



УДК 550.8.05
DOI 10.52575/2712-7443-2026-50-1-0-3
EDN CMZTFD

Динамика парниковых газов и индикаторов цикла азота на плантациях масличной пальмы в долине реки СIMITARRA

Мартинес В.Д.С.

РГГМУ Российский Государственный Гидрометеорологический Университет
Россия, 192007, Санкт-Петербург, Воронежская улица, 79
wdseguram@gmail.com

Аннотация. В статье представлена многолетняя оценка динамики газообмена в плантациях африканской масличной пальмы (*Elaeis guineensis*) с применением биогеохимической модели *DNDC* в Крестьянской заповедной зоне долины реки СIMITARRA (Колумбия) за 2015, 2018 и 2023 годы. Смоделированы потоки основных парниковых газов (CO_2 , CH_4 и N_2O), а также газов-индикаторов почвенных процессов (NH_3 , NO и N_2), отражающих нитрификацию, денитрификацию и улетучивание азота. Результаты показывают различное поведение газов: снижение выбросов CO_2 и N_2O , отрицательные значения для CH_4 , что указывает на функцию плантаций как поглотителя метана, а также умеренные колебания NH_3 , NO и N_2 как индикаторов процессов трансформации азота. Выявлена связь между агротехническими практиками, климатическими условиями и динамикой почвенных процессов. Полученные данные подтверждают возможность использования модели *DNDC* как инструмента для мониторинга парниковых газов и диагностики процессов разложения и денитрификации в тропических агроэкосистемах, что способствует разработке дифференцированных стратегий смягчения последствий изменения климата.

Ключевые слова: модель *DNDC*, парниковые газы, индикаторы цикла азота, африканская масличная пальма, Колумбия

Для цитирования: Мартинес В.Д.С. 2026. Динамика парниковых газов и индикаторов цикла азота на плантациях масличной пальмы в долине реки СIMITARRA. Региональные геосистемы, 50(1): 33–46. DOI: 10.52575/2712-7443-2026-50-1-0-3 EDN: CMZTFD

Dynamics of Greenhouse Gases and Nitrogen Cycle Indicators in Oil Palm Plantations in the Cimitarra River Valley

William D.S. Martínez

RSHU Russian State Hydrometeorological University
79 Voronezhskaya Str., St. Petersburg, 192007, Russia
wdseguram@gmail.com

Abstract. This article presents a multi-year assessment of gas flux dynamics in African oil palm (*Elaeis guineensis*) plantations using the biogeochemical *DNDC* model in the Peasant Reserve Zone of the Cimitarra River Valley (Colombia) for the years 2015, 2018, and 2023. The model simulated the fluxes of the main greenhouse gases (CO_2 , CH_4 , and N_2O), as well as process-indicator gases (NH_3 , NO , and N_2), which reflect soil processes such as nitrification, denitrification, and nitrogen volatilization. The results reveal differentiated behaviors: decreases in CO_2 and N_2O emissions, negative values for CH_4 indicating a sink function under oil palm plantations, and moderate fluctuations in NH_3 , NO , and N_2 as indicators of nitrogen transformation processes. The findings highlight the influence of agricultural management practices and climatic variability on gas fluxes. Overall, the results confirm the applicability of the *DNDC*

© Мартинес В.Д.С., 2026

model as a tool not only for greenhouse gas monitoring but also for diagnosing key soil processes in tropical agroecosystems, thereby supporting the design of differentiated climate mitigation strategies.

Keywords: DNDC model, greenhouse gases, nitrogen cycle indicators, African oil palm, Colombia

For citation: Martínez W.D.S. 2026. Dynamics of Greenhouse Gases and Nitrogen Cycle Indicators in Oil Palm Plantations in the Cimitarra River Valley. *Regional Geosystems*, 50(1): 33–46. DOI: 10.52575/2712-7443-2026-50-1-0-3 EDN: CMZTFD

Введение

Выбросы парниковых газов (ПГ) в сельскохозяйственном секторе включают значительную долю глобальных антропогенных выбросов, составляя от 24 % до 34 % при рассмотрении всех этапов продовольственной системы [Niles et al., 2018; Crippa et al., 2021]. В частности, африканские масличные пальмовые культуры (*Elaeis guineensis*), были определены как важный источник выбросов из-за интенсивного использования азотных удобрений, изменения в землепользовании и ускоренной минерализации органического углерода в почве [Guillaume et al., 2015; Quezada et al., 2019; Pérez-Hernández, Pérez-Sato, 2023]. В Колумбии выращивание масличной пальмы продвигается как стратегия развития сельских районов, однако различные исследования показали, что это связано с процессами обезлесения, утратой биоразнообразия, уплотнением почвы и чистыми выбросами CO₂ [Castiblanco et al., 2015; Furumo, Aide, 2017; Gutiérrez Palacio, 2017].

В тропических регионах, таких как Средняя Магдалена, где расположена Крестьянская заповедная зона долины реки Симитарра, эта проблема приобретает особую актуальность. Неоднородность климата, давление на влажные экосистемы и сосуществование агропромышленных и фермерских систем требуют инструментов для количественной оценки и мониторинга выбросов с течением времени [Kiese et al., 2005; Gilhespy et al., 2014; Rivera-Méndez et al., 2017]. Аналогичным образом, мониторинг изменений в почвенном покрове и землепользовании является ключевым для разработки стратегий экологической устойчивости и укрепления социальной структуры крестьян, населяющих регион.

В этом контексте биогеохимическая модель *DNDC* (денитрификация-декомпозиция) зарекомендовала себя как надежный инструмент для моделирования потоков CO₂, CH₄ и N₂O, основных парниковых газов, а также NH₃, NO и N₂, которые не считаются парниковыми газами, но которые работают в качестве индикаторов процессов нитрификации, денитрификации и улетучивания в сельскохозяйственных почвах. Структура модели *DNDC* объединяет климатические, эдафологические и сельскохозяйственные данные [Li et al., 2012; Rincón-Romero et al., 2022; Swails et al., 2022].

Цель этой статьи – оценить многолетнюю динамику выбросов газов на плантациях африканских масличных пальм в Крестьянской заповедной зоне долины реки Симитарра в период 2015–2023 гг., применив модель *DNDC* и определив годовые изменения в величине и поведении каждого газа.

Объекты и методы исследования

Зона исследования. Территория Крестьянской заповедной зоны долины реки Симитарра расположена в колумбийском регионе Медико-Магдалена и занимает площадь около 570 197 га, распределенных между муниципалитетами Йондо и Ремедиос (Антиокия), а также Кантагальо и Сан-Пабло (Боливар). Этот регион характеризуется большим экологическим и продуктивным разнообразием, включая районы тропических влажных лесов, водно-болотные угодья и почвы с высоким плодородием, а также плотную гидрографическую сеть, в которой преобладает река Симитарра [Aranda-Arguello et al.,

2018]. В этих условиях масличные пальмовые культуры развиваются на преимущественно глинистых и кислых почвах с годовым количеством осадков от 2500 до 3500 мм и средними температурами выше 25 °С [Lal, 2004; Khasanah et al., 2015].

