: 1023112900147-4, 31.01.24)

For citation: Platonov V.I., Trots N.M., Platonova S.A., Voron S.V., Bokova A.A., Kurepov A.A. Verification of the DNDC model for estimating carbon dioxide emissions from agricultural fields using gas chromatography. *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy*. 2025. 25(6): 826-838. (In Russ.). <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2025.25/13474>

Введение

Изменение содержания парниковых газов (ПГ) в атмосфере существенно влияет на температуру земной поверхности, поэтому изучение способов измерения и управления накоплением ПГ может способствовать стабилизации климата [1, 2].

Сельскохозяйственная деятельность является одним из самых мощных антропогенных источников CO₂ для атмосферы. Управление агроэкосистемами играет важную роль в глобальном углеродном цикле, при этом тип почвы и растительности, а также направление и интенсивность антропогенного воздействия являются одними из основных факторов,

определяющих пространственную изменчивость потоков газов из почв [3-6]. Поэтому возникает необходимость разработки стратегии измерения и снижения эмиссии парниковых газов в результате сельскохозяйственного землепользования [7].

Так, в работах [8, 9] показано, что традиционная отвальная обработка почвы (conventional tillage, CT) вызывает эрозию почвы, что ведет к потере углерода из почвы через выбросы CO_2 и выщелачивание, а также способствует потере микробиологического разнообразия. На сегодняшний день постоянно ведется поиск новых технологических подходов при производстве сельскохозяйственной продукции для предотвращения негативного влияния на почву традиционно используемых агрономических практик. Одним из таких подходов является внедрение ресурсосберегающих технологий, таких как no-till (нулевая обработка почвы, NT). Применение технологии no-till может способствовать получению высокого урожая при снижении затрат на производство за счет меньших затрат топлива и труда [10]. Кроме того, показано [11-13], что использование no-till технологии увеличивает запасы углерода в почве.

Тем не менее, существуют расхождения во влиянии способа обработки почвы на выбросы парниковых газов. В литературе представлены работы, по результатам которых наблюдалось уменьшение эмиссии CO_2 из почв с no-till технологией по сравнению с традиционной вспашкой [13-16]. Несколько исследований in situ обнаружили, что эмиссия CO_2 , измеренная на полях с нулевой и традиционной обработками почвы сопоставимы [17,18]. Однако в [19] обнаружили более высокие выбросы CO_2 на полях с no-till по сравнению с традиционно обработанными почвами (на 13%). Авторы [20] показали, что в центральном Китае нулевая обработка почвы увеличила выбросы CO_2 из почвы на 22-40% по сравнению с традиционной

обработкой. Это было связано с повышенным разложением пожнивных остатков и повышенной влажностью почвы на полях с no-till технологией. Повышенная влажность почвы при нулевой обработке почвы может способствовать увеличению эмиссии CO_2 , что связано с возрастанием микробиологической активности [21]. Авторы [22] подчеркивают важность включения информации о почвенных факторах, таких как текстура, стабильность агрегатов и содержание органического углерода, в глобальные модели углеродного цикла. Так, в работах [19, 20] наблюдалось увеличение эмиссии углекислого газа из почвы при нулевой обработке по сравнению с традиционной отвальной вспашкой на сельскохозяйственных полях с большим содержанием глины (22-47%) и меньшим содержанием фракции песка (3-9%).

Таким образом, изменение выбросов ПГ в зависимости от способа обработки может быть различным ($\text{CT} > \text{NT}$, $\text{CT} < \text{NT}$, $\text{CT} = \text{NT}$) и зависит от физико-химических свойств почвы, таких как текстура почвы, pH и соотношение C:N, содержания углерода в почве, климатических условий и севооборота, а также продолжительности практики обработки почвы. Поэтому вопрос о влиянии отказа от обработки почвы на выбросы парниковых газов в конкретных климатических условиях является важным и требует детального изучения.

Как правило, для оценки эмиссии парниковых газов проводят отбор проб из паровой фазы с использованием метода статической закрытой камеры. Затем пробы герметизируют и транспортируют в лабораторию для анализа [3]. Это является довольно трудоемким и длительным процессом. Когда как разработка и применение портативных комплексов позволяет сократить время анализа и измерять газовые потоки непосредственно в полевых условиях (in situ), что в свою очередь спо-

Таблица 1. Название и характеристика исследуемого участка
Table 1. Name and characteristics of the studied area

| Поле | Описание |
|------------|--|
| A802 | No-till, возделываемая культура – яровая пшеница, без полива, удобрения – аммиачная селитра 150 кг/га (1 мая) |
| A802_Сосед | Традиционная вспашка, возделываемая культура – яровая пшеница, без полива, удобрения – аммиачная селитра 100 кг/га (1 мая) |

способствует снижению погрешностей эксперимента и экономически облегчает мониторинг эмиссии парниковых газов. Поэтому разработка портативных комплексов для исследования эмиссии ПГ является актуальной и востребованной.

