



ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

Научная статья

УДК 543.544.3

doi: 10.17308/sorpchrom.2024.24/12570

Измерение эмиссии метана и оксида азота (I) методом газовой хроматографии с использованием планарных микрофлюидных систем

**Владимир Игоревич Платонов[✉], Игорь Артемьевич Платонов,
Людмила Владимировна Орлова, Светлана Александровна Платонова,
Екатерина Анатольевна Новикова, Алексей Николаевич Курепов**

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

Аннотация. Газохроматографическим методом исследована эмиссия CH_4 и N_2O на 3 тестовых сельскохозяйственных полях с использованием планарных микрофлюидных систем. Максимальное увеличение суммарной эмиссии CH_4 за весь исследуемый период наблюдалось на полях с заделкой удобрения Карбамид Б под дискование ($1.56 \text{ мг/м}^2 \cdot \text{час}$, на 73.3% выше по сравнению с контрольным полем). Для этого поля наблюдалось также и максимальное значение суммарной эмиссии закиси азота по сравнению с контрольным полем. При этом суммарная эмиссия ПГ в пересчете на CO_2 для поля №1 (Карбамид Б, под дискование) составило $61.28 \text{ мг/м}^2 \cdot \text{час}$ (на 48.5% выше по сравнению с контрольным полем). На полях, где внесли удобрения с посевом, суммарная эмиссия ПГ в пересчете на CO_2 увеличилась на 17.2% по сравнению с контролем. Это свидетельствует о пролонгированном эффекте азотного питания от внесения удобрения при его заделке в почву. Минимальное значение суммарной эмиссии метана и закиси азота в пересчете на CO_2 было получено на контрольном поле ($41.27 \text{ мг/м}^2 \cdot \text{час}$). Показано, что разработанные аналитические системы на основе планарной микрофлюидной газовой хроматографии могут успешно применяться для прямого газохроматографического измерения эмиссии CH_4 и N_2O без использования дополнительных узлов хроматографической системы, что способствует упрощению аналитического комплекса и сокращению времени анализа

Ключевые слова: микрофлюидные системы, газовая хроматография, парниковые газы, эмиссия, метан, оксид азота (I).

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., Платонов И.А., Орлова Л.В., Платонова С.А., Новикова Е.А., Курепов А.Н. Измерение эмиссии метана и оксида азота (I) методом газовой хроматографии с использованием планарных микрофлюидных систем // *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2024. Т. 24, № 6. С. 934-943. <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2024.24/12570>

Original article

Measurement of methane and nitric oxide (I) emissions by gas chromatography using planar microfluidic systems

Vladimir I. Platonov[✉], Igor A. Platonov, Lyudmila V. Orlova, Svetlana A. Platonova, Ekaterina A. Novikova, Aleksey N. Kurepov

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

Abstract. The work proposes the use of microfluidic chromatographic systems to assess greenhouse gas emissions (methane CH_4 and nitrogen oxide (I) N_2O). The testing of the proposed gas chromatograph solution was carried out on agricultural fields when applying mineral fertilizers. The gas chromatographic method was used



to study the emission of CH₄ and N₂O in 3 test agricultural plots using planar microfluidic systems. The maximum increase in the total CH₄ emission over the entire study period was observed in plot with fertilizer application (Carbamide B after disking) and amounted to 1.56 mg/m²·hour, 73.3% higher compared to the control field). For this field, the maximum value of the total nitrogen oxide (I) N₂O emission was also observed compared to the control field. At the same time, the total GHG emission in terms of CO₂ for field fertilized with Carbamide B after disking was 61.28 mg/m²·hour (48.5% higher compared to the control field). In the plot where fertilizers were applied with sowing, the total GHG emission in terms of CO₂ increased by 17.2% compared to the control. This indicates a prolonged effect of nitrogen nutrition from the application of fertilizer when it is incorporated into the soil. The minimum value of total CH₄ and N₂O emissions in terms of CO₂ was obtained in the control field (41.27 mg/m²·hour). It has been shown that the developed analytical systems based on planar microfluidic gas chromatography can be successfully used for direct gas chromatographic measurement of CH₄ and N₂O emissions without the use of additional components of the chromatographic system, which helps to simplify the analytical complex and reduce analysis time.

Keywords: microfluidic systems, gas chromatography, greenhouse gases, emissions, methane, nitric oxide (I).