Выбор продуктивных зон. На основе карты покрытия *IDEAM* (2024 г.) было выбрано 44 сельскохозяйственных полигона, соответствующих покрытию «2.3.2 Пальмовое масло», общей площадью 14 380 га [IDEAM, 2024]. Следует отметить, что африканские масличные пальмовые культуры расположены на восточной окраине исследуемой территории между реками СIMITARRA и Магдалена, на относительно равнинных территориях и с наличием различных водоемов (рис. 1).



Рис. 1. Расположение плантаций африканской масличной пальмы в Крестьянской заповедной зоне долины реки СIMITARRA

Fig. 1. Location of African oil palm crops in the Cimitarra Valley Peasant Conservation Area

Применение модели DNDC. Модель *DNDC* была запущена по данным за 2015, 2018 и 2023 годы. Были введены климатические данные с двух метеорологических станций, принадлежащих Институту гидрологии, метеорологии и экологических исследований Колумбии-*IDEAM* (табл. 1). По данным предоставленными этими метеорологическими станциями, была получена информация об осадках (мм), максимальной и минимальной температурах (°С). За исследуемый период времени была определена взаимосвязь между каждым идентифицированным полигоном с возделываемыми культурами африканской масличной пальмы.

Таблица 1
Table 1

Просмотренные метеостанции
Viewed weather stations

Название Метеостанций	Муниципалитет	Код IDEAM	Широта	Долгота
Йондо	Йондо, Антиокия	23160010	7,089	-73,944
Эль Колехио	Сан-Пабло, Боливар	23200080	7,011	-74,714

Чтобы определить физико-химические свойства почвы (гранулометрический состав, рН, содержание органических веществ и процентное содержание глины) в исследуемой зоне, было проведено пересечение центроида многоугольника со слоями с помощью *ArcMap* и пакета «Инструменты пространственного анализа» из данных исследования почв Института Агустина Кодаци для интересующей области, в которой известны: гранулометрический состав, значение рН и содержания органического вещества (рис. 2–4). После этого был проведен обзор литературы, с помощью которого были определены исходные значения процентного содержания глины и насыпной (почвенной) плотности (г/см^3) для исходных центроидов сельскохозяйственных культур.

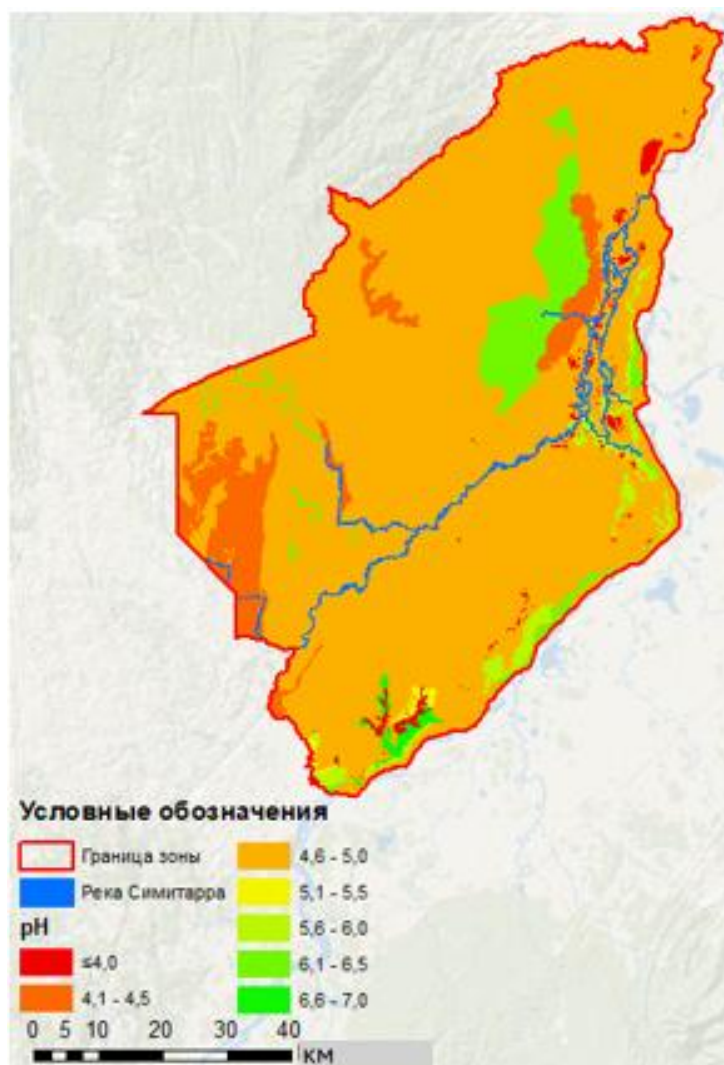


Рис. 2. рН почвы в Крестьянской заповедной зоне долины реки Симитарра
Fig. 2. Soil pH in the Peasant Reserve Zone of the Cimitarra River Valley

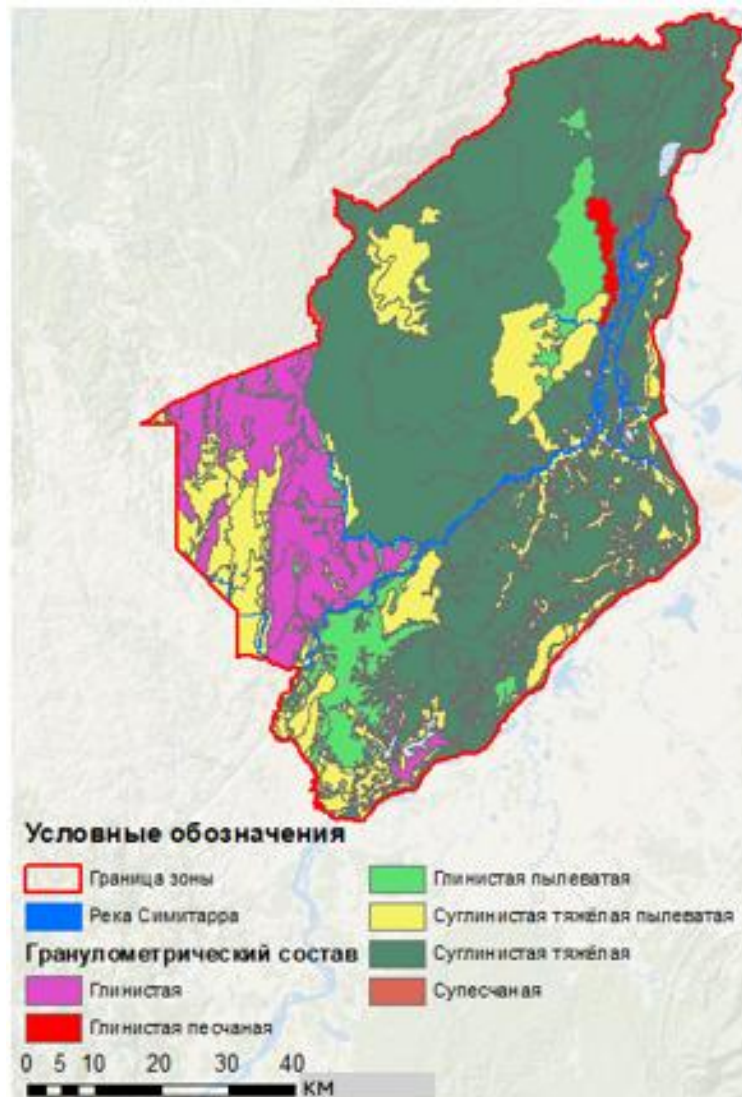


Рис. 3. Гранулометрический состав почвы в Крестьянской заповедной зоне долины реки Симитарра
Fig. 3. Soil texture in the Peasant Reserve Zone of the Cimitarra River Valley