Помимо экспериментального мониторинга эмиссии ПГ для круглогодичного исследования циклов углерода и азота широко используют имитационное моделирование. В настоящее время международное признание получила модель DNDC (DeNitrification – DeComposition) – процессно-ориентированная имитационная модель, созданная для оценки динамики основных биогенных парниковых газов в почвах сельскохозяйственного назначения в зависимости от климатических условий, состава почвы, а также сельскохозяйственной практики на выбранной территории. Эта модель широко и успешно применяется в мире и показала хорошие результаты при моделировании потоков углерода и азота [23-25].

Однако, чтобы имитационная модель DNDC наиболее точно отражала биогеохимический цикл углерода в конкретном регионе, ее необходимо настроить в соответствии с географическими условиями местности [26, 27].

Поэтому целью данной работы являлось измерение эмиссии углекислого газа с использованием специально разработанного аналитического комплекса на базе портативного хроматографа “ПИА” (ООО «НПФ МЭМС», г. Самара) и верификация имитационной модели DNDC для оценки выбросов ПГ на сельскохозяйственных полях с различным способом обработки почвы (no-till и традиционная вспашка).

Экспериментальная часть

Опыт закладывался на территории карбонового полигона в ООО «Орловка-АИЦ» Самарской области. Координаты исследуемой территории: 53°81' северной широты и 51° 90' восточной долготы. Климат региона – континентальный. Средняя температура воздуха наиболее теплого месяца (июль): +19 - +22°C, самого холодного (январь): -13.5-14.0°C. Количество атмосферных осадков колеблется от 200 до 600 мм. Средняя температура вегетационного периода 18.38-19.52 °C, среднее количество осадков, приходящееся на вегетационный период 32-69 мм. Название опытов и маркировка полей указаны в таблице 1. Технология no-till на поле A802 реализуется в течение 8 лет, ранее данный участок обрабатывался с использованием традиционной отвальной вспашки.

На рис.1 представлен снимок, полученный для исследуемых агроландшафтов 17.07.2024 с указанием расположения исследуемых участков и их названия.

Почвенный покров – чернозем типичный мало- и среднегумусный среднесиловой слабосмытый легкоглинистый, категория земель – земли сельскохозяйственного назначения. Согласно единому государственному реестру почвенных ресурсов России гранулометрический состав почвы (чернозем типичный, Самарская область) характеризуется содержанием частиц <0.001мм – 26% (пыль), <0.01мм – 71% (глина), >0.01мм – 3% (песок) [28].

Для экспериментального измерения потоков углекислого газа использовали



Рис. 1. Снимок исследуемых агроландшафтов A802 (no-till) и A 802_Сосед (традиционная вспашка) от 17.07.2024.

Fig. 1. A snapshot of the studied agricultural landscapes A802 (no-till) and A 802_COST (traditional plowing) from 07/17/2024

аналитический комплекс на базе портативного газового хроматографа «ПИА» (рис. 2).

Для анализа углекислого газа в почвенном воздухе использовали микродетектор по теплопроводности и планарную газохроматографическую колонку с адсорбентом «Рогарак Q». Габариты разработанного и изготовленного хроматографа 24×15×90 см, вес хроматографа – 1.5 кг, габариты разработанного комплекса вместе со всей необходимой для полевых работ периферией: 40×20×40 см, вес – 10 кг, время автономной работы – 20 часов, предел определения по CO₂ – 0.0005‰.

Для проведения калибровок средств измерений, а также контроля метрологических характеристик был использован ГСО 10606-2015. Для построения абсолютных градуировочных зависимостей была использована поверочная газовая смесь ПГС CO₂ в гелии 508 ppm. Среднеквадратичное отклонение для углекислого газа составило 0.2% (что соответствует величине 1.32 ppm). На рис. 3 представлена типовая хроматограмма определения углекислого газа, полученная на аналитическом комплексе.

Для расчёта пределов детектирования использовали формулу:



Рис. 2. Мобильный аналитический комплекс на базе портативного хроматографа «ПИА» производства ООО «НПФ МЭМС», г. Самара.

Fig. 2. Mobile analytical complex based on the portable chromatograph "PIA" manufactured by NPF MEMS LLC, Samara.

$$c = \frac{3 \times \Delta x}{\bar{A}}, \quad (1)$$

где \bar{A} – среднее арифметическое значение площади хроматографического пика, $B \cdot c$; Δx – шум детектора, F ; C – расход газа-носителя на выходе колонки, см³/с.

Расчёт СКО производили по формуле:

$$s_g = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (g_{pr} - \bar{g}_{pr})^2}{n(n-1)}}, \quad (2)$$

где g_{pr} – значение высоты, площади или времени удерживания вещества в выборке; \bar{g}_{pr} – среднее арифметическое значение измеряемых величин; N – количество измерений.