Acknowledgments: the work was supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation, project FSSS-2024-0022 (registration number: 1023112900147-4 dated 31.01.24).

For citation: Platonov V.I., Platonov I.A., Orlova L.V., Platonova S.A., Novikova E.A., Kurepov A.N. Measurement of methane and nitric oxide (I) emissions by gas chromatography using planar microfluidic systems. *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy*. 2024. 24(6): 934-943. (In Russ.). <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2024.24/12570>

Введение

В последнее время большое внимание вызывает проблема изучения способов измерения и управления накоплением парниковых газов (ПГ), в том числе метана CH₄ и оксида азота (I) N₂O, вследствие изменения температуры земной поверхности [1]. Решение данной задачи может способствовать стабилизации климата [2].

Атмосферный оксид азот (I) (N₂O) как парниковый газ вносит значительный вклад в эффект глобального потепления и его время жизни в атмосфере составляет около 150 лет [3, 4]. N₂O характеризуется высоким потенциалом глобального потепления (ПГП) и примерно в 298 раз превышает ПГП CO₂ [5, 6]. Поэтому точный и достоверный метод измерения для мониторинга выбросов оксида азота (I) в атмосферу Земли имеет большое значение [7].

Для анализа эмиссии N₂O одним из используемых достоверных методов является метод газовой хроматографии с детектором электронного захвата (GC-ECD) [7-10]. Однако, в большинстве случаев измерение эмиссии N₂O проводят с помощью сложных газовых хроматографических систем с использованием нескольких детекторов с переключением

потока [11,12]. Поэтому упрощение анализа климатических газов в воздухе и почвенной атмосфере с помощью газовой хроматографии с разделением компонентов на одной колонке является актуальной задачей [12].

Тип почвы и растительности, а также направление и интенсивность антропогенного воздействия являются одними из основных факторов, определяющих пространственную изменчивость потоков газов из почв [13-15]. Большой вклад в антропогенное воздействие вносит сельскохозяйственная деятельность, связанная с посевом и соответствующей обработкой почвы.

Целью данной работы являлось изменение эмиссии парниковых газов методом газовой хроматографии с использованием микрофлюидных систем: разработанного аналитического комплекса на базе портативного двухмодульного газового хроматографа «ПИА» (ООО «НПФ МЭМС», г. Самара) для анализа выбросов метана и оксида азота (I) с использованием планарной микрофлюидной колонки, заполненной Carboxen (ООО «НПФ МЭМС», г. Самара) на сельскохозяйственных полях при внесении минеральных удобрений карбамида марки Б на фоне NPKS 8:20:30:3 (АО «ОХК



Рис 1. Мобильный аналитический комплекс на базе портативного хроматографа «ПИА»

Fig 1. Mobile analytical complex based on the portable chromatograph "PIA"

«Уралхим») под дискование и после посева, а также оценка агрономической эффективности удобрений.

Экспериментальная часть

Измерение эмиссии метана для выявления агроэкологической эффективности применения удобрений на посевах яровой пшеницы осуществляли с помощью разработанного аналитического комплекса на базе портативного двухмодульного газового хроматографа «ПИА» производства ООО «НПФ МЭМС», г. Самара (рис. 1) на площадке тестового полигона ФГБОУ ВО «Самарский аграрный университет» Кинельского района Самарской области.

Конфигурация газового хроматографа ПИА:

первый модуль: 1) газ-носитель – гелий; 2) планарная микрофлюидная хроматографическая колонка длиной канала 2 м и сечением 1×1 мм; 3) сорбент – Porapak N; 4) детектор по теплопроводности (ДТП).

второй модуль: 1) газ-носитель – воздух; 2) планарная микрофлюидная хроматографическая колонка длиной канала 2 метра и сечением 1×1 мм; 3) сорбент –



Рис. 2. Планарная микрофлюидная хроматографическая колонка, длина канала – 1 метр, сечение канала – 1×1 мм. Производство ООО «НПФ МЭМС», г. Самара.

Fig. 2. Planar microfluidic chromatographic column, channel length – 1 meter, channel cross-section 1x1 mm. Manufactured by NPF MEMS LLC, Samara.

Porapak N; 4) термохимический детектор (ТХД).

Анализ оксида азота (I) проводился на стационарном газовом хроматографе «ГАЛС» в следующей конфигурации: 1) газ-носитель – азот ОСЧ; 2) планарная микрофлюидная хроматографическая колонка длиной канала 1 метр сечением 1×1 мм (рис. 2); 3) сорбент – Carboxen; 4) детектор электронного захвата (ДЭЗ).