Были использованы параметры модели *DNDC*, ранее откалиброванные для тропических условий: содержание влаги в почве, скорость разложения органических остатков, эффективность процессов нитрификации/денитрификации и микробное дыхание почвы [Li et al., 2012, Swails et al., 2022]. Методы ведения сельского хозяйства включали частоту внесения удобрений, органических удобрений и обработку почвы с использованием значений, полученных из специальной литературы по пальмовому маслу [Rincón-Romero, 2022; Pérez-Hernández, 2023;].

Для каждого из продуктивных полигонов были смоделированы ежегодные выбросы трех основных парниковых газов (CO_2 , CH_4 и N_2O), а также показатели процессов декомпозиции и денитрификации (NH_3 , NO и N_2). Полученные значения были усреднены для анализа межгодовой динамики на полигонах, соответствующих плантациям африканской масличной пальмы. Результаты представлены в следующих единицах измерения: $\text{кг} \times \text{га}^{-1} \times \text{год}^{-1}$.

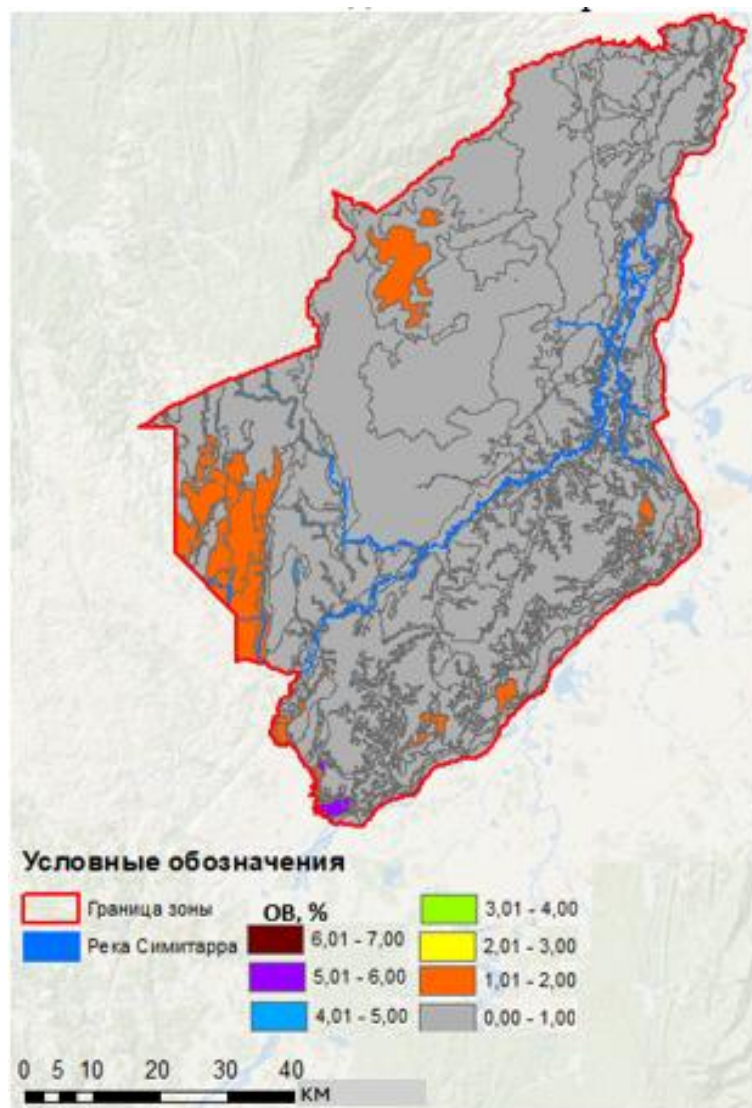


Рис. 4. Содержание органического вещества (ОВ) в почвах в Крестьянской заповедной зоне долины реки Симицарра

Fig. 3. Content of organic matter (OM) in soils in the Peasant Reserve Zone of the Cimitarra River Valley

Результаты и их обсуждение

Динамика выбросов парниковых газов (CO_2 , CH_4 и N_2O).

Динамика выбросов CO_2 . В 2015 году средние выбросы CO_2 из почвы составили $775,6 \text{ кг} \times \text{га}^{-1} \times \text{год}^{-1}$ при стандартном отклонении $17,9 \text{ кг} \times \text{га}^{-1} \times \text{год}^{-1}$, что указывает на относительно низкую вариабельность между отобранными точками. Максимальное зарегистрированное значение составило $838 \text{ кг} \times \text{га}^{-1} \times \text{год}^{-1}$, тогда как минимальное $746 \text{ кг} \times \text{га}^{-1} \times \text{год}^{-1}$, что свидетельствует об однородном распределении с небольшими вариациями.

К 2018 году средние выбросы CO_2 снизились до $752,4 \text{ кг} \times \text{га}^{-1} \times \text{год}^{-1}$, что примерно на 3 % меньше, чем в 2015 году. Однако этот год характеризовался большей дисперсией значений со стандартным отклонением $37,4 \text{ кг} \times \text{га}^{-1} \times \text{год}^{-1}$. Минимальное значение упало до $689 \text{ кг} \times \text{га}^{-1} \times \text{год}^{-1}$, а максимальное до $800 \text{ кг} \times \text{га}^{-1} \times \text{год}^{-1}$. Эта повышенная изменчивость содержания углекислого газа объясняется специфическими агроклиматическими условиями исследуемой территории или изменениями типа почвенного покрова и методов ведения сельского хозяйства в исследуемый период [Ramírez-Contreras et al., 2020].

В 2023 году наблюдается восстановление средних значений выбросов, достигающих $769,6 \text{ кг} \times \text{га}^{-1} \times \text{год}^{-1}$, с меньшей изменчивостью (стандартное отклонение $10,7 \text{ кг} \times \text{га}^{-1} \times \text{год}^{-1}$), что указывает на стабилизацию выбросов. Максимальное значение было $813 \text{ кг} \times \text{га}^{-1} \times \text{год}^{-1}$, а минимальное $756 \text{ кг} \times \text{га}^{-1} \times \text{год}^{-1}$ (рис. 4). Это может отразиться на ухудшении биофизических условий почвы и увеличении содержания летучих питательных веществ в системе [Abdalla et al., 2022].