Расчет скорости эмиссии CO₂ из почвы производили по формуле:

$$E_{CO_2} = (C_2 - C_1) \times H / \tau, \quad (3)$$

где E_{CO_2} – скорость эмиссии CO₂, мг С/м² час; C_2 и C_1 – конечная и начальная концентрации CO₂ внутри закрытой динамической камеры, мг С/м³; H – высота камеры над поверхностью почвы, м; τ – продолжительность насыщения внутреннего объема камеры, час.

Учитывая измерение концентрации газа в ppm, получаем следующую формулу для расчета (основанную на использовании уравнения Менделеева-Клапейрона):

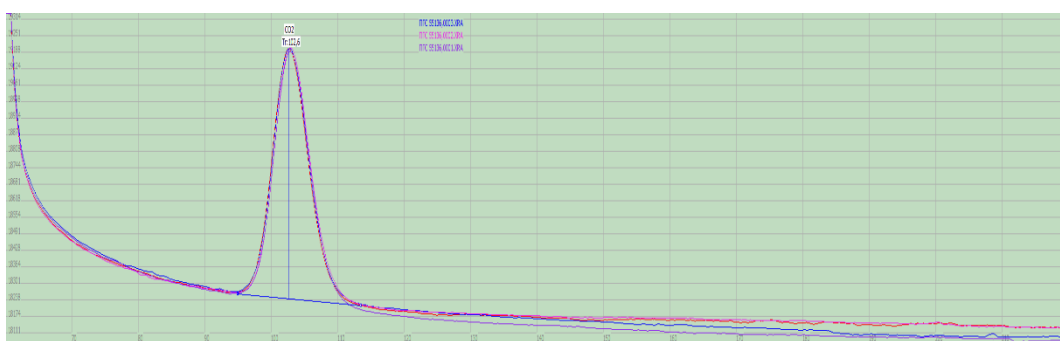


Рис. 3. Типовая хроматограмма определения углекислого газа (концентрация 541 ppm). Хроматографическая колонка сечением 1 x 1 мм, длиной 2 м, заполненная Porapak N с зернением 80/100 меш; температурный режим термостата колонок - изотермический; рабочая температура термостата колонок 70-90°C; тип газа-носителя – гелий ($\geq 99.99\%$); расход газа-носителя 10-12 см³/мин; тип детектора - ДТП; объём дозы 300 мкл; время анализа 2 мин.
Fig. 3. Typical chromatogram of carbon dioxide determination (concentration 541 ppm). Chromatographic column with a cross-section of 1 x 1 mm, 2 m long, filled with Porapak N with a grain size of 80/100 mesh; the temperature regime of the column thermostat is isothermal; the operating temperature of the column thermostat is 70-90°C; the type of carrier gas is helium ($\geq 99.99\%$); the flow rate of the carrier gas is 10-12 cm³/min; the type of detector - DTP; dose volume 300 µl; analysis time 2 min.

$$E_{CO_2} = \frac{M_{CO_2} \times V \times (C_2 - C_1) \times P}{R \times (273 + T) \times S \times \tau \times 10^6}, \quad (4)$$

где E_{CO_2} – значение эмиссии CO₂ из почвы, г CO₂/м² час; M_{CO_2} – молярная масса CO₂, г/моль; V – объём камеры (дм³), включая соединительные шланги, микронасос и корпус датчика; $(C_2 - C_1)$ – изменение концентрации CO₂ в камере в течение интервала измерения (ppm); P – давление, атм; R – универсальная газовая постоянная (0.0821 дм³ атм/моль К); T – средняя температура воздуха внутри камеры во время измерения (°C); S – площадь основания камеры, м²; τ – продолжительность насыщения внутреннего объёма камеры, час; 10^6 – коэффициент для перевода ppm в безразмерные доли.

Пробоотбор проводился методом закрытой динамической камеры (цилиндрическая непрозрачная ПВХ-труба объёмом 1300 см³ с герметичной крышкой), которую располагали на выбранном участке ровной местности для каждого исследуемого поля. Из каждой камеры в равные промежутки времени газ автоматически откачивался внешним компрессором под управлением программного обеспечения хроматографа, и подавался на ввод пробы

в хроматограф. Выход пробы из хроматографа направлен обратно в камеру, образуя тем самым закрытую циклическую систему.

Метеорологические данные были взяты из базы данных ближайшей к опытному полю метеостанции (МС «Усть-Кинельская»).

При обследовании мониторинговых площадок было заложено от 3-х до 8-ти точек отбора проб в зависимости от площади и вариабельности индекса NDVI. В зависимости от плодородия почвы, метеоусловий и технологии возделывания скорость развития биомассы будет разной. Поэтому по среднему значению NDVI на поле легко сравнивать состояние посевов во время вегетации: чем выше индекс вегетации, тем лучше развиваются посевы. Местонахождение точки отбора проб в соответствии с картами NDVI для исследуемых экосистем осуществляли инструментально GPS-приёмником с получением координат.