Для проведения калибровок средств измерений, а также контроля метрологических характеристик был использован ГСО 10606-2015. Для проведения эксперимента на газохроматографическом оборудовании были построены градуировочные зависимости с использованием поверочных газовых смесей (ПГС) CH₄ в гелии с концентрацией 5 ppm и N₂O в азоте с концентрацией 0.9 ppm.

На рис. 3 представлена типовая хроматограмма ПГС оксида азота (I), полученная на планарной микрофлюидной колонке, заполненной сорбентом Carboxen 60-80 МЭШ.

Порядок полевых анализов парниковых газов мобильным аналитическим комплексом на базе портативного хроматографа «ПИА» и анализа пробы воздуха на содержание оксида азота (I):

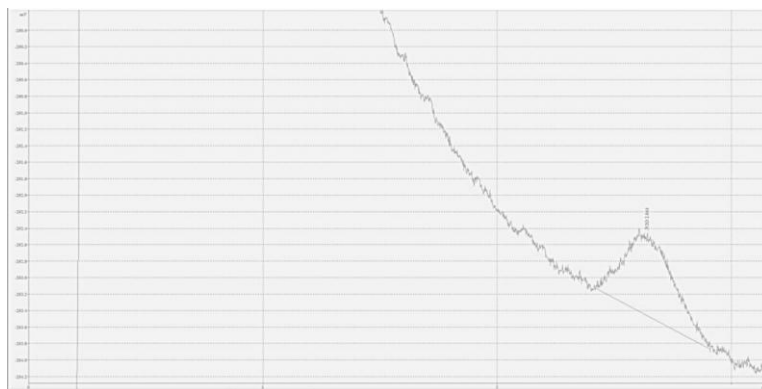


Рис. 3. Хроматограмма, полученная при анализе ПГС оксида азота (I) (концентрация 2 ppm). Микрофлюидная хроматографическая колонка сечением 1×1 мм, длиной 2 м, заполненная Carboxen; температурный режим термостата колонок - изотермический; рабочая температура термостата колонок 70-90°C; тип газа-носителя – азот ОСЧ; расход газа-носителя 10-12 см³/мин; тип детектора – ДЭЗ; объем вводимой пробы 300 мкл; время анализа – 3 мин.

Fig. 3. Chromatogram obtained during the analysis of GHS of nitric oxide (I) (concentration 2 ppm). Microfluidic chromatographic column with a cross section of 1x1 mm, 2 m long, filled with Carboxen; 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 nitrogen; the flow rate of the carrier gas is 10-12 cm³/min; the detector type is DEZ; the volume of the injected sample is 300 μl; the analysis time is 3 minutes.

1. Включение мобильного аналитического комплекса на базе портативного хроматографа «ПИА».

2. Вывод на рабочий режим хроматографических систем мобильного комплекса в течение 30-40 минут.

3. По достижению рабочего режим мобильного комплекса производится установка комплекса на поверхности земли в горизонтальном положении в точке измерения

4. Установка закрытой динамической камеры измерения на почве в точке измерения

5. Сборка газовых линий, включающих в себя пробоотборник для пробы воздуха на содержание оксида азота (I)

6. Задание параметров циклического анализа на ПК

7. Закрытие камеры крышкой, с подключенными газовыми коммуникациями, старт цикла анализа

8. По завершению цикла анализа парниковых газов производится отбор пробы воздуха на содержание оксида азота (I) в пенициллиновый флакон

9. Анализ воздуха на содержание оксида азота (I) проводится в лабораторных условиях на стационарном газовом хроматографе «ГАЛС» с ДЭЗ.

Расчет скорости выделения парникового газа из почвы основан на уравнении Менделеева-Клапейрона [16]:

$$\text{ЭМ}_{\text{газ}}^* = \frac{0.001 \cdot V \cdot \Delta C}{0.0821 \cdot (273 + T)}, \quad (1)$$

где $\text{ЭМ}_{\text{газ}}^*$ – величина эмиссии измеряемого газа за все время экспозиции, мкмоль С; V – объем камеры, см³; ΔC – изменение концентрации в камере за время экспозиции, ppm; T – средняя температура воздуха в камере во время измерений, °C.