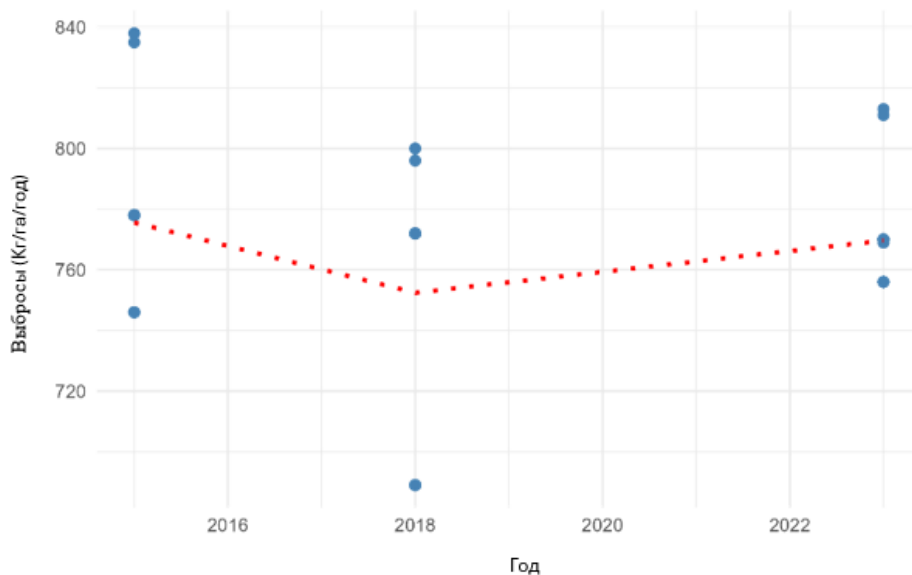


Рис. 4. Динамика выбросов CO_2 ($\text{кг} \times \text{га}^{-1} \times \text{год}^{-1}$)
Fig. 4. Dynamics of CO_2 emissions ($\text{kg} \times \text{ha}^{-1} \times \text{year}^{-1}$)

Динамика выбросов CH_4 . Выбросы метана (CH_4), выраженные в $\text{кг} \times \text{га}^{-1} \times \text{год}^{-1}$ и оцененные с помощью модели *DNDC*, оставались отрицательными в течение трех проанализированных периодов: 2015, 2018 и 2023 годов. Это говорит о том, что пальмовые культуры в Крестьянской заповедной зоне долины реки Симитарра функционировали как чистые поглотители CH_4 , а не источники CH_4 , что можно объяснить относительно хорошими условиями дренажа и ограниченным насыщением почвы водой.

В 2015 году среднее значение CH_4 составляло $-1,541 \text{ кг} \times \text{га}^{-1} \times \text{год}^{-1}$ при стандартном отклонении $0,072 \text{ кг} \times \text{га}^{-1} \times \text{год}^{-1}$. Достигнутое максимальное значение составило $-1,25 \text{ кг} \times \text{га}^{-1} \times \text{год}^{-1}$, а минимальное $-1,57 \text{ кг} \times \text{га}^{-1} \times \text{год}^{-1}$. Эти значения указывают на относительную однородность выбросов с небольшими вариациями, возможно, на это повлияли различия в гранулометрическом составе почвы.

В 2018 году было зарегистрировано небольшое среднегодовое снижение до $-1,583 \text{ кг} \times \text{га}^{-1} \times \text{год}^{-1}$, а также небольшое увеличение дисперсии (стандартное отклонение $0,075 \text{ кг} \times \text{га}^{-1} \times \text{год}^{-1}$). Значения варьировались от $-1,29$ до $-1,62 \text{ кг} \times \text{га}^{-1} \times \text{год}^{-1}$ при сохранении поглотительного поведения. Это сокращение может быть связано с повышенной аэрацией почвы или корректировками в управлении ирригацией и дренажом, которые уменьшили благоприятные условия для метаногенеза.

В 2023 году средние выбросы немного увеличились до $-1,559 \text{ кг} \times \text{га}^{-1} \times \text{год}^{-1}$, а стандартное отклонение снизилось до $0,053 \text{ кг} \times \text{га}^{-1} \times \text{год}^{-1}$, что указывает на более стабильное поведение продуктивного ландшафта. Диапазон выбросов оставался узким, от $-1,32$ до $-1,57 \text{ кг} \times \text{га}^{-1} \times \text{год}^{-1}$, что подтверждает гипотезу об отсутствии интенсивных бескислородных условий на почвах, обрабатываемых пальмовыми культурами (рис. 5).

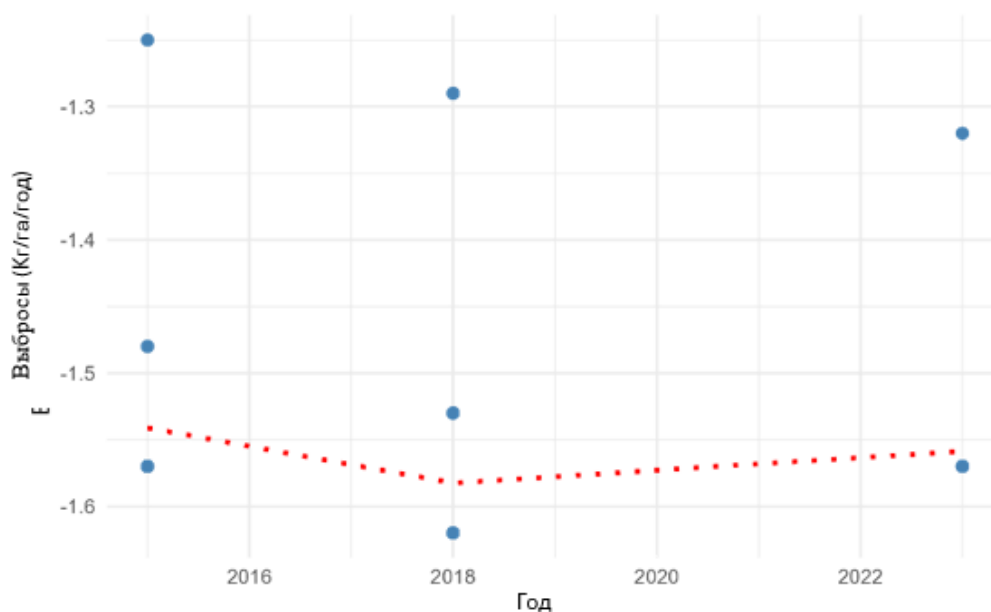


Рис. 5. Динамика выбросов CH_4 ($\text{кг} \times \text{га}^{-1} \times \text{год}^{-1}$)
Fig. 5. Dynamics of CH_4 emissions ($\text{kg} \times \text{ha}^{-1} \times \text{year}^{-1}$)

Динамика выбросов N_2O . Результаты моделирования выбросов N_2O за исследуемые годы показали относительную стабильность, но при этом отмечается высокая внутренняя изменчивость, о чем свидетельствуют величины стандартного отклонения и достигнутые максимальные значения. Эта изменчивость указывает на сильное воздействие таких факторов, как тип внесения удобрений, влажность почвы и гранулометрический состав, которые напрямую влияют на процессы нитрификации и денитрификации, ответственные за образование N_2O .