Параметризацию модели DNDC проводили исходя из типа входных численных параметров модели, которые можно разделить на два типа:

Таблица 2. Результаты агрохимических показателей почв

Table 2. Results of agrochemical parameters of soils

| № поля | pH | Органическое вещество (гумус%) | Органический углерод (%) | Общий азот % | Азот нитратный мг/кг | Азот аммонийный мг/кг | Максимальная гигроскопическая влажность, % [28] | Влажность завядания, % [28] |
|--------|-----|--------------------------------|--------------------------|--------------|----------------------|-----------------------|---|-----------------------------|
| A802 С | 7.0 | 6.3 | 3.654 | 0.36 | 4.8 | 21.6 | 11 | 18 |
| A802 | 6.8 | 7.3 | 4.234 | 0.42 | 13.6 | 17.1 | 11 | 18 |

Таблица 3. Корректировка принятых в DNDC по умолчанию параметров почвы

Table 3. Adjustment of DNDC default soil parameters

| Показатель | Параметр | | | |
|------------------------------------|--------------|-------------|--------------|-------------|
| | A802 С | | A802 | |
| | по умолчанию | эксперимент | по умолчанию | эксперимент |
| Соотношение C:N | 10:1 | 17:1 | 10:1 | 17:1 |
| Фракция легко-растворимого гумуса | 0.0318 | 0.44 | 0.0327 | 0.72 |
| Фракция трудно-растворимого гумуса | 0.9582 | 0.55 | 0.9573 | 0.27 |

Таблица 4. Эмиссия CO₂ (кг С /га·день) на полях с различным типом обработки почвы (no-till и традиционная вспашка).

Table 4. CO₂ emissions (kg C/ha·day) in fields with different types of tillage (no-till and traditional plowing).

| Поле | Дата анализа | | | | |
|--------|--------------|------------|------------|------------|------------|
| | 17.07.2024 | 08.08.2024 | 21.08.2024 | 05.09.2024 | 19.09.2024 |
| A802 С | 10.180 | 8.748 | 8.801 | 4.762 | 5.627 |
| A802 | 15.442 | 15.837 | 14.152 | 13.184 | 6.809 |

1) пустые ячейки, в которые пользователь вносит характеристики;

2) коэффициенты, принимающиеся по умолчанию — заложены в модель, но пользователь может их скорректировать.

В таблице 2 приведены результаты агрохимических показателей почв за 2024 год. Для внесения численных входных параметров были взяты усредненные значения для трех точек опробования на глубине 0-10 см.

Для корректировки внутренних параметров (параметров второго типа) был экспериментально определен фракционно-

групповой состав гумуса по методу Тюрина в модификации В. В. Пономаревой и Т. А. Плотниковой и экспресс-методом по М.М. Кононовой и Н.Б. Бельчиковой. Результаты приведены в табл. 3. Среди характеристик почвы также было скорректировано соотношение фракций органического вещества (отношение C:N).

Обсуждение результатов

В таблице 4 представлены значения эмиссии определяемого газа (CO₂, кг С/га·день) в период с 17.07.2024 по 19.09.2024. Из таблицы следует, что в целом эмиссия углекислого газа была выше

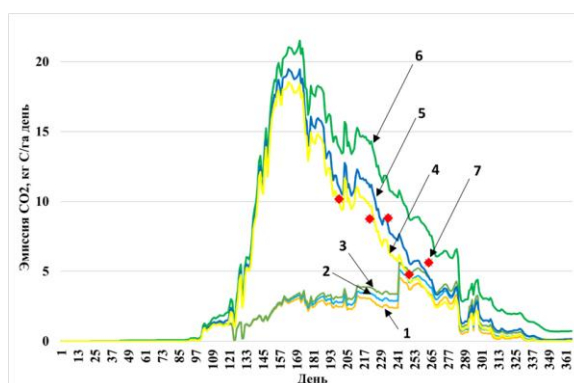


Рис. 4. Динамика смоделированной эмиссии углекислого газа на поле А802_С (традиционная вспашка) и экспериментально определенной хроматографическим методом: 1 – DNDC, по умолчанию для слоя 0-10 см, 2 – DNDC, по умолчанию для слоя 0-20 см, 3 – DNDC, по умолчанию для слоя 0-50 см, 4 – DNDC, корректировка параметров для слоя 0-10 см, 5 – DNDC, корректировка параметров для слоя 0-20 см, 6 – DNDC, корректировка параметров для слоя 0-50 см, 7 – экспериментальная эмиссия, измеренная хроматографическим путем.

Fig. 4. Dynamics of simulated carbon dioxide emissions in the A802_C field (traditional plowing) and experimentally determined by the chromatographic method: 1 – DNDC, by default for a layer of 0-10 cm, 2 – DNDC, by default for a layer of 0-20 cm, 3 – DNDC, by default for a layer of 0-50 cm, 4 – DNDC, parameter correction for the 0-10 cm layer, 5 – DNDC, parameter correction for the 0-20 cm layer, 6 – DNDC, parameter correction for the 0-50 cm layer, 7 – experimental emission measured chromatographically.

