



Опыт исследования балансовых потоков парниковых газов с торфяников Беларуси, используемых для промышленной добычи торфа

© 2025 З. А. Ничипорович , Л. А. Заневская , Л. Н. Гаврилюк

ГНПО «Научно-практический центр Национальной академии наук по биоресурсам», Академическая, 27, г. Минск, 220072, Беларусь. E-mail: nichiporovich_z@mail.ru

Цель исследования. Изучение пространственно-временной динамики климатически активных парниковых газов (CO_2 , CH_4 , N_2O), выделяемых торфяниками Беларуси, которые используются для промышленной добычи торфа. Исследования направлены на получение новых коэффициентов эмиссии парниковых газов, а также уточнение и постоянное обновление определяемого на национальном уровне вклада страны в глобальные антропогенные выбросы торфяниками.

Место и время проведения. Исследования проводили на полях торфодобычи (май–сентябрь, 2022–2024 гг.) и каналах осушительной системы (июнь–сентябрь, 2024 г.) Гричино-Старобинского торфяного месторождения Солигорского района Минской области.

Методы. Метод ИК-спектроскопии применяли для суточных инструментальных измерений эмиссии C-CO_2 с торфодобывающих участков с использованием газоанализатора LI-COR LI-820, а метод статичных камер – для регистрации балансовых потоков CO_2 , CH_4 , N_2O с каналов осушительной системы в реальном режиме времени. Камеральная обработка результатов натурных измерений CO_2 , CH_4 , N_2O осуществлена на основе программного обеспечения CAMPBELL SCIENTIFIC (Австралия) и газового хроматографа «Хроматек-Кристалл 5000.2» (Россия).

Основные результаты. Впервые в Беларуси получены новые данные о выбросах CO_2 с промышленных торфяников. Установлено, что совокупные удельные выбросы C-CO_2 за 3-х летний период измерений составили $10,33 \text{ т C-CO}_2 \text{ га}^{-1}$, в том числе за 2022 г. – $3,46 \text{ т C-CO}_2 \text{ га}^{-1}$, 2023 – $5,61 \text{ т C-CO}_2 \text{ га}^{-1}$, 2024 г. – $1,26 \text{ т C-CO}_2 \text{ га}^{-1}$, средние совокупные выбросы – $3,44 \text{ т C-CO}_2 \text{ га}^{-1}$. Общий объем эмиссии CO_2 , CH_4 , N_2O с осушительных каналов составил $4,947 \text{ т/га}$; преобладающим был диоксид углерода с показателем $4,808 \text{ т CO}_{2\text{-экв.}} \text{ га}^{-1}$ (97,19%), метан в общем пуле занимал 2-м место – $0,112 \text{ т CO}_{2\text{-экв.}} \text{ га}^{-1}$ (2,26%), а эмиссия закиси азота была пренебрежимо мала – $0,027 \text{ т CO}_{2\text{-экв.}} \text{ га}^{-1}$ (0,55%). Основными факторами, влияющими на эмиссию парниковых газов, являются температурный режим и уровень грунтовых вод (УГВ). Максимум выбросов CO_2 , зарегистрированный в 2023 г., обусловлен аномально высокой средней температурой в период измерений с показателем $32,0^\circ\text{C}$ и УГВ (от $-0,7$ до $-0,8 \text{ м}$) в картовых каналах, обеспечив высокую эффективность процесса сушки, запускающего механизм антропогенной эмиссии CO_2 . Напротив, подтопление грунтовыми водами эталонных площадок с УГВ от $-0,05$ до $-0,10 \text{ м}$ и снижение средней температуры до $26,5^\circ\text{C}$ в 2024 году создало анаэробные условия, при которых была отмечена самая низкая эмиссия – $1,26 \text{ т C-CO}_2 \text{ га}^{-1}$, что в 4,45 раза ниже показателя 2023 г.

Заключение. Представленные результаты по эмиссии CO_2 получены в условиях послойно-фрезерной добычи торфа на торфяных месторождениях Беларуси и нацелены на разработку национальных коэффициентов выбросов парниковых газов с учетом генезиса торфа, специфических климатических условий и существующей практики добычи торфа в стране. В перспективе такие данные могут служить основой для создания оценочных и прогностических пространственно-временных моделей эмиссии парниковых газов с торфяников Беларуси в современных условиях их антропогенного освоения.

В настоящее время по результатам исследований разработана технология дистанционного мониторинга выбросов парниковых газов, реализованная программным комплексом информационной поддержки, который прошел 2-ой этап опытной эксплуатации и будет передан в Минприроды Республики Беларусь для применения в их практической деятельности.

Ключевые слова: торфодобыча; дренажные каналы; парниковые газы (CO_2 , CH_4 , N_2O); ИК-спектроскопия; газовая хроматография.

Цитирование: Ничипорович З.А., Заневская Л.А., Гаврилюк Л.Н. Опыт исследования балансовых потоков парниковых газов с торфяников Беларуси, используемых для промышленной добычи торфа // Почвы и окружающая среда. 2025. Том 8. № 4. е324. DOI: [10.31251/pos.v8i4.324](https://doi.org/10.31251/pos.v8i4.324)

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность исследований эмиссии и стоков парниковых газов (ПГ) с нарушенных торфяников обусловлена двумя мировыми проблемами: глобальным потеплением климата и необходимостью сокращения выбросов ПГ антропогенного происхождения.

Беларусь имеет самую высокую долю торфяников в Европе (около 15% территории страны) с общей площадью 2,39 млн га, при этом около 1,5 млн га болот (7% территории страны) осушены для использования в сельском и лесном хозяйстве и для добычи торфа (Углеродные кредиты ..., 2011). Занимая небольшую территорию, страна входит в мировой топ–10 по отношению к выбросам CO₂ с деградированных торфяников и в топ 3 – по объемам выбросов на единицу площади, уступая Индонезии и Эстонии, с показателем 1,99 т с 1 га (Peters, von Unger, 2017).

В контексте углеродного развития страны и адаптации к изменению климата, Республика Беларусь взяла на себя обязательства по проектным сокращениям выбросов ПГ до 2030 г. не менее чем на 28% от уровня выбросов 1990 г., а позже была взята новая безусловная экономическая цель – снижение выбросов до 35% с учетом сектора «ЗИЗЛХ» (Землепользование, изменение землепользования и лесное хозяйство). В настоящее время установлена новая общеэкономическая условная цель – снизить выбросы парниковых до 40% с учетом сектора «ЗИЗЛХ» при поддержке международного финансирования (Постановление Совета Министров ..., 2021).

Одной из приоритетных целей, выдвинутых Международной группой экспертов ООН по климату, является уточнение и постоянное обновление определяемых на национальном уровне вкладов каждой страны в глобальные антропогенные выбросы парниковых газов. В связи с этим, на передний план выдвигается задача создания и совершенствования функциональной системы мониторинга, отчетности и верификации антропогенных выбросов ПГ, в том числе с нарушенных торфяников.