В 2015 году среднее значение составляло $6,25 \text{ кг} \times \text{га}^{-1} \times \text{год}^{-1}$ со стандартным отклонением $3,60 \text{ кг} \times \text{га}^{-1} \times \text{год}^{-1}$, что свидетельствует об умеренной дисперсии. Максимальное значение достигло $22,76 \text{ кг} \times \text{га}^{-1} \times \text{год}^{-1}$, в то время как минимальное составило $5,33 \text{ кг} \times \text{га}^{-1} \times \text{год}^{-1}$, указывает на то, что в некоторых районах территории сложились очень благоприятные условия для образования закиси азота, возможно, связанные с избытком азота или локальным насыщением водой.

В 2018 году среднее значение немного снизилось до $5,36 \text{ кг} \times \text{га}^{-1} \times \text{год}^{-1}$, сопровождаемое стандартным отклонением $3,38 \text{ кг} \times \text{га}^{-1} \times \text{год}^{-1}$, что почти равно показателю 2015 года. Это подтверждает идею высокой пространственной неоднородности. В этом году минимальное значение выбросов этого газа составило $4,28 \text{ кг} \times \text{га}^{-1} \times \text{год}^{-1}$, а максимальное значение $20,67 \text{ кг} \times \text{га}^{-1} \times \text{год}^{-1}$, что очень близко к крайним значениям за базовый год. Можно предположить, что, не смотря на снижение среднего значения, районы с самыми высокими выбросами оставались активными.

За 2023 год наблюдался рост в среднем на $6,08 \text{ кг} \times \text{га}^{-1} \times \text{год}^{-1}$, со стандартным отклонением меньше чем $3,02 \text{ кг} \times \text{га}^{-1} \times \text{год}^{-1}$, что может свидетельствовать о стабилизации умеренной системы, хотя существуют еще точки (участки) с высоким уровнем выбросов (до $20,05 \text{ кг} \times \text{га}^{-1} \times \text{год}^{-1}$). Более низкая дисперсия в этом году может быть связана с лучшим распределением применяемого азота или более однородными эдафоклиматическими условиями на смоделированных участках выращивания (рис. 6).

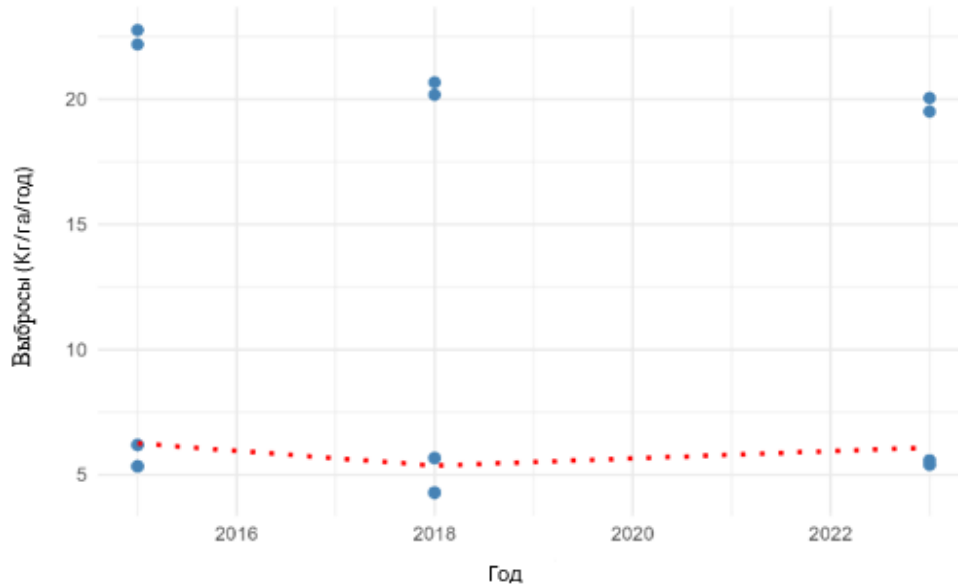


Рис. 6. Динамика выбросов N_2O ($кг \times га^{-1} \times год^{-1}$)
Fig. 6. Dynamics of N_2O emissions ($kg \times ha^{-1} \times year^{-1}$)

Динамика выбросов газов (NH_3 , NO и N_2)

Динамика выбросов NH_3 . В 2015 году средняя концентрация NH_3 составляла $88,67 \text{ кг} \times \text{га}^{-1} \times \text{год}^{-1}$ при стандартном отклонении $9,78 \text{ кг} \times \text{га}^{-1} \times \text{год}^{-1}$, что указывает на относительно однородное распределение. Достигнутое максимальное значение составило $127,46 \text{ кг} \times \text{га}^{-1} \times \text{год}^{-1}$, а минимальное – $83,94 \text{ кг} \times \text{га}^{-1} \times \text{год}^{-1}$, что отражает некоторую пространственную изменчивость, хотя и без соответствующих нетипичных экстремумов. Пространственное распределение за этот год показывает более высокую концентрацию значений в диапазоне от среднего до высокого.

В 2018 году было отмечено снижение выбросов до $79,38 \text{ кг} \times \text{га}^{-1} \times \text{год}^{-1}$, что представляет собой сокращение более $9 \text{ кг} \times \text{га}^{-1} \times \text{год}^{-1}$ по отношению к 2015 году. Несмотря на уменьшение общего показателя, максимальные значения продолжали оставаться на высоком уровне ($114,67 \text{ кг} \times \text{га}^{-1} \times \text{год}^{-1}$), а минимальные опустились на $73,28 \text{ кг} \times \text{га}^{-1} \times \text{год}^{-1}$, где стандартное отклонение незначительно возросло на $9,99 \text{ кг} \times \text{га}^{-1} \times \text{год}^{-1}$, с указанием большего разброса данных. Такое поведение может быть связано с изменениями в управлении сельским хозяйством или с климатическими факторами, которые повлияли на цикл улетучивания аммиака.

В 2023 году среднее значение снова увеличилось до $84,18 \text{ кг} \times \text{га}^{-1} \times \text{год}^{-1}$, частично восстановив снижение, наблюдавшееся в 2018 году. Однако отмечается значительное уменьшение стандартного отклонения ($2,21 \text{ кг} \times \text{га}^{-1} \times \text{год}^{-1}$), что свидетельствует о гораздо более однородном распределении концентраций. Экстремальные значения оставались в аналогичных диапазонах: максимум $95,57 \text{ кг} \times \text{га}^{-1} \times \text{год}^{-1}$ и минимум $83,09 \text{ кг} \times \text{га}^{-1} \times \text{год}^{-1}$, что отражает меньшую пространственную изменчивость по сравнению с предыдущими годами (рис. 9).