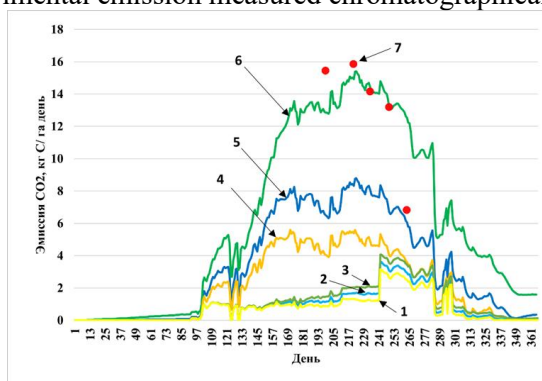


Рис. 5. Динамика смоделированной эмиссии углекислого газа на поле А802 (нулевая обработка) и экспериментально определенной хроматографическим методом: 1 – DNDC, по умолчанию для слоя 0-10 см, 2 – DNDC, по умолчанию для слоя 0-20 см, 3 – DNDC, по умолчанию для слоя 0-50 см, 4 – DNDC, корректировка параметров для слоя 0-10 см, 5 – DNDC, корректировка параметров для слоя 0-20 см, 6 – DNDC, корректировка параметров для слоя 0-50 см, 7 – экспериментальная эмиссия, измеренная хроматографическим путем.

Fig. 5. Dynamics of simulated carbon dioxide emissions in the A802 field (zero processing) and experimentally determined by the chromatographic method: 1 – DNDC, by default for a layer of 0-10 cm, 2 – DNDC, by default for a layer of 0-20 cm, 3 – DNDC, by default for a layer of 0-50 cm, 4 – DNDC, parameter adjustment for the 0-10 cm layer, 5 – DNDC, parameter adjustment for the 0-20 cm layer, 6 – DNDC, parameter adjustment for the 0-50 cm layer, 7 – experimental emission measured by chromatography

на поле с нулевой обработкой почвы (А802), что связано с более высокой активностью микроорганизмов на данном поле. Известно, что традиционная

вспашка может привести к гибели микроорганизмов почвы. Также no-till технология обработки почвы способствует увели-

чению количества органического вещества, поступающего в почву (опад), и сохранению более высокой влажности почвенного слоя. Результаты, полученные в данном исследовании, согласуются с литературными данными [19-21]. Как и в случае [19, 20] наблюдается увеличение эмиссии CO_2 из почв с преобладанием фракции частиц 0.001-0.01 мм, т.е. с высоким содержанием глины в почвенном слое.

На рис. 4 представлены смоделированные зависимости эмиссии CO_2 за исследуемый год и экспериментальные значения, полученные хроматографическим путем. Из рисунка следует, что при корректировке параметров расчётные значения хорошо согласуются с экспериментально полученными потоками CO_2 . Аналогичные зависимости для поля с нулевой обработкой (A802) приведены на рис. 5. При этом, из графиков следует, что в случае традиционной обработки почвы экспериментальные точки согласуются с суммарными расчётными значениями для глубины 0-20 см. Тогда как для поля с нулевой обработкой лучшее соответствие наблюдается для суммарных значений по слоям 0-50 см. Вероятно, это связано с большим уплотнением почвы при использовании no-till технологии.

Однако, имитационная модель DNDC показала лучшие результаты в случае традиционного способа обработки почвы (рис. 4-5). Коэффициент корреляции эмиссий расчётных по DNDC и экспериментальных для поля с A802_C составил 0,83, когда как для поля с применением технологии no-till был получен коэффициент корреляции $R^2=0,39$. Вероятно, это связано с недостаточно точным расчетом модели DNDC влажности почвы для поля с нулевой обработкой (рис. 6) и свидетельствует о необходимости корректировки как входных параметров, так и внутренних коэффициентов.

На рис. 7 приведены верифицированные кривые потоков CO_2 на полях с различным способом обработки почвы за 2024 год, полученные с использованием

имитационной модели DNDC. Из рисунка следует, что максимум эмиссии углекислого газа для поля A802_C (традиционная обработка почвы) приходится на начало вегетационного периода и соответствует максимальному количеству осадков, а далее следует снижение выбросов парникового газа. В случае нулевой обработки почвы большая эмиссия относительно всей кривой наблюдается в середине и конце вегетационного периода, что связано с большим количеством доступного органического вещества при использовании no-till технологии.

Таким образом, имитационная модель DNDC корректно отражает прогноз эмиссии углекислого газа и может быть использована для климатических проектов.

Суммарная эмиссия углекислого газа за 2024 год согласно расчету по верифицированной модели DNDC составила 1981.87 кг С/га год для поля с традиционной обработкой почвы (таблица 4). В случае использования no-till технологии выбросы за год несколько выше и составили 2231.71 кг С/га год (в 1.1 раз больше). Это можно объяснить повышенной активностью и количеством почвенных микроорганизмов в случае применения no-till технологии (рис.8).