Необходимо учитывать, что в объем камеры входит как собственно измеряемый объем воздуха в изоляторе между крышкой и поверхностью почвы, так и объем измерительной системы, включая шланги, микропомпу и камеру с сенсором. Для пересчета эмиссии газа в общепринятые единицы измерения (г·С/м²·час) применяется формула [17]:

$$\text{ЭМ}_{\text{газ}} = \frac{12 \cdot 6 \cdot \text{ЭМ}_{\text{газ}}^*}{10 \cdot \tau \cdot S}, \quad (2)$$

Таблица 1. Названия опытов, реализованных на полях, и маркировка полей

Table 1. Names of experiments implemented in the fields and field labeling

Опыт	Маркировка
1	Карбамид Б под дискование
2	Карбамид Б после посева
3	Контроль (без удобрений)

Таблица 2. Значения эмиссии CH₄ (мг/м²·час) по датам измерения

Table 2. CH₄ emission values (mg/m²·hour) by measurement dates

Опыт	Дата анализа								Сумма
	13.05.24	28.05.24	11.06.24	25.06.24	12.07.24	26.07.24	07.08.24	21.08.24	
1	0.001	0.003	0.510	0.084	0.005	0.352	0.429	0.181	1.564
2	0.004	0.003	0.452	0.041	0.021	0.343	0.260	0.127	1.249
3	0.001	0.002	0.290	0.052	0.037	0.312	0.084	0.128	0.905

Таблица 3. Значения эмиссии N₂O (мг/м²·час) по датам измерения

Table 3. N₂O emission values (mg/m²·hour) by measurement dates

Опыт	Дата анализа								Сумма
	13.05.24	28.05.24	11.06.24	25.06.24	12.07.24	26.07.24	07.08.24	21.08.24	
1	0.000	0.007	0.002	0.009	0.003	0.015	0.012	0.020	0.067
2	0.006	0.005	0.002	0.002	0.012	0.013	0.006	0.006	0.051
3	0.003	0.000	0.000	0.015	0.011	0.015	0.011	0.006	0.061

где $ЭM_{\text{газ}}$ – величина эмиссии измеряемого газа из почвы, г·С/м²·час; τ – время экспозиции, мин; S – площадь основания камеры, см².

Исследования проводились на семи тестовых полях с 13.05 (возможность начала проведения эксперимента) по 21.08 (уборка урожая). Названия опытов, реализованных на полях, и маркировка полей представлены в таблице 1.

Газохроматографические измерения содержания парниковых газов проводили не менее 5 раз, случайная погрешность эксперимента не превышала 3%.

Измерение влажности почвы проводили гравиметрическим способом по ГОСТ 28268-89. Температуру почвы определяли при помощи погружного термометра цифрового СЕМ DT-13. Климатические данные (максимальная и минимальная температура воздуха, количество осадков) были взяты из базы данных по метеостанции г. Самара.

Обсуждение результатов

В таблицах 2 и 3 представлены значения эмиссии парниковых газов по датам

измерения. На рис. 4 и 5 показаны динамические зависимости эмиссии метана и оксида азота (I) за весь период проведения эксперимента. Из представленных данных (табл. 2, рис. 4) следует, что изменение эмиссии метана от времени эксперимента на всех исследуемых полях носит схожий характер. При этом эмиссия CH₄ на исследуемых участках была сравнима с контрольным полем в начале проведения эксперимента и во время уборки урожая. Однако, кривые эмиссии на полях с удобрениями лежат выше значений, полученных на контрольном поле. Кривые изменение эмиссии оксида азота (I) (рис. 5) имеют более сложный характер. При этом максимальное увеличение эмиссии N₂O наблюдалось на делянке № 1 (Карбамид Б, под дискование) и составило 0.020 мг/м²·час.

Скачок экспериментальных эмиссий CH₄ в точке 3 (11.06) коррелирует с большим количеством осадков, и как следствие увеличением влажности почвы (рис. 6). Также наблюдаются положительные корреляции с температурой

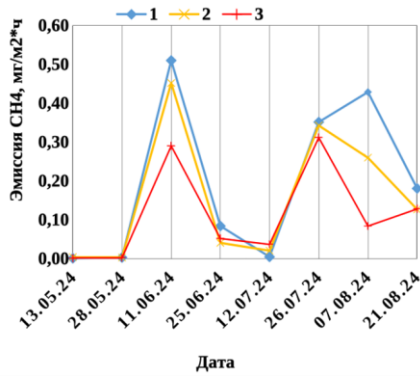


Рис. 4. Динамика эмиссии CH_4 ($\text{mg C/m}^2 \cdot \text{час}$) на исследуемых полях по датам измерения: 1 – Карбамид Б под дискование, 2 – Карбамид Б после посева, 3 – Контроль (без удобрений)

Fig. 4. Dynamics of CH_4 emissions ($\text{mg C/m}^2 \cdot \text{hour}$) in the studied fields by measurement dates: 1 – Carbamide B for disking, 2 – Carbamide B after sowing, 3 – Control (without fertilizers).