В настоящее время в Беларуси для предоставления отчетов о выбросах парниковых газов с нарушенных торфяников используется самый низкий из трех – 1-ый уровень их инвентаризации (IPCC ..., 2006), так называемый «по умолчанию», с показателем 1,1 т/га/год для торфяников под добычей, без учета существующих практик в стране, генезиса и пространственной неоднородности торфяной залежи, специфических климатических условий. В связи с этим, для перехода на 2-ой, более высокий уровень необходима разработка национальных уточненных коэффициентов, полученных в реальных условиях на основе оценки пространственно-временной динамики потоков парниковых газов как в сезон добычи торфа, так и иные периоды. Разработка инновационных подходов и методик на основе эталонированных выбросов и автоматизированных методов их экстраполяции на аналоги-ландшафты, в том числе с применением данных дистанционного зондирования является перспективной задачей для перехода на 3-й, самый высокий уровень с учетом трансформации торфяной залежи и динамики выбросов ПГ при каждой операции полного цикла добычи торфа.

Однако до настоящего времени в Беларуси не проводилось систематических исследований в этом направлении и не выработан механизм, позволяющий решать эти задачи. Лишь с 2022 г. начаты инструментальные сезонные измерения потоков ПГ в реальном режиме времени на тестовых полигонах Беларуси, результаты которых представлены в данной статье и являются одним из аспектов реализации вышеозначенной проблемы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Характеристика Старобинского тестового полигона. Старобинский полигон является многолетней научно-производственной базой различных организаций и ведомств для проведения наземного и дистанционного мониторинга оценки трансформации нарушенных торфяников Полесского региона в ходе их естественной антропогенной эволюции. Гричино-Старобинское торфяное месторождение (кадастровый номер 1186), на котором расположен полигон, с 2022 г. используется как сырьевая база ОАО «Старобинский ТБЗ» для добычи торфа послойно-поверхностным (фрезерным) способом (Распоряжение Президента ..., 2020). До этого участок представлял пахотные сельскохозяйственные земли, используемые для выращивания зерновых культур (пшеница, рожь, кукуруза) и сенокоса (август 2020 г.). Предполагаемый срок эксплуатации составляет 13 лет, в том числе с условно стабильной мощностью – 12, что явилось обоснованием выбора полигона как для оценки трансформации торфяной залежи, так и пространственно-временной динамики эмиссии парниковых газов в период от начала добычи торфа (2022 г.) до ее полного завершения.

Торфяная залежь представлена низинными видами торфа с преобладанием тростникового – 70,9 %, со средней глубиной залегания торфа 1,77 м. Степень разложения варьирует от 35 до 55%, влажность – от 82,41 до 90,01%, зольность – от 6,25 до 28,99%. Подстилающие грунты – пески мелкие (Отчет о выполнении работ ..., 2020).

Полигон включает два обособленных польдера с системой картвых каналов, разделенных Кривичским каналом, который является основным водоприемником полей торфодобычи (бассейн р.

Припять). Расстояние между картовыми каналами принято 40 м (Отчет о выполнении работ ..., 2020). Площадь полигона составляет 98,9 га (брутто) и 79,1 га (нетто), из них 28,61 га, незадействованные в добыче, заняты противопожарными водоемами, благоустроенными кавальерами, насосными станциями, железнодорожной веткой с колес 750 мм и другими неэксплуатируемыми участками. Расположение Старобинского тестового полигона показано на рисунке 1.

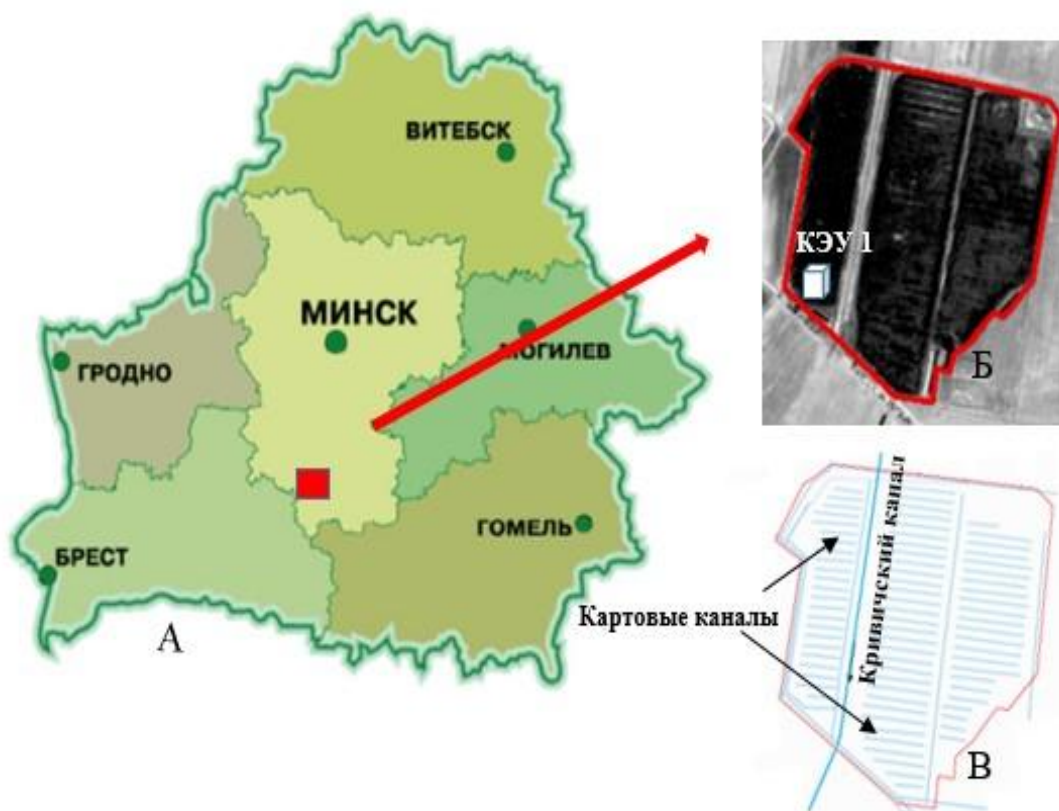


Рисунок 1. Схема расположения Старобинского тестового полигона: А – на карта-схеме Беларуси (Минская область, Солигорский район); Б – границы полигона, фрагмент космоснимка Канопус-В6 (панхром, 10.09.2023); В – схема осушительных каналов полигона.

Характеристика калибровочно-эталонного участка (КЭУ). КЭУ включает две **эталонных площадки (ЭП)**, на которых были установлены камеры для сбора газа: на основной поверхности торфяника (**ЭП-1а**) и на валовом канале (**ЭП-1б**) (рис. 2). Координатная привязка эталонных площадок представлена в таблице 1.

Таблица 1

Координатная привязка ЭП 1 в системе WGS 84

ЭП 1	Широта	Долгота
ЭП 1а	52°43'15,77" с.ш.	27°21'13,994" в.д.
ЭП 1б	52°43'14,87" с.ш.	27°21'13,27" в.д.