Согласно моделированию, содержание живых микроорганизмов в почве на поле с нулевой обработкой за весь год было выше в 2 раза по сравнению с традиционной вспашкой (рис. 8). Повышение активности почвенных микроорганизмов благоприятно сказывается на увеличении растительной биомассы и может способствовать увеличению урожайности на сельскохозяйственных полях. Кроме того, рассчитанные выбросы углекислого газа на сельскохозяйственных полях при использовании традиционной отвальной вспашки (суммарные значения почвенного дыхания, сжигания топлива при работе сельскохозяйственной техники и т.д.) составляют около 9.77 т С/га, когда как прямой посев характеризуется сред-

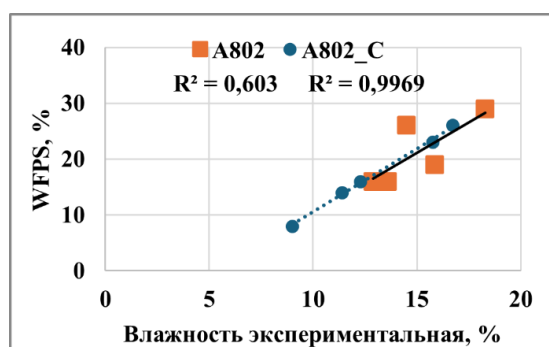


Рис. 6. Корреляция экспериментальной гигроскопической влажности почвы с рассчитанным параметром WFPS в модели DNDC для полей с различным способом обработки почвы.

Fig. 6. Correlation of experimental hygroscopic soil moisture with the calculated WFPS parameter in the DNDC model for fields with different tillage modes.

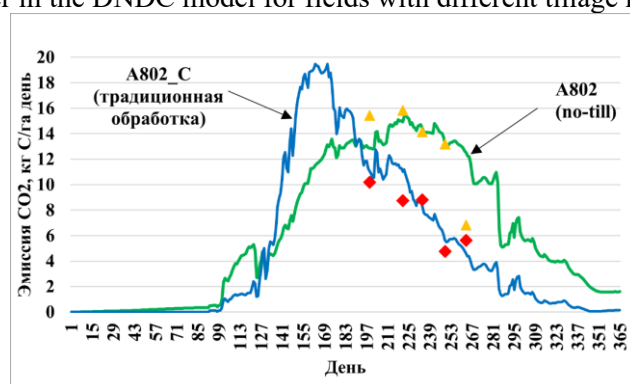


Рис. 7. Верифицированные кривые эмиссии углекислого газа на полях с традиционной и нулевой обработкой почвы.

Fig. 7. Verified carbon dioxide emission curves in fields with traditional and zero tillage.

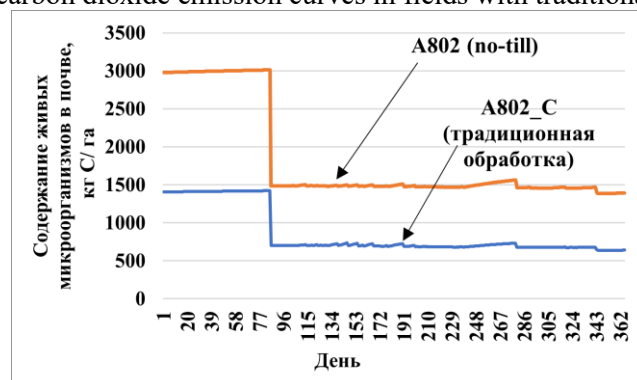


Рис. 8. Зависимость содержания живых микроорганизмов в почве (кг C/га) для полей с различным способом обработки почвы за 2024 г.

Fig. 8. Dependence of the content of living microorganisms in the soil (kg/ha) for fields with different tillage methods in 2024

ним значением около 2.5 т C/га. Следовательно, разница в эмиссии углекислого газа из почвы на исследуемых полях нивелируется (около 2 т C/га) и суммарное значение выбросов парникового газа для поля с нулевой обработкой ниже по срав-

нению с традиционной отвальной вспашкой вследствие значительного уменьшения работы сельскохозяйственной техники на предприятии.

При этом содержание общего органического углерода в почве (SOC) для поля с нулевой обработкой в 1.3 раза больше

Таблица 5. Результаты моделирования цикла углерода с использованием модели DNDC после корректировки параметров на конец года.