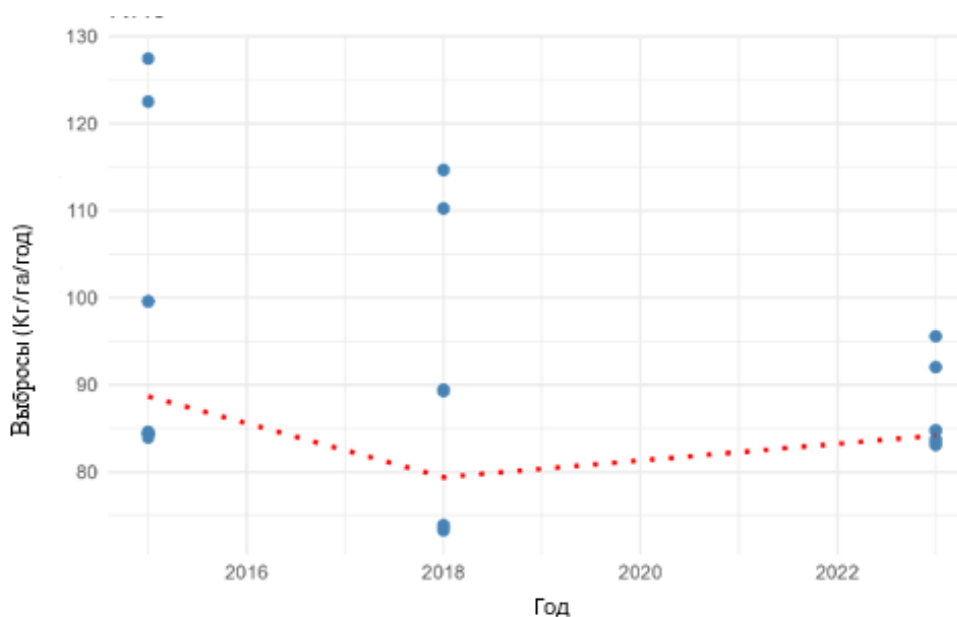


Рис. 8. Динамика выбросов NH_3 ($\text{kg} \times \text{га}^{-1} \times \text{год}^{-1}$)
Fig. 8. Dynamics of NH_3 emissions ($\text{kg} \times \text{ha}^{-1} \times \text{year}^{-1}$)

Динамика выбросов NO . Выбросы оксида азота NO показали относительную стабильность в своих средних значениях в период с 2015 по 2023 годы с небольшими колебаниями и равномерным поведением в их пространственном распределении. Эти выбросы, хотя и меньшие по величине по сравнению с выбросами N_2O или CH_4 , но составляют значительную долю азотного цикла в сельскохозяйственных почвах, особенно в тропических экосистемах, где тепловые условия благоприятствуют микробным процессам.

В течение 2015 года среднее значение выбросов составляло $0,196 \text{ kg} \times \text{га}^{-1} \times \text{год}^{-1}$ при стандартном отклонении $0,051 \text{ kg} \times \text{га}^{-1} \times \text{год}^{-1}$. Выбросы колебались от $0,051$ до $0,426 \text{ kg} \times \text{га}^{-1} \times \text{год}^{-1}$, демонстрируя умеренную дисперсию. Эти цифры показывают районы с возможным избытком минерального азота или с условиями влажности, близкими к насыщению, что способствует неполной нитрификации и выделению NO в качестве побочного продукта.

В 2018 году среднее значение выбросов было немного увеличено до $0,207 \text{ kg} \times \text{га}^{-1} \times \text{год}^{-1}$, хотя и с меньшей дисперсией (стандартное отклонение $0,035 \text{ kg} \times \text{га}^{-1} \times \text{год}^{-1}$). Максимальное зарегистрированное значение составило $0,360 \text{ kg} \times \text{га}^{-1} \times \text{год}^{-1}$, а минимальное – $0,179 \text{ kg} \times \text{га}^{-1} \times \text{год}^{-1}$, что демонстрирует меньшую изменчивость по сравнению с базовым годом. Это может быть связано с большей равномерностью обработки почвы и внесения азотных удобрений.

К 2023 году выбросы немного снизились до $0,191 \text{ kg} \times \text{га}^{-1} \times \text{год}^{-1}$ со стандартным отклонением $0,051 \text{ kg} \times \text{га}^{-1} \times \text{год}^{-1}$, как и в 2015 году. Диапазон оставался стабильным, с минимальными значениями от $0,175$ и до $0,422 \text{ kg} \times \text{га}^{-1} \times \text{год}^{-1}$. Такое поведение свидетельствует о том, что почвенные и климатические условия региона не привели к резким изменениям в процессе производства NO , а факторы, контролирующие его выбросы (такие как тип удобрений и аэрация почвы), остались неизменными или лучше контролировались (рис. 7).

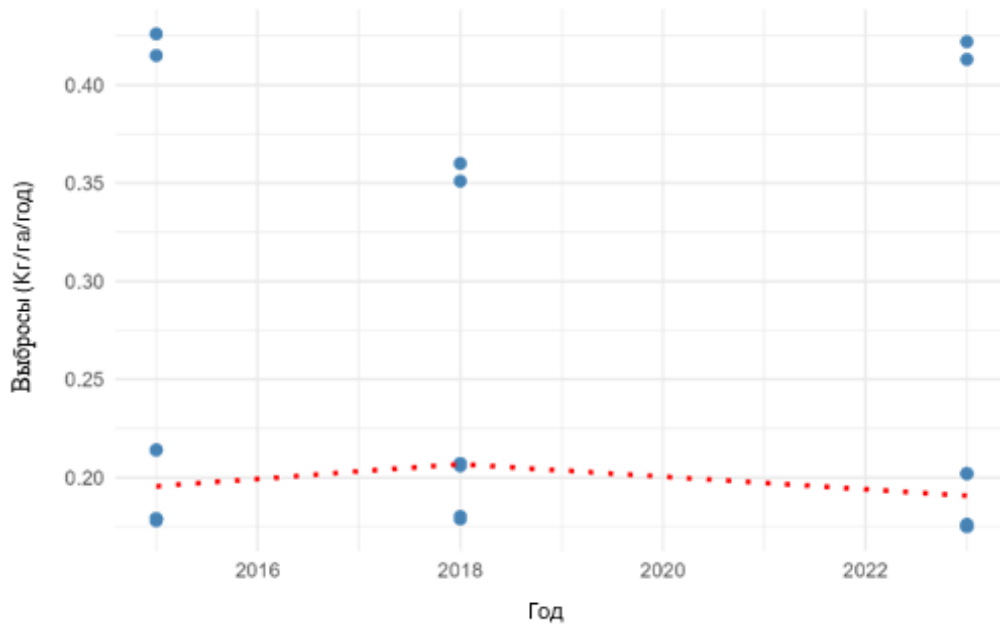


Рис. 7. Динамика выбросов NO ($\text{кг} \times \text{га}^{-1} \times \text{год}^{-1}$)
Fig. 7. Dynamics of NO emissions ($\text{kg} \times \text{ha}^{-1} \times \text{year}^{-1}$)

Динамика выбросов N_2 . В течение анализируемого периода с 2015 по 2023 годы средние выбросы N_2 , смоделированные с помощью *DNDC*, на масличных пальмовых культурах в Крестьянской заповедной зоне долины реки Симитарра показали небольшую годовую изменчивость.