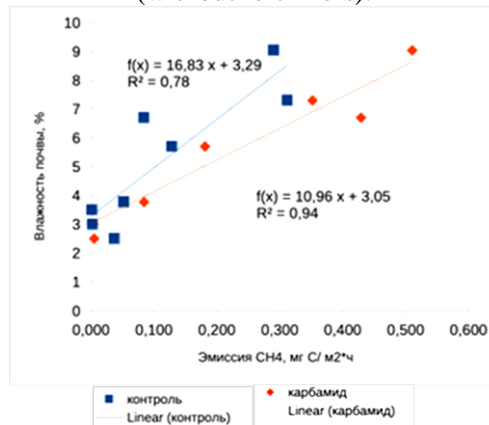


Рис. 6. Корреляция значений эмиссии метана с показателями влажности почвы, полученные на контрольном участке и делянке №1 (Карбамид Б, под дискование).

Fig. 6. Correlations of values of methane emission with soil moisture indicators obtained at the control site and plot No. 1 (Carbamide B, for disking).

($R^2=0.18$ для контрольного поля и $R^2=0.41$ для делянки №1).

Это является закономерным, так как CH_4 - и N_2O -продуцирующие бактерии требуют, как правило, анаэробных условий. С увеличением влажности возрастает активность анаэробных микроорганизмов за счет увеличения количества

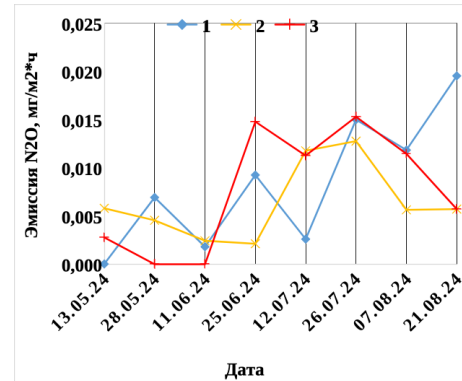


Рис. 5. Динамика эмиссии N_2O ($\text{mg N/m}^2 \cdot \text{час}$) на исследуемых полях по датам измерения: 1 – Карбамид Б под дискование, 2 – Карбамид Б после посева, 3 – Контроль (без удобрений).

Fig. 5. Dynamics of N_2O emissions ($\text{mg N/m}^2 \cdot \text{hour}$) in the studied fields by measurement dates: 1 – Carbamide B for disking, 2 – Carbamide B after sowing, 3 – Control (without fertilizers).

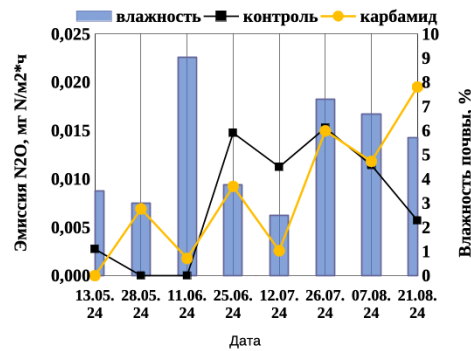


Рис. 7. Динамика эмиссии оксида азота (I) на контрольном поле и делянке №1 (карбамид Б, под дискование) и влажности почвы и по датам наблюдения

Fig. 7. Dynamics of emissions of nitrogen oxide (I) in the control field and plot No. 1 (carbamide B, for disking) and soil moisture and by observation dates

питательных веществ почвы, что приводит к большему выделению метана и оксида азота (I).