Метод ИК-спектроскопии применяли для суточных инструментальных измерений CO₂ один раз в месяц в реальном режиме времени с основной поверхности полей торфодобычи, используя средства газоанализатора LI-COR LI-820 при регистрации данных в автоматическом режиме каждые 5 секунд.

Метод статичных камер (Лактионова и др., 2011; Drösler, 2005) применялся для измерений балансовых потоков климатически активных парниковых газов CO₂, CH₄, N₂O с каналов осушительной сети и для сравнительного анализа выбросов с основной поверхности торфяника и каналов.

Камеральная обработка результатов натурных инструментальных измерений осуществляла с применением программного обеспечения CAMPBEL SCIENTIFIC (Австралия) и газового хроматографа «Хроматек-Кристалл 5000.2» (Россия) с электронно-захватным и пламенно-ионизационным детекторами для CO₂, CH₄, N₂O (Лактионова и др., 2011).



Рисунок 2. Калибровочно-эталонный участок: ЭП-1а – основная поверхность торфяника, ЭП-1б – валовый канал (фото Л.А. Заневской).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В рамках данной статьи исследованы выбросы парниковых газов с промышленных торфяников от двух источников: с основной поверхности торфяной залежи и из дренажных каналов.

Эмиссия CO_2 через основную поверхность торфяника. За 2022–2024 гг. измерительной сессии эмиссия CO_2 методом ИК-спектроскопии в реальном режиме времени в период добычи торфа (май–сентябрь) были рассчитаны совокупные удельные выбросы C-CO_2 , которые составили $10,33 \text{ т га}^{-1}$, в том числе с разбивкой по месяцам: 1,14; 1,26; 3,21; 2,63 и 2,09 т га^{-1} , соответственно (табл. 2).

Таблица 2

Эмиссия CO_2 за измерительный сезон добычи торфа за 2022–2024 гг.

Год	Эмиссия, $\text{т C-CO}_2 \text{ га}^{-1}$					Эмиссия, $\text{т C-CO}_2 \text{ га}^{-1}$
	май	июнь	июль	август	сентябрь	
2022	0,35	0,38	0,74	1,04	0,95	3,46
2023	0,56	0,62	2,28	1,36	0,79	5,61
2024	0,23	0,26	0,19	0,23	0,35	1,26
Всего 2022–2024	1,14	1,26	3,21	2,63	2,09	10,33
Средняя совокупная эмиссия (т/га)						3,44

Анализ результатов показал, что для балансового потока диоксида углерода с исследуемых торфяников характерно только однонаправленное действие – в сторону эмиссии. Исключение стоковой составляющей в балансе объясняется отсутствием биомассы на производственных полях в соответствии с общепринятой практикой добычи фрезерного торфа. Как показали результаты 3-х летних (2022–2024 гг.) измерений, максимальные выбросы были зарегистрированы в 2023 г. с показателем $5,61 \text{ т C-CO}_2 \text{ га}^{-1}$ за сезон торфодобычи (май–сентябрь). В 2022 г. эмиссия C-CO_2 была ниже в 1,61 раза и составила $3,46 \text{ т га}^{-1}$, а в 2024 г. – еще ниже, в 4,45 раза по отношению к 2023 г. с результатом $1,26 \text{ т га}^{-1}$ (табл. 2).

Сезонная динамика CO_2 , была рассмотрена на примере 2023 г., который характеризуется максимальными из трех сценариев выбросами, по сравнению с 2022 и 2024 гг. Так можно выделить два временных интервала распределения CO_2 : незначительный рост эмиссии с мая ($0,56 \text{ т га}^{-1}$) по июнь ($0,62 \text{ т га}^{-1}$) и быстрый максимум в июле, в период наиболее активной фазы добычи торфа, с показателем $2,28 \text{ т га}^{-1}$. Для второго периода, после подъема, в оставшиеся месяцы торфодобывающего

сезона (августе и сентябре) газообменные процессы носили затухающий характер и регистрировалось сокращение $C-CO_2$ до 1,36 и 0,79 т га⁻¹, соответственно (табл. 2, рис. 3).

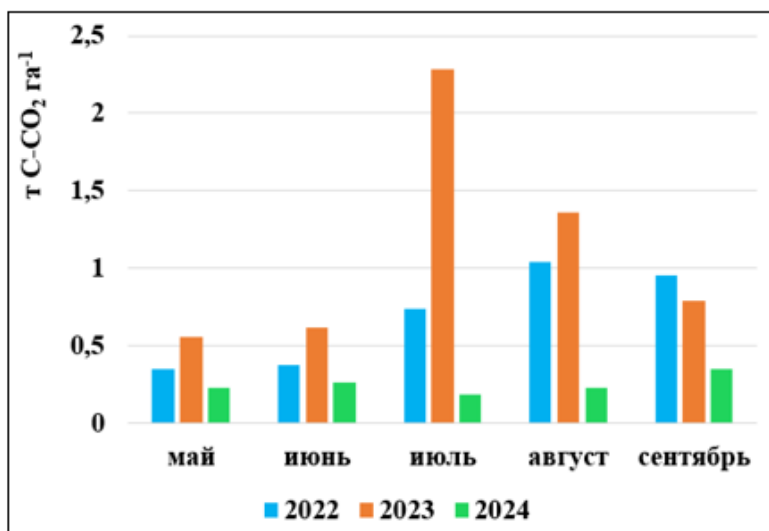


Рисунок 3. Эмиссия CO_2 за 2022–24 гг. с разбивкой по месяцам в сезон добычи торфа.

Максимальные значения эмиссии в 2023 г. по сравнению с 2022 и 2024 гг. обусловлены аномально высокими температурами атмосферного воздуха (в °C): 27,3 в мае, 36,2 в июне, 32,0 в июле, 35,8 в августе и 23,8 в сентябре. В камере для сбора газа во время измерений выбросов CO_2 температура повышалась на 1–2 градуса. Температура воздуха и торфяной залежи контролировалась в течение всего периода измерений вручную, а в камере – автоматически средствами ИК-газоанализатора. Высокая температура и уровень стояния грунтовых вод в картовых каналах от -0,7 до -0,8 м, а в валовом канале в период измерений – от -1,0 м и ниже, обеспечивали высокую эффективность процесса сушки торфяной залежи до воздушно-сухого состояния с характерной мелко дисперсной и пылевидной фракциями торфа.

Следует отметить, что добычу торфа осуществляли открытым послойно-поверхностным (фрезерным) способом, технологический процесс которого включает фрезерование, ворошение, валкование, уборку в штабели складирования. Фрезерование и ворошение обеспечивают контроль сушки и влагосодержания торфяной залежи. Удаление влаги осуществляется за счет отрыва капиллярной каймы при фрезеровании на глубину 11 (15) мм, как наиболее эффективную для дальнейшего высушивания до необходимых кондиций естественным образом, с помощью последующих 2–3-х кратных ворошений (Отчет о выполнении работ ..., 2020). Понижение влажности торфа обеспечивает приток кислорода и благоприятные аэробные условия, при которых активизируется деятельность бактерий и микроорганизмов; торф подвергается быстрой биологической деструкции, что обеспечивает более доступную органику, ее расщепление и высвобождение CO_2 . При избыточном увлажнении происходит резкое затухание этих процессов и, соответственно, снижение эмиссии CO_2 (Степанов, 2011; Waddington et al., 2002).

