

**А. В. Бурло¹, А. А. Чувашова¹, А. М. Павлюченко¹,
Н. В. Лещинская¹, И. П. Наркевич²**

¹ Государственное научно-производственное объединение «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по биоресурсам», г. Минск, Республика Беларусь

²Международный государственный экологический институт имени А. Д. Сахарова Белорусского государственного университета, г. Минск, Республика Беларусь

ЭМИССИЯ ЗАКИСИ АЗОТА НАРУШЕННЫМИ ТОРФЯНЫМИ ПОЧВАМИ: КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА И ВЛИЯНИЕ ФАКТОРОВ СРЕДЫ

В статье представлены результаты двухлетнего мониторинга потоков закиси азота с нарушенных торфяных почв различного типа землепользования. В рамках исследования были выявлены тенденции возникновения высоких выбросов закиси азота после выпадения атмосферных осадков или при температурах среды близких к 0 °С. Среднегодовой уровень грунтовых вод и годовая сумма атмосферных осадков являлись основными факторами, которые определяют годовую эмиссию закиси азота на нарушенных торфяных почвах.

➤ **Ключевые слова:** эмиссия закиси азота, денитрификация, торфяные почвы, нарушенные торфяники, уровень грунтовых вод, атмосферные осадки.

Введение

В пятом оценочном докладе Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) утверждается с 95-процентной достоверностью, что более половины наблюдаемого повышения средней глобальной приземной температуры в 1951–2010 гг. обусловлено увеличением концентраций парниковых газов и другими антропогенными воздействиями [2]. Закись азота (N₂O) относят к одному из основных парниковых газов. Несмотря на то, что вклад этого газа составляет лишь около 6% (доля диоксида углерода – 63%, метана – 18%) в антропогенный парниковый эффект, N₂O обладает очень высоким потенциалом воздействия на климатическую систему относительно единицы массы или одной молекулы (в 265 раз выше, чем воздействие одной молекулы CO₂ за 100 летний период) [1], поэтому даже незначительное увеличение концентрации этого газа приведет к существенному воздействию на климатическую систему. Кроме того, N₂O считается одним из основных разрушителей стратосферного озонового слоя [2].

Важной особенностью N₂O является его преимущественно биологическое происхождение. Основным источником N₂O является почва, где в результате разнообразных процессов микробной трансформации соединений азота (денитрификации, автотрофной и гетеротрофной нитрификации, процессов взаимодействия нитритов с аминокислотами, хемоденитрификации и др. [4]) происходит образование N₂O.

В 2012 году общая эмиссия N₂O в Республике Беларусь составила 16 399,8 тыс. т. CO₂-экв. (1 т. (N₂O) = 265 т. (CO₂-экв.) для периода 100 лет), составив 18,4% от суммарных выбросов парниковых газов. Основными источниками N₂O в Республике Беларусь являются сельскохозяйственные почвы и системы хранения и распределения навоза в сельском хозяйстве, которые покрывают 97,5% всех национальных выбросов N₂O [8].

Дополнительно известно, что эмиссия N₂O из почв, богатых органическим веществом (ОВ), в частности торфяников, в 4 раза выше, чем из почв с низким содержанием ОВ [2]. Как правило, эмиссии N₂O из естественных насыщенных водой торфяников незначительны, в то время как осушение и культивирование торфяных почв приводит к минерализации азотсодержащих органических соединений и деградации торфа, что способствует образованию N₂O [4].

В Республике Беларусь суммарная площадь торфяников и оторфованных земель составляет порядка 2,929 млн. га или 14,2% от всей территории, из которых около 1,5 млн. га осушено для использования в сельском и лесном хозяйстве, добычи торфа. В сельском хозяйстве используется 1068,2 тыс. га осушенных земель с торфяными почвами, из которых около 96% составляют земли с торфяными почвами низинного типа и 4% – земли с торфяными почвами верхового и переходного типов [5]. Из указанных данных следует, что именно осушенные сельскохозяйственные торфяники низинного типа будут являться одним из ключевых источников N₂O в условиях Республики Беларусь, и поэтому их точная количественная оценка представляет наибольший интерес.