Для оксида азота (I) наблюдается в основном положительная корреляция с влажностью почвы (рис. 7). Однако, при увеличении температуры воздуха в большинстве случаев эмиссия уменьшалась (рис. 8). Вероятно, это связано с влиянием температуры и влажности почвы

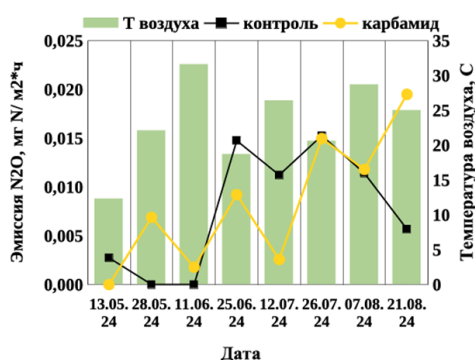


Рис. 8. Динамика эмиссии оксида азота (I) на контрольном поле и делянке №1 (карбамид Б, под дискование) и температуры воздуха и по датам наблюдения

Fig. 8. Dynamics of nitrogen oxide (I) emissions in the control field and plot No. 1 (carbamide B, for disking) and air temperature and by observation dates

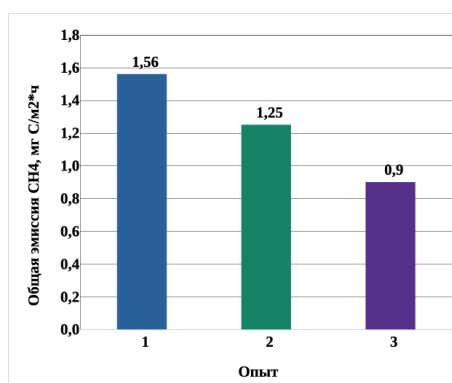


Рис. 9. Общая эмиссия CH₄ на 3 исследуемых полях за весь период эксперимента.

Fig. 9. Total CH₄ emission in the 3 studied fields over the entire experiment period.

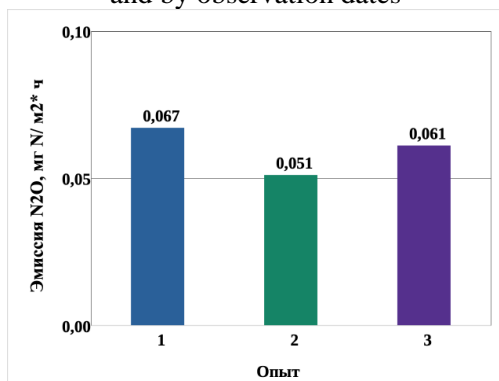


Рис. 10. Общая эмиссия N₂O на 3 исследуемых полях за весь период эксперимента

Fig. 10. Total N₂O emission in the 3 studied fields over the entire experimental period

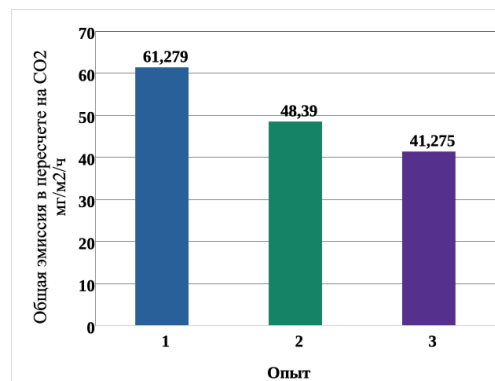


Рис. 11. Общая эмиссия парниковых газов (CH₄ и N₂O) в пересчете на CO₂ на 3 исследуемых полях за весь период эксперимента (пересчетный коэффициент для метана – 27.9, для оксида азота (I) – 265 (МГЭИК AR5)).

Fig. 11. Total greenhouse gas emissions (CH₄ and N₂O) in terms of CO₂ in the 3 studied fields over the entire period of the experiment (conversion factor for methane – 27.9, for nitric oxide (I) – 265 (IPCC AR5)).

друг на друга, что затрудняет наблюдение четких корреляций.

На рисунках 9 и 10 приведены гистограммы суммарной общей эмиссии CH₄ и N₂O на исследуемых полях за весь период измерений.

Как видно из представленных на рис. 9 данных максимальная общая эмиссия CH₄ наблюдалась на делянке № 1 (Карбамид Б, под дискование) и составила

1.564 мг/м²·час, минимальное значение отвечает контрольному полю – 0.90 мг/м²·час. Таким образом, внесение удобрений приводит к возрастанию эмиссии метана на всех исследуемых полях. Это объясняется увеличением активности микроорганизмов в почве за счет увеличения питательных веществ при внесении минеральных удобрений. Общая эмиссия N₂O (рис.