Несмотря на то что в 2024 г. также регистрировали высокий температурный фон в июне, июле, августе и сентябре (29,18; 27,92; 25,92 и 23,2 °C, соответственно), объем выбросов CO_2 снизился в 4,45 раза по сравнению с 2023 г., что было обусловлено подтоплением производственных площадей грунтовыми водами почти до уровня поверхности торфяной залежи, что в данном случае явилось определяющим фактором снижения выбросов CO_2 (табл. 2, рис. 3).

В 2022 г. площади Старобинского полигона только введены в эксплуатацию для добычи торфа, в мае некоторые участки находились еще в состоянии повышенной влажности, что не обеспечивало возможность добычи торфа в полном объеме. Кроме того, температура в мае и июне была не так высока и составляла 16 и 23 °C; в результате были получены низкие значения $C-CO_2$ (0,35 т га⁻¹; 0,38 т га⁻¹). С ростом температуры до 26 °C в июле-августе наблюдалось увеличение эмиссии от 0,74 до 1,04 т га⁻¹, соответственно. Несмотря на то, что сентябрь отмечен понижением температуры до 14 °C, эмиссия диоксида углерода была чуть ниже августовских значений с показателем 0,95 т га⁻¹ (табл. 2, рис 3.), что объясняется улучшенным состоянием производственных полей за счет снижения влажности в верхнем

горизонте хорошо прогретой за сезон торфяной залежи и влиянием факторов активизирующих газообменные процессы.

Сравнительный анализ балансовых потоков CO_2 с результатами зарубежных исследований торфяников, используемых для добычи торфа показал, что средняя совокупная эмиссия трех летних измерений потоков CO_2 в период добычи торфа (май–сентябрь) составила $3,44 \text{ т га}^{-1}$ (Беларусь), а за 2022 г. $-3,46 \text{ т га}^{-1}$; эти результаты почти идентичны данным российских ученых (эмиссия $3,3 \text{ т га}^{-1} \text{ год}^{-1}$), полученных на торфяниках Московской области за 11 лет измерений (2005–2015 гг.) (Сирин, Суворов, 2022).

Самые низкие значения эмиссии CO_2 из 3-х годовых сценариев зарегистрированы в 2024 г. в условиях высокого **уровня грунтовых вод (УГВ)** с показателем $1,26 \text{ т га}^{-1}$, которые наиболее близки и вполне согласуются с данными эстонских исследователей (2009 г.) на торфяниках Kasesoo, Puhatu, Hiiesoo с показателем эмиссии $1,74 \text{ т га}^{-1} \text{ год}^{-1}$ (Salm et al., 2012). В этот же ряд можно поставить значение выбросов C-CO_2 с канадских торфяников Ривьер-дю-Лу, провинция Квебек (2018–2020 гг.) с выбросами $\text{C-CO}_2 - 1,86 \text{ т га}^{-1} \text{ год}^{-1}$ (Clark et al., 2023), что также сопоставимо с результатом 2024 г., представленным в нашей статье.

Показатель эмиссии $2,53 \text{ т C-CO}_2 \text{ га}^{-1} \text{ год}^{-1}$ (2019, 2021–2022 гг.) отмечен на площадках в долине Дрейтон провинции Альберта (Hunter et al., 2024). Результат эмиссии $2,46 \text{ т C-CO}_2 \text{ га}^{-1} \text{ год}^{-1}$ турецких исследователей (2010–2014 гг.), полученный методом вихревых ковариаций на торфянике Ениджага (Guler et al., 2016), также согласуется с нашими данными 2022–24 гг. ($1,26-5,61 \text{ т C-CO}_2 \text{ га}^{-1} \text{ год}^{-1}$), попадая в эмиссионный интервал.

По данным канадских ученых (Waddington et al., 2002), при исследовании торфяников в провинции Квебек (1998–99 гг.) установлено, что при снижении УГВ от $-19,9$ до $-61,5$ см выбросы C-CO_2 в сухой год возросли в 4,13 раза – до $363 \text{ г м}^{-2} \text{ месяц}^{-1}$ по сравнению с влажным – $88 \text{ г м}^{-2} \text{ месяц}^{-1}$. Аналогичные результаты роста эмиссии C-CO_2 в 4,45 раза зафиксированы на белорусских полях торфодобычи при снижении УГВ от $-0,05$ до $-0,7-0,8$ м, выбросы диоксида варьировали от $1,26$ до $5,61 \text{ т га}^{-1}$.

Эмиссия CO_2 с каналов осушительной сети торфяников. Для полноты эксперимента в условиях выявления дополнительных источников выбросов ПГ в 2024 г. были проведены суточные измерения балансовых потоков климатически активных парниковых газов (CO_2 , CH_4 , N_2O) с валового канала (ЭП-16) в июне–сентябре. Установлено, что выбросы CO_2 составили $45,23$ ($20,03-86,62$) $\text{мг C-CO}_2 \text{ м}^{-2} \text{ час}^{-1}$, а метана, с учетом потенциала глобального потепления, регистрировалось $3,9$ ($0,775-10,75$) $\text{мг CO}_2\text{-экв. м}^{-2} \text{ час}^{-1}$ (рис. 4).

Результаты сопоставимы с данными латышских исследователей, полученными в безморозный период 2021 г., с показателем по CO_2 ($-4,6-83,8$) $\text{мг C-CO}_2 \text{ м}^{-2} \text{ час}^{-1}$ и CH_4 ($-2,2-12,6$) $\text{мг м}^{-2} \text{ час}^{-1}$ (Vanags-Duka et al., 2022). Российскими учеными представлены данные об эмиссии метана за семь лет исследований (2005–2011 гг.) с каналов полей торфодобычи Дубненского болотного массива с показателем $28,5$ ($0,01-150,0$) $\text{мг м}^{-2} \text{ час}^{-1}$ (Сирин и др., 2012). Данные эталонной площадки канала Старобинского полигона ниже и составляют $3,9$ ($0,775-10,75$) $\text{мг CO}_2\text{-экв. м}^{-2} \text{ час}^{-1}$, что также не противоречат российским и были выше нижней и ниже верхней границ выбросов CH_4 .