Table 5. The results of carbon cycle modeling using the DNDC model after adjusting the parameters at the end of the year.

| Поле | Суммарная эмиссия CO ₂ (кг С/га год) | Общее содержание органического углерода SOC (т С/га) |
|--------|--|---|
| A802 | 2231.71 | 204.90 |
| A802 С | 1981.87 | 158.12 |

по сравнению с традиционной вспашкой (таблица 5). Расчет с использованием имитационной модели DNDC показал, что параметр SOC для поля с традиционной вспашкой за 2024 год снизился на 1%, а для поля с технологией no-till уменьшение общего органического углерода в почве составило 0.9%. Количество фракции активного (легкорастворимого) гумуса в почве понизилось на поле с традиционной обработкой на 4% за моделируемый период, когда как нулевая обработка привела к снижению содержания данной фракции гумуса на 1%. Увеличение содержания фракции пассивного (труднорастворимого) гумуса в почве для поля с традиционной обработкой составило 0.9%, тогда как использование no-till технологии привело к увеличению количества труднорастворимого гумуса в почве на 2%. Таким образом, использование no-till технологии способствовало накоплению углерода в почве и повышению общего содержания гумуса в почве, что приводит к росту плодородия агроecosистемы.

Заключение

Таким образом, были исследованы две пары полей, обрабатываемых при помощи технологий no-till и традиционной вспашки. Впервые измерена эмиссия парникового газа CO₂ in situ газохроматографическим методом с использованием планарных микрофлюидных систем и проведена верификация имитационной модели DNDC с целью оценки динамики углекислого газа за исследуемый период на территории Самарской области. Показано, что корректировка входных пара-

метров для модели DNDC позволяет производить корректный прогноз эмиссии парникового газа, а сама модель может успешно применяться в климатических проектах. Однако, модель лучше показала себя при моделировании эмиссии парникового газа из почвы на поле с традиционной обработкой. Моделирование эмиссии углекислого газа для поля с нулевой обработкой требует дополнительной корректировки и уточнения параметров. Тем не менее, расчет выбросов углекислого газа за 2024 год по модели DNDC после параметризации показал, что для поля с нулевой обработкой эмиссия CO₂ была несколько больше (в 1.1 раза) по сравнению с полем с традиционной обработкой почвы. Это связано с повышенной активностью и количеством почвенных микроорганизмов при использовании no-till технологии. Однако, суммарные выбросы углекислого газа (почвенное дыхание, работа сельскохозяйственной техники и т.д.) значительно больше на поле с традиционной обработкой вследствие возрастания работы сельскохозяйственной техники на поле, а разница в эмиссии из почвы на двух тестовых полях нивелируется. Таким образом, использование no-till технологии приводит к общему снижению потоков CO₂ за счет применения природосберегающих практик. Кроме того, моделирование с использованием DNDC показало в 2 раза большее содержание почвенных микроорганизмов на поле с нулевой обработкой, а общее содержание органического углерода в почве (SOC) оказалось выше в 1.3 раза по

сравнению с традиционно обрабатываемым полем.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет из-

вестных финансовых конфликтов интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в этой статье.