10) снижается на делянке № 2 по сравнению с контрольным полем на 16.4%. Максимальное увеличение суммарной эмиссии N_2O за весь исследуемый период наблюдалось также на делянке № 1 (Карбамид Б, под дискование) и составило $0.067 \text{ мг/м}^2 \cdot \text{час}$ (на 9.8% больше по сравнению с контрольным полем).

Также следует отметить, что суммарная эмиссия метана и оксида азота (I) (рис. 11) выше на делянке, где вносили удобрения под дискование по сравнению с тестовым полем, где удобрения внесли с посевом. Известно, что максимальное увеличение эмиссии оксида азота (I) наблюдается сразу после внесения удобрений за счет увеличения питательных веществ для почвенных микроорганизмов. Внесение удобрений под дискование, как правило, способствует повышению эффективности вследствие заделки их в почву. Это обеспечивает выращиваемую сельхозкультуру необходимым минеральным питанием на протяжении более длительного времени. Вероятно, внесение удобрений под дискование на исследуемых полях способствовало сохранению питательных веществ для микроорганизмов и увеличению их активности в течение более длительного времени, что привело, в свою очередь, к некоторому увеличению эмиссии метана и оксида азота (I) на делянке №1. Это свидетельствует о пролонгированном эффекте азотного питания в данном случае.

Заключение

Таким образом, была измерена и проанализирована эмиссия CH_4 и N_2O на 2 сельскохозяйственных делянках с различным способом внесения удобрений и

Список литературы/References

1. IPCC, 2007. Available in: <https://www.ipcc.ch/> Accessed on 10.09.2024.
2. Robertson G.P. Soil greenhouse gas emissions and their mitigation.

контрольном поле газохроматографическим методом с использованием планарных микрофлюидных систем (производство ООО «НПФ МЭМС», г. Самара). Максимальное увеличение суммарной эмиссии метана и оксида азота (I) в пересчете на CO_2 за весь исследуемый период наблюдалось на делянке с заделкой удобрения под дискование № 1 и составило $61.28 \text{ мг/м}^2 \cdot \text{час}$ (на 48.5% выше по сравнению с контрольным полем). Минимальное значение суммарной эмиссии метана и оксида азота (I) в пересчете на CO_2 было получено на контрольном поле ($41.27 \text{ мг/м}^2 \cdot \text{час}$). На делянке, где внесли удобрения с посевом, суммарная эмиссия PH_3 в пересчете на CO_2 увеличилась на 17.2% по сравнению с контрольным полем. Эти данные указывают на пролонгированный эффект от внесения удобрений

Было показано, что разработанные аналитический комплекс на базе портативного хроматографа «ПИА» и планарная микрофлюидная колонка, заполненная сорбентом Carboxen, могут успешно применяться для прямого газохроматографического измерения эмиссии CH_4 и N_2O без использования дополнительных ступеней анализа, что способствует упрощению хроматографической системы и сокращению времени анализа для мониторинга эмиссии парниковых газов.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет известных финансовых конфликтов интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в этой статье.

Encyclopedia of Agriculture and Food Systems. 2014;185-196.

3. De Miranda M.S., Fonseca M.L., Lima A., De Moraes T.F., Rodrigues F.A. Environmental impacts of rice cultivation. *American Journal of Plant Sciences.* 2015; 6: 2009-2018.