Выбросы закиси азота измерены в июне–сентябре 2024 г. с ЭП-16 валового канала. Объемы совокупных выбросов эмиссии N_2O составили $26,57 \text{ кг CO}_2\text{-экв. га}^{-1}$ с распределением по месяцам $3,52$; $13,02$; $6,87$ и $3,16 \text{ кг CO}_2\text{-экв. га}^{-1}$ в июне, июле, августе и сентябре, соответственно, а объемы средней совокупной эмиссии – $6,64 \text{ кг CO}_2\text{-экв. га}^{-1}$. Результаты согласуются с данными белорусских ученых (Бурло и др., 2016) при измерениях N_2O на заброшенных участках открытого торфа после добычи, составляющих $8,2 \text{ кг CO}_2\text{-экв. га}^{-1} \text{ год}^{-1}$, а также не противоречат результатам, полученным с каналов осушительной системы Московской области в 2022 г. с показателем $1,8 \text{ кг га}^{-1}$ (Сирин, Суворов, 2022).

Следует отметить, что публикаций, связанных с выбросами парниковых газов с каналов осушительной системы торфодобывающих полей, очень мало. Однако проблема представляет интерес для стран, активно занимающихся животноводством, где торфяники используют под пастбища, сенокосы, а каналы как места для водопоя животных. Последние публикации по этим исследованиям относятся к таким странам как Нидерланды (Hendriks et al., 2024), Англия (Peacock et al., 2021; Pickard et al., 2022), Германия (Tiemeyer et al., 2024). В рамках нашей статьи результаты, не связанные с добычей торфа, не подвергали сравнительному анализу, так как таковые не являются объектом исследований.

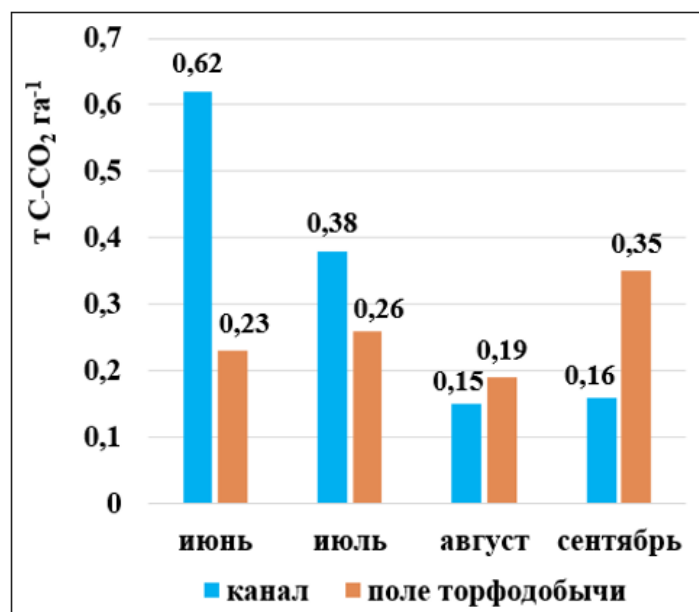


Рисунок 4. Сравнительный анализ эмиссии CO₂ за 2024 г. (с июня по сентябрь).

Сравнительный анализ эмиссии CO₂ с основной поверхности торфяника и дренажных каналов. В рамках пилотного проекта, начатого в 2024 г., были проведены синхронные исследования объемов выбросов диоксида углерода через основную поверхность торфяника и канала, находящихся в одинаковых климатических условиях – подтопления грунтовыми водами. Так как в нашей статье рассматриваются результаты, полученные в рамках только одного 2024 г., то на данном этапе не представляется возможным установить более полное влияние, учесть в полной мере многофакторность, тем более, что затопляемость грунтовыми водами для сезонной добычи торфа не является характерным состоянием потому, что, как правило, добыча в таких условиях не производится из-за низкой несущей способности торфяной залежи вследствие ее высокого влагосодержания.

Установлено, что в июне и июле с каналов регистрировались более высокие выбросы C-CO₂ (0,62 и 0,38 т га⁻¹) по сравнению с поверхностью (0,23 и 0,26 т га⁻¹); а в августе и сентябре, наоборот, выбросы с каналов ниже (0,15 и 0,16 т га⁻¹) по сравнению с поверхностью (0,19 и 0,35 т га⁻¹) (рис. 4). В целом за 4 месяца измерений в реальном режиме времени объем выбросов C-CO₂ с канала составил 1,31 т га⁻¹, что в 1,27 раз выше по сравнению с основной поверхностью торфяника с показателем 1,03 т га⁻¹.

Следует отметить, что из трех климатически активных парниковых газов (CO₂, CH₄, N₂O) эталонной площадки ЭП-16 валового канала осушительной системы торфяника значимым остается диоксид углерода с объемом 4,808 т CO_{2-экв.} га⁻¹ (97,19%), метан в общем пуле занимает 2-е место – 0,112 т CO_{2-экв.} га⁻¹ (2,26%). Значения выбросов закиси азота имели критически низкие значения и были приняты с учетом потенциала глобального потепления на уровне 0,027 т CO_{2-экв.} га⁻¹ (0,55%).

В силу того, что данные пространственно-временной динамики выбросов ПГ получены в условиях 3-х разных сценариев по температурного режиму, УГВ и состоянию торфяной залежи, построение значимых корреляционных уравнений не представляется возможным из-за недостаточного объема данных. По завершению исследований балансовых потоков ПГ каналов осушительной системы торфяников в 2025 г. результаты будут обобщены и представлены в следующих публикациях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые в Беларуси получены новые данные о выбросах C-CO₂ с поверхности торфяников. Установлено, что совокупные выбросы C-CO₂ за 3-х летний период измерений составили 10,33 т га⁻¹, в том числе за 2022 г. – 3,46 т га⁻¹, 2023 г. – 5,61 т га⁻¹, 2024 г. – 1,26 т га⁻¹, средние совокупные выбросы – 3,44 т га⁻¹. Общий объем эмиссии CO₂, CH₄, N₂O с осушительных каналов составил 4,947 т CO_{2-экв.} га⁻¹; преобладающим был диоксид углерода с показателем 4,808 т CO_{2-экв.} га⁻¹ (97,19%), метан в общем пуле занимал 2-е место – 0,112 т CO_{2-экв.} га⁻¹ (2,26%), а эмиссия закиси азота была пренебрежимо мала – 0,027 т CO_{2-экв.} га⁻¹ (0,55%).

Одними из основных факторов, влияющих на эмиссию парниковых газов, являются, на наш взгляд, температурный режим и уровень грунтовых вод. Максимум выбросов CO₂,

зарегистрированный в 2023 г., обусловлен аномально высокой средней температурой в период измерений с показателем 32,0 °C и УГВ (от -0,7 до -0,8 м) в картовых каналах, обеспечив высокую эффективность процесса сушки, запускающего механизм антропогенной эмиссии CO₂. Напротив, подтопление грунтовыми водами эталонных площадок с УГВ от -0,05 до -0,10 м и снижение средней температуры до 26,5 °C, создало анаэробные условия в 2024 г., обеспечив самые низкие CO₂ с эмиссией 1,26 т га⁻¹, что в 4,45 раза ниже показателя 2023 г.