В Республике Беларусь расчет эмиссии N_2O с поверхности торфяников производится согласно ТКП 17.09-02-2011 (02120), где принимается, что 1 га осушенных низинных торфяных месторождений выделяет порядка 8,9 кг(N_2O)/год и порядка 1,8 кг(N_2O)/год с разрабатываемых и выработанных низинных торфяных месторождений [7]. В то же время, в «Дополнение 2013 г. к Руководящим принципам МГЭИК национальных кадастров парниковых газов, 2006: водно-болотные угодья» представлена более подробная классификация осушенных торфяных почв и соответствующие им значения выделения N_2O . Согласно данным МГЭИК выделения N_2O с поверхности осушенных органических почв (торфяников) низинного типа в условиях умеренного климата составляет: 47,6 кг(N_2O)/га·г – пахотные земли; 30 кг(N_2O)/га·г – глубоко осушенные луга и пастбища; 5,9 кг(N_2O)/га·г – неглубоко осушенные луга и пастбища; 10,3 кг(N_2O)/га·г – осушенные лесные торфяники; 1,1 кг(N_2O)/га·г – разрабатываемые торфяные месторождения (тип торфа не указан). Таким образом, очевидно несоответствие оценок эмиссии N_2O с осушенных торфяников в указанных документах, что указывает на необходимость проведения дальнейших исследований в этой области [2].

Целью данной работы является:

- оценить эмиссию N_2O с торфяных почв в условиях Республики Беларусь;
- определить основные факторы среды, влияющие на потоки N_2O ;
- разработать рекомендации по оценке эмиссии N_2O с торфяников.

Объекты и методы исследования

В качестве объекта исследования было выбрано восемь полевых опытных площадок, установленных на низинных торфяниках с различными типами землепользования и растительным покровом, уровнем залегания грунтовых вод (УГВ), мощностью торфяного слоя, содержанием углерода и азота в торфе. Предметом исследования являлась количественная оценка потоков эмиссии (в некоторых случаях поглощения) N_2O с поверхности исследуемых полевых площадок. Полевые площадки располагались на четырех торфяных месторождениях, три из которых находятся в осушенном состоянии и одно месторождение в состоянии, близком к естественному. Площадки располагались на следующих торфяных месторождениях:

1. Низинное осоковое болото (ОБ). Расположено вблизи д. Здитово Березовского р-на Брестской обл. В 60-ых годах прошлого века через торфяник были прорыты мелиоративные каналы (глубиной 0,5 м), которые на сегодняшний день заросли болотной растительностью и илом, и, по-видимому, уже не выполняют своей дренажной функции. Примерно до 2000-ых годов исследуемый участок использовался местным населением в качестве сенокосных угодий. На сегодняшний день исследуемый участок болотной экосистемы более не используется в хозяйственных целях и находится в состоянии, близком к естественному. На данном торфяном месторождении была установлена опытная площадка – «ОБ» (координаты: 52°25.239' с.ш.; 25°16.220' в.д.).

2. Выработанное (В) торфяное месторождение низинного типа. Расположено вблизи д. Бартевича Воложинского р-на Минской обл. В 1990 году исследуемый участок был осушен, и затем с 1992 г. до 1995 г. на нем проводилась промышленная добыча торфа. В 2007 г большая часть торфяного месторождения была повторно обводнена. Исследование эмиссии N_2O проводилось на участке, который остался в осушенном состоянии (координаты :54°05.896' с.ш.; 26°17.528' в.д), то есть в условиях, близких к разрабатываемым и выработанным торфяным месторождениям. На данном участке были установлены три опытные площадки: «В1», «В2» и «В3».

3. Осушенный сельскохозяйственный (С) торфяник низинного типа. Торфяник расположен вблизи д. Мастыки Березовского р-на, Брестской обл. Осушен в 1975 г. и затем активно использовался в сельском хозяйстве в качестве пахотных или сенокосных угодий. На исследуемом участке (координаты: 52°23.316' с.ш.; 25°09.930' в.д.) были установлены три опытные площадки: «С1» – используется в качестве пашни, участки «С2» и «С3» используются как сенокосные угодья.

4. Заброшенные сельскохозяйственные (ЗС) угодья на осушенном торфянике низинного типа. Торфяник расположен вблизи д. Выгонощи Ивацевичского р-на Брестской обл. Осушен в 1970-ых годах. Установлена одна опытная площадка – «ЗС» (координаты: 52°38.019' с.ш.; 25°49.476' в.д.). Данный участок ранее использовался как пашня, однако около десяти последних лет не культивировался и на сегодняшний день зарос крапивой (*Urtica dioica*), что типично для заброшенных сельхоз земель. Дополнительно характеристики опытных площадок представлены в табл. 1.

Измерения потоков N_2O с поверхности торфяной почвы проводилось с помощью метода закрытых «эмиссионных камер» [3]. Камера представляет собой герметичный сосуд (например, куб), одна из сторон которого открыта (то есть отсутствует). Открытой стороной камера устанавливалась на поверхность почвы, таким образом, что поток газа из почвы попадает во внутреннее пространство

камеры. В результате концентрация газа внутри камеры увеличивается. Далее, по скорости изменения концентрации рассчитывается поток газа с участка торфяной почвы, накрытого камерой [3].