4. Xingren L., Yulong S., Qingwen Z., Guichun L. Effects of biochar on nitrification and denitrification-mediated N₂O emissions and the associated microbial community in an agricultural soil. *Environmental Science and Pollution Research*. 2021; 28(6): 1-15. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10928-4>
5. Ermolaev E. Greenhouse gas emissions from food and garden waste composting. Doctoral Thesis, Swedish University of Agricultural Sciences. Uppsala. Sweden. 2015.
6. Komiya S., Shoji Y., Noborio O. K., Yazaki T., Toojinda T., Siangliw M. Climatic impacts on greenhouse gas emissions in rice paddy fields. World Congress of Soil Sciences. 2010. Brisbane, 17-19. Available in: <http://iuss.org/19th%20WCSS/Symposium/>. Accessed on 2 Aug. 2016.
7. Zuas O., Mulyana M.R., Hamim N., Budiman H. Measurement of nitrous oxide in a matrix using gas chromatography with microelectron capture detection% validation of analytical method. *The Journal of Engineering and Exact Sciences*. 2017; 3(3): 381-394. <https://doi.org/10.18540/jcecvl3iss3pp381-394>
8. Wang C. Simultaneous analysis of greenhouse gases by gas chromatography. *Agilent Technology*. 2012; 4(14): 1-8.
9. Zhang Y., Mu, Y., Fang, S., Liu, J. An improved GC-ECD method for measuring atmospheric N₂O. *Journal of Environmental Sciences (China)*. 2013; 25(3): 547-553.
10. Zheng X., Mei B., Wang Y., Xie B., Wang Y., Dong H., Xu H., Chen G., Cai Z., Yue J., Gu J., Su F., Zou J., Zhu J. Quantification of N₂O fluxes from soil-plant systems may be biased by the applied gas chromatograph methodology. *Plant and Soil. Aims and scope*. 2008; 311: 211-234.
11. Analysis of Greenhouse Gases by Gas Chromatography. SCION Instruments. Available in: <https://www.chromatographyonline.com/view/analysis-of-greenhouse-gases-by-gas-chromatography> Accessed on 10.09.2024.
12. Ekeberg D., Ogner G., Fongen M., Joner E.J. Determination of CH₄, CO₂ and N₂O in air samples and soil atmosphere by gas chromatography mass spectrometry, GC-MS. *Journal of Environmental Monitoring*. 2004;6(7): 621-3. <https://doi.org/10.1039/b401315h>
13. Karelin D.V., Zamolodchikov D.G., Shilkin A.V., Popov S.Yu., Kumanyaev A.S., Lopes de Gerenyu V.O., Tel'nova N.O., Gitarskiy M.L. The effect of tree mortality on CO₂ fluxes in an old-growth spruce forest. *Eurasian Soil Sci.* 2021; 140: 287-305. <https://doi.org/10.1007/s10342-020-01330-3>
14. Kurganova I.N., Rozanova L.N., Myakshina T.N. Monitoring of CO₂ emission from soils of different ecosystems in Southern part of Moscow region: data base analyses of long-term field observations. *Eurasian Soil Sci.* 2004; 37: 74-78.
15. Xue Y.-D., Yang P.-L., Luo Y.-P., Li Y.-K., Ren S.-M., Su Y.-P., Niu Y.-T. Characteristics and driven factors of nitrous oxide and carbon dioxide emissions in soil irrigated with treated wastewater. *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)
16. Karelin D.V., Zamolodchikov D.G., Kraev G.N. Methodological guide for the analysis of carbon emissions from soils of settlements in the tundra. M., Center for Problems of Ecology and Forest Productivity RAN, 2015, 64 p.
17. Kurganova I.N. Methodological guide for determining CO₂ emissions from soils in various types of ecosystems. 2nd ed. Pushchino, 2023, 79 p.

Информация об авторах / Information about the authors

В.И. Платонов – заведующий кафедрой экологии и безопасности жизнедеятельности, к.х.н., Са-

V.I. Platonov – Ph.D. (chemistry), head of the Department of Ecology and Life Safety, Samara National



марский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, Самара, Россия

И.А. Платонов – заведующий кафедрой химии, д.т.н., Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, Самара, Россия

Л.В. Орлова – с.н.с. НИЛ климатических исследований, к.э.н., Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, Самара, Россия

С.А. Платонова – с.н.с. НИЛ климатических исследований, к.х.н., Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, Самара, Россия

Е.А. Новикова – доцент химии, к.х.н., Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, Самара, Россия

А.Н. Курепов – лаборант-исследователь НИЛ климатических исследований Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, Самара, Россия

Research University, Samara, Russian Federation, e-mail: rovvv@yandex.ru

I.A. Platonov – prof., grand Ph.D (technics), head of Department of Chemistry, Samara National Research University, Samara, Russian Federation

L.V. Orlova – senior researcher, Laboratory of Climatic Research, Ph.D., Samara National Research University, Samara, Russian Federation

S.A. Platonova – senior researcher, Laboratory of Climatic Research, Ph.D., Samara National Research University, Samara, Russian Federation

E.A. Novikova – Associate Professor of Chemistry, Ph.D., Samara National Research University, Samara, Russian Federation

A.N. Kurepov – laboratory assistant-researcher, Laboratory of Climatic Research, Samara National Research University, Samara, Russian Federation

Статья поступила в редакцию 05.11.2024; одобрена после рецензирования 27.11.2024; принята к публикации 04.12.2024.

The article was submitted 05.11.2024; approved after reviewing 27.11.2024; accepted for publication 04.12.2024.