Представленные результаты по эмиссии парниковых газов получены в условиях послойно-фрезерной добычи торфа на торфяных месторождениях Беларуси и нацелены на создание национальных коэффициентов выбросов парниковых газов с учетом генезиса торфа, специфических климатических условий и существующей практики добычи торфа в стране. В перспективе такие данные при длительных трендах могут служить основой для создания оценочных и прогностических пространственно-временных моделей эмиссии парниковых газов с торфяников Беларуси в современных условиях их антропогенного освоения.

В настоящее время по результатам данных исследований разработана технология дистанционного мониторинга выбросов парниковых газов, реализованная программным комплексом информационной поддержки, который прошел 2-ой этап опытной эксплуатации (Акт от 25.03.2025) и будет передан в Минприроды Республики Беларусь для применения в их практической деятельности.

ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Работа выполнена при финансовой поддержке Национальной академии наук Беларуси государственной программы «Научные технологии и техника» подпрограммы 6 «Исследование и использование космического пространства в мирных целях» (мероприятие 12 «Разработать технологию и программные средства мониторинга выбросов парниковых газов с торфяников Беларуси, используемых для промышленной добычи торфа, с применением данных дистанционного зондирования» (2021–2025); а также государственной программы научных исследований «Природные ресурсы и окружающая среда» подпрограммы 2 «Биоразнообразие, биоресурсы, экология» (НИР 2.15.1 «Балансовые потоки климатически активных парниковых газов (CO₂, CH₄, N₂O) с каналов осушительной системы торфяников, используемых для промышленной добычи торфа» (2024–2025).

ЛИТЕРАТУРА

Бурло А.В., Чувашова А.А., Павлюченко А.М., Лещинская Н.В., Наркевич И.П. Эмиссия закиси азота нарушенными торфяными почвами: количественная оценка и влияние факторов среды // Экологический вестник. 2016. № 1. С. 129–136.

Лактионова Е.А., Савельев В.В., Сергеева М.А. Физикохимия и биология торфа: Определение парниковых газов (CO₂, CH₄, N₂O) в торфах методом газовой хроматографии. Практикум по газохроматографическому анализу: Учебно-методическое пособие. Томск: ЦНТИ, 2011. 60 с.

Отчет о выполнении работ «Оценка воздействия на окружающую среду (ОВОС) по объекту «Добыча торфа на топливо на торфяном месторождении «Гричино-Старобинское» (северо-восточная часть) в Солигорском районе Минской области». Минск, 2020. 80 с.

Постановление Совета Министров Республики Беларусь 29 сентября 2021 г. № 553 Об установлении определяемого на национальном уровне вклада Республики Беларусь в сокращение выбросов парниковых газов до 2030 года [Электронный ресурс]. URL: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=C22100553&p1=1> (дата обращения 20.08.2025).

Распоряжение Президента Республики Беларусь от 27.03.2020 г. № 56 рп «О предоставлении земельных участков» [Электронный ресурс]. URL: <https://president.gov.by/ru/documents/category/rasporyazheniya> (дата обращения 30.09.2025).

IPCC Руководящие принципы национальных инвентаризаций парниковых газов МГЭИК. Хаяма: ИГЕС, 2006. Том 4. 756 с.

Сирин А.А., Суворов Г.Г., Чистотин М.В., Глаголев М.В. О значениях эмиссии метана из осушительных каналов // Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата. 2012. Том 3. № 2.

Сирин А.А., Суворов Г.Г. Эмиссия парниковых газов на торфоразработках в центре европейской России // Метеорология и гидрология. 2022. № 3. С. 68–80. <https://doi.org/10.52002/0130-2906-2022-3-68-80>

Степанов А.Л. Микробная трансформация парниковых газов в почвах. Москва: ГЕОС, 2011. 192 с.

Углеродные кредиты и заболачивание деградированных торфяников. Климат – Биоразнообразие – Землепользование. Теория и практика – уроки реализации пилотного проекта в Беларуси / Ф. Таннебергер и др.; под ред. Ф. Таннебергер, В. Вихтманн. Штутгарт: Научное издательство Швейцарбарт, 2011. 224 с.

Clark L., Strachan I. B., Strack M., Roulet N. T., Knorr K.-H., Teickner, H. Duration of extraction determines CO₂ and CH₄ emissions from an actively extracted peatland in eastern Quebec, Canada // Biogeosciences. 2023. Vol. 20. No. 3. P. 737–751. <https://doi.org/10.5194/bg-20-737-2023>

Drösler M. Trace gas exchange and climatic relevance of bog ecosystems, southern Germany. PhD thesis. Technischen Universität München, 2005. 182 p.

Guler A.-S., Xuhui L., Fatih E., Nusret K. Large interannual variability in net ecosystem carbon dioxide exchange of a disturbed temperate peatland // Science of the Total Environment. 2016. Vol. 554–555. P. 192–202. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.02.153>

Hendriks L., Weideveld S., Fritz C., Stepina T., Aben R.C.H., Fung N.E., Kosten S. Drainage ditches are year-round greenhouse gas hotlines in temperate peat landscapes // Freshwater Biology. 2024. Vol. 69. No. 1. P. 143–156. <https://doi.org/10.1111/fwb.14200>

Hunter M.L., Frei R.J., Strachan I.B., Strack M. Environmental and management drivers of carbon dioxide and methane emissions from actively-extracted peatlands in Alberta, Canada // Journal of Geophysical Research: Biogeosciences. 2024. Vol. 129. No. 3. e2023JG007738. <https://doi.org/10.1029/2023JG007738>

Peacock M., Audet J., Bastviken D., Futter M.N., Gauci V., Grinham A.R., Harrison J.A., Kent M.S., Kosten S., Lovelock C.E., Veraart A.J., Evans C.D. Global importance of methane emissions from drainage ditches and canals // Environmental Research Letters. 2021. Vol. 16. No. 4. P. 044010. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abeb36>

Peters J., von Unger M. Peatlands in the EU Regulatory Environment (Federal Agency for Nature Conservation, BfN), 2017. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.bfn.de/en/publications/bfn-schriften/bfn-schriften-454-peatlands-eu-regulatory-environment> (дата обращения 28.07.2025).

Pickard A.E., Branagan M., Billett M.F., Andersen R., Dinsmore K.J. Effects of peatland management on aquatic carbon concentrations and fluxes // Biogeosciences. 2022. Vol. 19. No. 5. P. 1321–1334. <https://doi.org/10.5194/bg-19-1321-2022>

Salm J.-O., Maddison M., Holm S., Soosaar K., Truu J., Mander Ü. Emissions of CO₂, CH₄ and N₂O from undisturbed, drained and mined peatlands in Estonia // Hydrobiologia. 2012. Vol. 692. P. 41–55. <https://doi.org/10.1007/s10750-011-0934-7>

Tiemeyer B., Heller S., Oehmke W., Gatersleben P., Bräuer M., Dettmann U. Effects of water management and grassland renewal on the greenhouse gas emissions from intensively used grassland on bog peat // Agricultural and Forest Meteorology. 2024. Vol. 345. P. 109858. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2023.109858>