В 2015 году среднее значение составляло $0,061 \text{ кг} \times \text{га}^{-1} \times \text{год}^{-1}$, увеличившись до $0,070 \text{ кг} \times \text{га}^{-1} \times \text{год}^{-1}$ в 2018 году и немного снизившись до $0,055 \text{ кг} \times \text{га}^{-1} \times \text{год}^{-1}$ в 2023 году. Эта тенденция предполагает сдержанное колебание N_2 с небольшим увеличением к середине периода и последующим снижением. Что касается разброса, то следует отметить, что минимальное значение, зарегистрированное в 2015 году, составило $0,042 \text{ кг} \times \text{га}^{-1} \times \text{год}^{-1}$, в то время как максимальное значение достигло $0,257 \text{ кг} \times \text{га}^{-1} \times \text{год}^{-1}$, что свидетельствует о высоком разбросе между участками.

В 2018 году диапазон выбросов был шире от $0,057 \text{ кг} \times \text{га}^{-1} \times \text{год}^{-1}$ до $0,336 \text{ кг} \times \text{га}^{-1} \times \text{год}^{-1}$, что также нашло отражение в увеличении стандартного отклонения (с $0,042$ в 2015 году до $0,057 \text{ кг} \times \text{га}^{-1} \times \text{год}^{-1}$ в 2018 году), что указывает на большую пространственную неоднородность.

Наконец, в 2023 году выбросы стабилизировались на промежуточных значениях с минимумом $0,044 \text{ кг} \times \text{га}^{-1} \times \text{год}^{-1}$ и максимумом $0,267 \text{ кг} \times \text{га}^{-1} \times \text{год}^{-1}$ и стандартным отклонением $0,045 \text{ кг} \times \text{га}^{-1} \times \text{год}^{-1}$, что указывает на небольшое снижение изменчивости по сравнению с 2018 годом (рис. 8).

В целом, сравнивая средние показатели по выращиванию африканской масличной пальмы в исследуемом районе, можно сказать, что в период с 2015 по 2023 годы произошло снижение на 0,76 % для CO_2 , на 2,62 % для N_2O , на 2,43 % для NO, на 10 % для N_2 и 5,06 % для NH_3 . Поскольку выращивание пальмы требует больших объемов воды, увеличение отрицательного значения CH_4 на 1,14 % указывает на то, что оно действует как чистый поглотитель CH_4 в регионе.

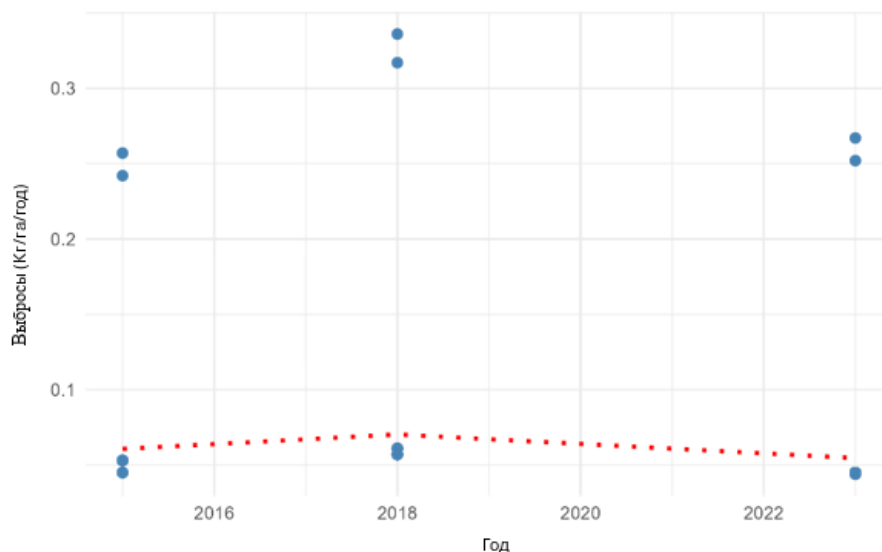


Рис. 8. Динамика выбросов N_2 ($kg \times ha^{-1} \times год^{-1}$)
Fig. 8. Dynamics of N_2 emissions ($kg \times ha^{-1} \times year^{-1}$)

Явление, указывающее на ограниченное насыщение почвы водой, не смотря на то, что плантации находятся в непосредственной близости от водоемов и в районах, которые ранее были водно-болотными угодьями, может привести к уменьшению количества существующих водоемов из-за интенсификации возделывания этой культуры.

Заключение

Модель *DNDC* подтвердила свою пригодность для оценки многолетней динамики выбросов в тропических агроэкосистемах и продемонстрировала чувствительность к изменениям климатических, агрономических и почвенных условий.

Анализ динамики основных парниковых газов (CO_2 , CH_4 и N_2O) показал:

- Для CO_2 характерно постепенное восстановление после снижения в 2018 г., что указывает на высокую чувствительность углеродного цикла к изменениям в управлении плантациями. Это может отразиться на ухудшении биофизических условий почвы и увеличении содержания летучих питательных веществ в системе.

- Постепенное увеличение содержания CO_2 свидетельствует о снижении способности улавливать углерод, что объясняется интенсификацией сельского хозяйства и потерей вторичного растительного покрова.

- CH_4 за весь период исследования имел отрицательные значения, что свидетельствует о том, что плантации функционируют как чистый поглотитель метана, вероятно, благодаря условиям аэрации почвы и процессу дренажа, необходимого для производства этого типа плантаций.

- Выбросы N_2O оставались относительно стабильными, но с высокой пространственной вариабельностью, что связано с режимом использования удобрений.

Дополнительно были рассмотрены газы NH_3 , NO и N_2 , которые не относятся к парниковым, но являются важными индикаторами процессов денитрификации и декомпозиции:

- Динамика NH_3 указывает на заметные изменения в улетучивании аммиака, отражающие как агротехнические практики, так и климатические факторы.

- Выбросы NO оставались на низком уровне и демонстрировали ограниченные колебания, что свидетельствует о контролируемом ходе процессов нитрификации.

- N_2 показал умеренные межгодовые изменения, связанные с завершённой денитрификацией.

Таким образом, результаты исследования подчеркивают необходимость различать парниковые газы и индикаторы процессов для интерпретации данных моделирования.