Список литературы/References

1. IPCC, 2007.
2. Robertson G.P. *Encyclopedia of Agriculture and Food Systems*. 2014: 185-196.
3. García-Calderón N. E., Fuentes-Romero E., Ikkonen E., Sidorova V. *Eurasian Soil Science*. 2024; 1-28. <https://doi.org/10.1134/S106422932460129X>
4. Karelin D.V., Zamolodchikov D.G., Shilkin A.V., Popov S.Yu., Kumanyaev A.S., Lopes de Gerenyu V.O., Tel'nova N.O., Ginarskiy M.O., Tel'nova N.O., Ginarskiy M.L. *Eurasian Soil Sci.* 2021; 140: 287-305. <https://doi.org/10.1007/s10342-020-01330-3>
5. Kurganova I.N., Rozanova L.N., Myakshina T.N.N. *Eurasian Soil Sci.* 2004; 37: 74-78.
6. Xue Y.-D., Yang P.-L., Luo Y.-P., Li Y.-K., Ren S.-M., Su Y.-P., Niu Y.-T. *J. Integr. Agric.* 2012; 11: 1354-1364. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(12\)60134-8](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(12)60134-8)
7. Zavyalova N.E., Mitrofanova E.M., Kazakova I.V. *Achievements of science and technology of agroindustrial complex*. 2013; 11: 19-20.
8. Six J., Bossuyt H., Degryze S., Denef, K. *Soil Till. Res.* 2004; 79: 7-31.
9. Wilson G., Dabney S., McGregor K., Barkoll, B. T. *ASAE*. 2004; 47: 119-128.
10. Yoo J., Woo S.-H., Park K.-D., Chung K.-Y. *Applied Biological Chemistry*. 2016; 59: 787-797.
11. Varvel G.E., Wilhelm W. *Agron. J.* 2008; 100: 1180-1184.
12. Dawson J.J. C., Smith P. *Sci. Total Environ.* 2007; 382: 165-190.
13. Ussiri D.A.N., Lal R. *Soil Till. Res.* 2009; 104: 39-47.
14. Sainju U.M., Jabro J.D., Stevens W.B. *J. Environ. Qual.* 2008; 37: 98-106.
15. Lu X., Lu X., Tanveer S.K., Wen X., Liao Y. *Soil Res.* 2016; 54: 38-48. <https://doi.org/10.1071/SR14300>
16. Rutkowska B., Szulc W., Sosulski T., Skowrońska M., Szczepaniak J. *Soil Tillage Res.* 2018; 180: 21-28. <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.02.012>
17. Li C., Kou Z., Yang J., Cai M., Wang J., Cao C. *Atmos. Environ.* 2010; 44: 2696-2704.
18. Bayer C., Zschornack T., Pedrosa G.M., da Rosa C.M., Camargo E.S., Boeni M., Marcolin E., dos Reis C.E.S., dos Santos D.C. *Soil Tillage Res.* 2015; 145: 118-125. <https://doi.org/10.1016/j.still.2014.09.001>
19. Oorts K., Merckx R., Gréhan E., Labreuche J., Nicolardot B. *Soil Till. Res.* 2007; 95: 133-148.
20. Cheng-Fang L., Dan-Na Z., Zhi-Kui K., Zhi-Sheng Z., Jin-Ping W., Ming-Li C., Cou-Gui C. *PloS One*. 2012; 7: e34642. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0034642>
21. Pareja-Sánchez E., Cantero-Martínez C., Álvaro-Fuentes J., Plaza-Bonilla D. *Soil Tillage Res.* 2019; 191: 29-36. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.03.007>
22. Abdalla K., Chivenge P., Ciais P., Chaplot V. *Biogeosciences*. 2016; 13: 3619-3633. <https://doi.org/10.5194/bg-13-3619-2016>
23. Li C., Froelking S., Xiao X., Moore B., Boles S., Qiu J., Huang Y., Salas W., Sass R. *Global Biogeochemical Cycles*. 2005; 19(3): GB3010. <https://doi.org/10.1029/2004GB002341>
24. Yadav D., Wang J. *Environmental Pollution*. 2017; 230: 1040-1049. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.07.066>
25. Balashov E., Buchkina N., Rizhiya E., Farkas C.S. *International agrophysics*. 2014; 28(2): 133-142.
26. Gilhespy S. L., Anthony S., Cardenas L., Chadwick D., del Prado A., Li C., Misselbrook T., Rees R. M., Salas W., Sanz-Cobena A., Smith P., Tilston E.L., Topp C.F.E., Vetter S., Yeluripati J.B. *Ecological modelling*. 2014; 292: 51-62.
27. Sukhoveeva O.E., Karelin D.V. *Bulletin of St. Petersburg University. Earth Sciences*. 2019; 64(2): 363-384. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2019.211>
28. Unified State Register of Soil Resources of Russia. – Moscow: V.V. Dokuchaev Soil Institute, 2014. <https://egrpr.esoil.ru/content/soils/soil118.html>.

Информация об авторах / Information about the authors

В.И. Платонов – к.х.н., доцент, заведующий кафедрой экологии и безопасности жизнедеятельности, заведующий научно-исследовательской лабораторией климатических исследований, Самарский национальный исследовательский университет имени С.П. Королева, Самара, Россия

Н.М. Троц – д.с.-х.н., профессор, проректор по научной работе, заведующий кафедрой «Агрохимия, почвоведение и агроэкология», Самарский государственный аграрный университет, Самара, Россия

С.А. Платонова – к.х.н., с.н.с. научно-исследовательской лаборатории климатических исследований, Самарский национальный исследовательский университет имени С.П. Королева, Самара, Россия

С.В. Ворон – начальник сектора судебных экспертиз, подполковник внутренней службы, ФГБУ «Судебно-экспертное учреждение федеральной противопожарной службы «Испытательная пожарная лаборатория» по Самарской области», Самара, Россия

А.А. Бокова – аспирант, Самарский государственный аграрный университет, Самара, Россия

А.А. Курепов – инженер научно-исследовательской лаборатории климатических исследований, Самарский национальный исследовательский университет имени С.П. Королева, Самара, Россия

V.I. Platonov – candidate of chemical sciences, associate professor, Head of the Department of Ecology and Life Safety, Head of the Climate Research Laboratory, Samara University, Samara, Russian Federation

N.M. Trots – Doctor of Agricultural Sciences, professor, Head of the Department of Agrochemistry, Soil Science and Agroecology, Vice-Rector for Research, Samara State Agrarian University, Samara, Russian Federation

S.A. Platonova – candidate of chemical sciences, research fellow, Climate Research Laboratory, Samara University, Samara, Russian Federation

S.V. Voron – Head of the Forensic Sector, Lieutenant Colonel of the Internal Service, Federal State Budgetary Institution "Forensic Institution of the Federal Fire Service "Fire Testing Laboratory" for the Samara Region", Samara, Russian Federation

A.A. Bokova – graduate student, Samara State Agrarian University, Russian Federation

A.A. Kurepov – Engineer, Climate Research Laboratory, Samara University, Samara, Russian Federation

Статья поступила в редакцию 18.11.2025; одобрена после рецензирования 07.12.2025; принята к публикации 17.12.2025.

The article was submitted 18.11.2025; approved after reviewing 07.12.2025; accepted for publication 17.12.2025.