Vanags-Duka M., Bārdule A., Butlers A., Upenieks E.-M., Lazdiņš A., Purviņa D., Līcīte I. GHG Emissions from Drainage Ditches in Peat Extraction Sites and Peatland Forests in Hemiboreal Latvia // Land. 2022. Vol. 11. No. 12. P. 2233. <https://doi.org/10.3390/land11122233>

Waddington J.M., Warner K.D., Kennedy G.W. Cutover peatlands: A persistent source of atmospheric CO₂ // Global Biogeochemical Cycles. 2002. Vol. 16. No. 1. P. 1–7. <https://doi.org/10.1029/2001GB001398>

Поступила в редакцию 02.08.2025

Принята 31.10.2025

Опубликована 04.11.2025

Сведения об авторах:

Ничипорович Зинаида Адамовна – кандидат технических наук, заведующая лабораторией инструментальной диагностики природных систем и объектов Государственного научно-производственного объединения «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по биоресурсам» (г. Минск, Республика Беларусь); nichiporovich_z@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0009-9393-8383>

Заневская Людмила Александровна – научный сотрудник лаборатории инструментальной диагностики природных систем и объектов Государственного научно-производственного объединения «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по биоресурсам» (г. Минск, Республика Беларусь); ludmila-bel@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0002-0978-2638>

Гаврилюк Леонид Николаевич – младший научный сотрудник лаборатории инструментальной диагностики природных систем и объектов Государственного научно-производственного объединения

«Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по биоресурсам» (г. Минск, Республика Беларусь); rett14301@gmail.com

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.



Статья доступна по лицензии [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Balance greenhouse gas fluxes from the Belarus peat deposits used for industrial peat extraction

© 2025 Z. A. Nichiporovich , L. A. Zanevskaya , L. N. Gavrilyuk

State Scientific and Production Association "Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Bioresources", Akademicheskaya st., 27, Minsk, Republic of Belarus. E-mail: nichiporovich_z@mail.ru

The aim of the study was to assess the spatiotemporal dynamics of climatically active greenhouse gases (CO_2 , CH_4 , N_2O) from the Belarus peat deposits used for industrial peat extraction and to obtain new greenhouse gas emission coefficients, as well as to clarify and update the country's contribution in global anthropogenic emission of peatlands.

Location and time of the study. The research was carried out in the peat extraction fields (May–September, 2022–2024) and from the drainage system channels (June–September, 2024) of the Grichino–Starobinsky peat deposit in the Soligorsky district of the Minsk region.

Methods. The IR spectroscopy method was used for daily instrumental measurements of C- CO_2 emissions from peat-producing sites using a LI-COR LI-820 gas analyzer. The static camera method was used to record balanced fluxes of CO_2 , CH_4 , and N_2O from the channels of the drainage system in real time. In-house processing of the results of field measurements of CO_2 , CH_4 , N_2O was carried out on using the software from Campbell Sscienti (Australia) and the Chromatek-Kristall 5000.2 gas chromatograph (Russia).

Results. For the first time in Belarus, new data on CO_2 emissions from industrial peat extraction sites were obtained. It was found that the cumulative specific CO_2 emissions over the 3-year measurement period amounted to $10,33 \text{ t C-CO}_2 \text{ ha}^{-1}$, including $3,46 \text{ t C-CO}_2 \text{ ha}^{-1}$ in 2022, $5,61 \text{ t C-CO}_2 \text{ ha}^{-1}$ in 2023, $1,26 \text{ t C-CO}_2 \text{ ha}^{-1}$ in 2024, and average cumulative emissions of $3,44 \text{ t C-CO}_2 \text{ ha}^{-1}$. The total CO_2 , CH_4 , and N_2O emissions from the drainage channels amounted to $4,947 \text{ t CO}_{2\text{-eq.}} \text{ ha}^{-1}$, with carbon dioxide predominating with an index of $4,808 \text{ t CO}_{2\text{-eq.}} \text{ ha}^{-1}$ (97,19%). Methane ranked second with $0,112 \text{ t CO}_{2\text{-eq.}} \text{ ha}^{-1}$ (2,26%), and nitrous oxide emissions of $0,027 \text{ t CO}_{2\text{-eq.}} \text{ ha}^{-1}$ (0,55%) were negligible.

The main factors influencing green house gas emissions are the temperature regime and the ground water level (GWL) level. The maximum CO_2 emissions recorded in 2023 were caused by an abnormally high average temperature during the measurement period with an index of $32,0^\circ \text{C}$ and GWL ranging from $-0,7$ to $-0,8 \text{ m}$ in the cart channels, ensuring high efficiency of the drying process, triggering the mechanism of anthropogenic CO_2 emissions. On the contrary, in 2024 the groundwater flooding of reference sites with GWL ranging from $-0,05$ to $-0,10 \text{ m}$, accompanied by a decrease in the average temperature to $26,5^\circ \text{C}$, under the resulting anaerobic conditions showed the lowest CO_2 emissions of $1,26 \text{ t C-CO}_2 \text{ ha}^{-1}$, i.e. 4,45 times lower than in 2023.

Conclusions. The presented results about CO_2 emissions were obtained under conditions of layer-by-layer milling of peat in peat deposits in Belarus and can contribute in developing national GHG emission coefficients, taking into account peat genesis, specific climatic conditions and the existing practice of peat extraction in the country. In the future, such data can serve as a basis for developing estimated and predictive spatial and temporal models of greenhouse gas emissions from Belarus peatlands under contemporary conditions of their anthropogenic development. Based on the research results, a technology for remote monitoring of greenhouse gas emissions was developed, implemented by the information support software package, which passed the 2nd stage of operation testing and will be transferred to the Ministry of Natural Resources of the Republic of Belarus for use in their practical activities.

Keywords: peat extraction; drainage channels; greenhouse gases (CO_2 , CH_4 , N_2O); IR-spectroscopy; gas chromatography.

How to cite: Nichiporovich Z.A., Zanevskaya L.A., Gavrilyuk L.N. Balance greenhouse gas fluxes from the Belarus peat deposits used for industrial peat extraction. The Journal of Soils and Environment. 2025. 8(4). e324. DOI: [10.31251/pos.v8i4.324](https://doi.org/10.31251/pos.v8i4.324) (in Russian with English abstract).

FUNDING

The work was carried out with the financial support of the National Academy of Sciences of Belarus from the state program "High-tech technologies and equipment", subprogram 6 "Exploration and use of outer space for peaceful purposes", event 12 "To develop technology and software too tls for monitoring greenhouse

gas emissions from peat bogs in Belarus used for industrial peat extraction using remote sensing data" (2021–2025); as well as by the state scientific research program "Natural Resources and the environment", subprogram 2 "Biodiversity, bioresources, ecology" (Research 2.15.1 "Balanced flows of climatically active greenhouse gases (CO₂, CH₄, N₂O) from channels of the drainage system of peat bogs used for industrial peat extraction" (2024–2025).