Результаты согласуются с исследованиями, проведенными в других тропических регионах, таких как Мета, колумбийское Чоко и бразильская Амазонка, где выращивание пальм привело к значительным климатическим последствиям из-за изменений в землепользовании и интенсивного агрохимического управления.

Реализация модели *DNDC* подтверждена как воспроизводимый инструмент с чувствительностью к изменениям климатических, агрономических и эдафических свойств.

Сделан вывод о том, что модель *DNDC* может использоваться не только для мониторинга выбросов парниковых газов, но и для диагностики ключевых почвенных процессов (нитрификация, денитрификация, улетучивание азота). Это позволяет рекомендовать ее в качестве технического инструмента в стратегиях смягчения последствий изменения климата и в планах устойчивого развития сельских территорий.

References

- Abdalla M., Song X., Ju X., Smith P. 2022. Evaluation of DNDC to Estimate Soil Parameters, Crop Yield and Nitrous Oxide Emissions for Alternative Long-Term Multi-Cropping Systems in the North China Plain. *Agronomy*, 12(1): 109. <https://doi.org/10.3390/agronomy12010109>.
- Aranda-Arguello R., Ley-de Coss A., Arce-Espino C., Pinto-Ruiz R., Guevara-Hernández F., Raj-Aryal D. 2018. Captura de Carbono en la Biomasa Aérea de la Palma de Aceite en Chiapas. *Agronomía Mesoamericana*, 29(3): 629–637. <https://doi.org/10.15517/ma.v29i3.32076>.
- Castiblanco C., Etter A., Ramirez A. 2015. Impacts of Oil Palm Expansion in Colombia: What do Socioeconomic Indicators Show? *Land Use Policy*, 44: 31–43. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2014.10.007>.
- Crippa M., Solazzo E., Guizzardi D., Monforti-Ferrario F., Tubiello F.N., Leip A. 2021. Food Systems are Responsible for a Third of Global Anthropogenic GHG Emissions. *Nature Food*, 2(3): 198–209. <https://doi.org/10.1038/s43016-021-00225-9>.
- Furumo P.R., Aide T.M. 2017. Characterizing Commercial Oil Palm Expansion in Latin America: Land Use Change and Trade. *Environmental Research Letters*, 12(2): 024008. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa5892>.
- Gilhespy S.L., Anthony S., Cardenas L., Chadwick D., del Prado A., ... Yeluripati J.B. 2014. First 20 years of DNDC (DeNitrification-DeComposition): Model Evolution. *Ecological Modelling*, 292: 51–62. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2014.09.004>.
- Gutiérrez Palacio G.N. 2017. Efecto Del Cultivo de Palma de Aceite Sobre Las Propiedades Físicas Del Suelo. *Lámpsakos*, 17: 20–28. <https://doi.org/10.21501/21454086.2390>.
- Guillaume T., Damris M., Kuzyakov Ya. 2015. Losses of Soil Carbon by Converting Tropical Forest to Plantations: Erosion and Decomposition. *Global Change Biology*, 21(9): 3548–3560. <https://doi.org/10.1111/gcb.12907>.
- Khasanah N., van Noordwijk M., Ningsih H., Rahayu S. 2015. Carbon Neutral? No Change in Mineral Soil Carbon Stock Under Oil Palm Plantations in Indonesia. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 211: 195–206. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.06.009>.
- Kiese R., Li Ch., Hilbert D.W., Papen H., Butterbach-Bahl K. 2005. Regional Application of PnET-N-DNDC for Estimating the N_2O Source Strength of Tropical Rainforests in the Wet Tropics of Australia. *Global Change Biology*, 11(1): 128–144. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2004.00873.x>.
- IDEAM. 2024. Coberturas Del Suelo Con Metodología Corine. Bogotá, IDEAM, 83 p.
- Lal R. 2004. Soil Carbon Sequestration Impacts on Global Climate Change and Food Security. *Science*, 304(5677): 1623–1627. <https://doi.org/10.1126/science.1097396>.
- Li C., Salas W., Zhang R., Krauter C., Rotz A., Mitloehner F. 2012. Manure-DNDC: a Biogeochemical Process Model for Quantifying Greenhouse Gas and Ammonia Emissions from Livestock



- Manure Systems. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 93(2): 163–200. <https://doi.org/10.1007/s10705-012-9507-z>.
- Niles M.T., Ahuja R., Barker T., Esquivel J., Gutterman S., ... Vermeulen S. 2018. Climate Change Mitigation Beyond Agriculture: a Review of Food System Opportunities and Implications. Renewable Agriculture and Food Systems, 33(3): 297–308. <https://doi.org/10.1017/S1742170518000029>.
- Pérez-Hernández H., Pérez-Sato M. 2023. ¿La Palma Aceitera (Elaeis Guineensis) Genera un Impacto Negativo Sobre el Suelo? Una Revisión. Agronomía Mesoamericana, 34(1): e50301. <https://doi.org/10.15517/am.v34i1.50301>.
- Quezada J.C., Etter A., Ghazoul J., Buttler A., Guillaume T. 2019. Carbon Neutral Expansion of Oil Palm Plantations in the Neotropics. Science Advances, 5(11): eaaw4418. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aaw4418>.
- Ramírez-Contreras N.E., Munar-Flórez D.A., García-Núñez J.A., Mosquera-Montoya M., Faaij A.P.C. 2020. The GHG Emissions and Economic Performance of Colombian Palm Oil. Journal of Cleaner Production, 258: 120757. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120757>.
- Rivera-Méndez Y.D., Rodríguez D.T., Romero H.M. 2017. Carbon Footprint of Oil Palm Fresh Fruit Bunches in Colombia. Journal of Cleaner Production, 149(6): 740–750. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.149>.
- Rincón-Romero V.O., Molina-Villarreal A., Zabala-Quimbayo A., Barrera-Agudelo O.R., Torres-León J.L. 2022. The Oil Palm Cadastre in Colombia. Agronomía Colombiana, 40(2): 258–269. <https://doi.org/10.15446/agron.colomb.v40n2.98801>.
- Swails E., Hergoualc'h K., Deng J., Froking S., Hayman P. 2022. How can Process-Based Modeling Improve Peat CO₂ and N₂O Emission Factors for Oil Palm Plantations? Science of the Total Environment, 839: 156153. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156153>.

*Поступила в редакцию 30.06.2025;
поступила после рецензирования 02.09.2025;
принята к публикации 21.10.2025*

*Received June 30, 2025;
Revised September 02, 2025;
Accepted October 21, 2025*

Конфликт интересов: о потенциальном конфликте интересов не сообщалось.
Conflict of interest: no potential conflict of interest related to this article was reported.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Мартинес Вильям Давид Сегура, аспирант кафедры прикладной и системной экологии, РГГМУ Российский Государственный Гидрометеорологический Университет, г. Санкт-Петербург, Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

William D.S. Martínez, Postgraduate Student, Department of Applied and Systems Ecology, RSHU Russian State Hydrometeorological University, Saint Petersburg, Russia