REFERENCES

- Burlo A.V., Chuvashova A.A., Pavluchenko A.M., Liashchynskaya N.V., Narkevitch I. P. Emission of nitrous oxide from disturbed peat soils: quantitative assessment and influence of environmental factors. *Ecological Bulletin*. 2016. No. 1. P. 129–136. (in Russian).
- Laktionova E.A., Savelyev V.V., Sergeeva M.A. Physical chemistry and biology of peat: Determination of greenhouse gases (CO₂, CH₄, N₂O) in peat by gas chromatography. Workshop on gas chromatographic analysis: A teaching aid. Tomsk: STIC, 2011. 60 p. (in Russian).
- Environmental Impact Assessment (EIA) report on the Peat Extraction for Fuel facility at the Grichino-Starobinskoye peat deposit (northeastern part) in the Soligorsk district of the Minsk Region. Minsk, 2020. 80 p. (in Russian).
- Resolution of the Council of Ministers of the Republic of Belarus No. 553 on 29 September 2021 On Establishing the Nationally Determined Contribution of the Republic of Belarus to Reducing Greenhouse Gas Emissions by 2030 [Electronic resource]. URL: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=C22100553&p1=1> (accessed on 20.08.2025). (in Russian).
- Decree of the President of the Republic of Belarus dated 03.2.2020 No. 56 rp "On the provision of land plots" [Electronic resource]. URL: <https://president.gov.by/ru/documents/category/rasporyazheniya> (accessed on 30.09.2025). (in Russian).
- IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Hayama: IGES, 2006. Vol. 4. 756 p. (in Russian).
- Sirin A.A., Suvorov G.G., Chistotin M.V., Glagolev M.V. Values of methane emission from drainage ditches. *Environmental Dynamics and Global Climate Change*. 2012. Vol. 3. No. 2. (in Russian).
- Sirin A., Suvorov G. Greenhouse Gas Emissions from Peat Extraction in the Center of the European Part of Russia. *Russian Meteorology and Hydrology*. 2022. Vol. 47. No. 3. P. 207–216. <https://doi.org/10.3103/S1068373922030062>
- Stepanov A.L. Microbial transformation of greenhouse gases in soils. Moscow: GEOS, 2011. 192 p. (in Russian)
- Carbon credits from peatland rewetting. Climate – Biodiversity – Land use. Science, policy, implementation and recommendations of a pilot project in Belarus / F. Tanneberger et al.; F. Tanneberger, W. Wichtmann (eds.). Stuttgart: Schweizerbart Science Publ., 2011. 224 p. (in Russian).
- Clark L., Strachan I. B., Strack M., Roulet N. T., Knorr K.-H., Teickner, H. Duration of extraction determines CO₂ and CH₄ emissions from an actively extracted peatland in eastern Quebec, Canada. *Biogeosciences*. 2023. Vol. 20. No. 3. P. 737–751. <https://doi.org/10.5194/bg-20-737-2023>
- Drösler M. Trace gas exchange and climatic relevance of bog ecosystems, southern Germany. PhD thesis. Technischen Universität München, 2005. 182 p.
- Guler A.-S., Xuhui L., Fatih E., Nusret K. Large interannual variability in net ecosystem carbon dioxide exchange of a disturbed temperate peatland. *Science of the Total Environment*. 2016. Vol. 554–555. P. 192–202. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.02.153>
- Hendriks L., Weideveld S., Fritz C., Stepina T., Aben R.C.H., Fung N.E., Kosten S. Drainage ditches are year-round greenhouse gas hotlines in temperate peat landscapes. *Freshwater Biology*. 2024. Vol. 69. No. 1. P. 143–156. <https://doi.org/10.1111/fwb.14200>
- Hunter M.L., Frei R.J., Strachan I.B., Strack M. Environmental and management drivers of carbon dioxide and methane emissions from actively-extracted peatlands in Alberta, Canada. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*. 2024. Vol. 129. No. 3. e2023JG007738. <https://doi.org/10.1029/2023JG007738>
- Peacock M., Audet J., Bastviken D., Futter M.N., Gauci V., Grinham A.R., Harrison J.A., Kent M.S., Kosten S., Lovelock C.E., Veraart A.J., Evans C.D. Global importance of methane emissions from drainage ditches and canals. *Environmental Research Letters*. 2021. Vol. 16. No. 4. P. 044010. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abeb36>
- Peters J., von Unger M. Peatlands in the EU Regulatory Environment (Federal Agency for Nature Conservation, BfN), 2017. [Electronic resource]. URL: <https://www.bfn.de/en/publications/bfn-schriften/bfn-schriften-454-peatlands-eu-regulatory-environment> (accessed on 28.07.2025).
- Pickard A.E., Branagan M., Billett M.F., Andersen R., Dinsmore K.J. Effects of peatland management on aquatic carbon concentrations and fluxes. *Biogeosciences*. 2022. Vol. 19. No. 5. P. 1321–1334. <https://doi.org/10.5194/bg-19-1321-2022>

Salm J.-O., Maddison M., Holm S., Soosaar K., Truu J., Mander Ü. Emissions of CO₂, CH₄ and N₂O from undisturbed, drained and mined peatlands in Estonia. *Hydrobiologia*. 2012. Vol. 692. P. 41–55. <https://doi.org/10.1007/s10750-011-0934-7>

Tiemeyer B., Heller S., Oehmke W., Gatersleben P., Bräuer M., Dettmann U. Effects of water management and grassland renewal on the greenhouse gas emissions from intensively used grassland on bog peat. *Agricultural and Forest Meteorology*. 2024. Vol. 345. P. 109858. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2023.109858>

Vanags-Duka M., Bārdule A., Butlers A., Upenieks E.-M., Lazdiņš A., Purviņa D., Līcīte I. GHG Emissions from Drainage Ditches in Peat Extraction Sites and Peatland Forests in Hemiboreal Latvia. *Land*. 2022. Vol. 11. No. 12. P. 2233. <https://doi.org/10.3390/land11122233>

Waddington J.M., Warner K.D., Kennedy G.W. Cutover peatlands: A persistent source of atmospheric CO₂. *Global Biogeochemical Cycles*. 2002. Vol. 16. No. 1. P. 1–7. <https://doi.org/10.1029/2001GB001398>

Received 02 August 2025

Accepted 31 October 2025

Published 04 November 2025

About the authors:

Zinaida A. Nichiporovich – Candidate of Technical Sciences, Head of the Laboratory of Instrumental Diagnostics of Natural Systems and Objects in the State Scientific and Production Association "Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Bioresources" (Minsk, Republic of Belarus); nichiporovich_z@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0009-9393-8383>

Liudmila A. Zanevskaya – Researcher of the Laboratory of Instrumental Diagnostics of Natural Systems and Objects in the State Scientific and Production Association "Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Bioresources" (Minsk, Republic of Belarus); ludmila-bel@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0002-0978-2638>

Leonid N. Gavrilyuk – Junior Research Assistant of the Laboratory of Instrumental Diagnostics of Natural Systems and Objects in the State Scientific and Production Association "Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Bioresources" (Minsk, Republic of Belarus); rett14301@gmail.com

The authors read and approved the final manuscript



The article is available under [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)