Таблица 1

Характеристики опытных площадок

Тип	пл.	С	N	УГВ	МТ	Состав растительного покрова
Осоковое болото	ОБ1	36,2	2,8	-8	130	<i>Carex nigra</i> , <i>Carex rostrata</i> , <i>Calamagrostis canescens</i> , <i>Potentilla palustris</i>
	ОБ2	37,1	2,7	-9	130	<i>Carex nigra</i> , <i>Carex rostrata</i> , <i>Calamagrostis canescens</i> , <i>Potentilla palustris</i>
Заброшенная торфодобыча	В1	45,2	2,5	-31	119	Открытый торф и <i>Pinus sylvestris</i>
	В2	44,6	2,5	-34	119	Открытый торф с <i>Potentilla norvegica</i> и <i>Poa trivialis</i>
	В3	44,3	2,6	-43	126	Открытый торф без растительности.
С-х. угодья (пашня)	С1	26,2	1,8	-59	49	В различные периоды: <i>Triticum aestivum</i> , <i>Solanum tuberosum</i> , без растительности
С-х. угодья (сенокос)	С2	20,5	1,5	-54	45	<i>Phleum pratense</i> , <i>Stellaria graminea</i> , <i>Sonchus arvensis</i>
	С3	27,3	2,0	-67	57	<i>Phleum pratense</i> , <i>Cirsium arvense</i> , <i>Potentilla anserina</i> , <i>Poa pratensis</i>
Заброшенные с-х. угодья	ЗС	23,9	1,8	-89	170	<i>Urtica dioica</i> и <i>Elytrigia repens</i>

Примечание: пл. – название площадки; С – доля углерода в абсолютно сухом массе верхнего слоя торфа (%); N – доля азота в абсолютно сухой массе верхнего слоя торфа (%); УГВ – среднегодовой уровень грунтовых вод; (см); МТ – мощность торфяной залежи (см)

Измерение концентрации N₂O внутри камеры проводилось с помощью отбора небольших проб воздуха (60 мл) через равные промежутки времени (от 7 до 15 минут). Концентрация N₂O в образцах определялась на газовом хроматографе «Хроматек Кристалл 5000.2» с пламенным ионизационным детектором (ПИД). Расчет потока N₂O из почвы определялся с использованием программного пакета «Flux» открытой программной среды R.

Измерения потоков N₂O на опытных площадках проводились в трехкратной повторности. Для этого на каждой из площадок выбиралось три квадратных участка (70×70 см) торфяной почвы, с поверхности которых одновременно измеряли выделение N₂O. На каждый участок в почву на глубину около 15 см вкапывалась пластиковая рамка, то есть по три рамки на площадку. Рамка служила основанием для камеры во время измерения, обеспечивая герметичность системы почва-камера.

Исследования потоков N₂O с торфяников выполнялись в период с июля 2010 г. по август 2012 г., кроме площадки ЗС, где измерения выполнялись с апреля 2012 г. по апрель 2013 г. Периодичность проведения измерений составляла 1–3 недели в летний период (апрель-октябрь) и один раз в месяц в зимний (ноябрь-март). Проведение полевых измерений включало в себя одновременное измерение потоков N₂O с трех участков на каждой из площадок, измерение УГВ, температуры воздуха и почвы на глубинах 5, 10 и 20 см. Более подробно устройство камер, методика расчета потоков и протокол проведения эксперимента описаны в работе [3].

Результаты и их обсуждение

Продолжительность исследования потоков N₂O составила около двух лет на всех площадках, кроме площадки «ЗС» (один год), что позволяет проследить и количественно оценить сезонную, годовую и межгодовую динамику потоков эмиссии N₂O. За период исследования на всех площадках суммарно было проведено 1011 единичных измерений потоков N₂O с торфяной почвы, из которых в 67 измерениях наблюдалась абсорбция N₂O торфяной почвой (поток от -0,14 до -0,05 мг/м²ч), 569 измерений показали поток близкий к нулю (от -0,05 до 0,05 мг/м²ч), и 375 измерений показали выделение N₂O (от 0,05 до 2,76 мг/м²ч). В среднем на каждой из площадок за два года было выполнено 118 измерений, кроме площадки «ЗС» (62 измерений).

Распределение измеренных потоков N₂O по площадкам представлено в виде диаграмм размаха на рис. 1. Как видно на диаграмме, наиболее высокие выделения N₂O (площадки, где медианное значение потока выше нулевого), наблюдались на площадках «С3» и «ЗС», и в меньшей степени на площадках «С1» и «С2». На площадках, установленных на выработанном торфянике и на естественном осоковом болоте, медианные значения измеренных потоков были близки к нулю.

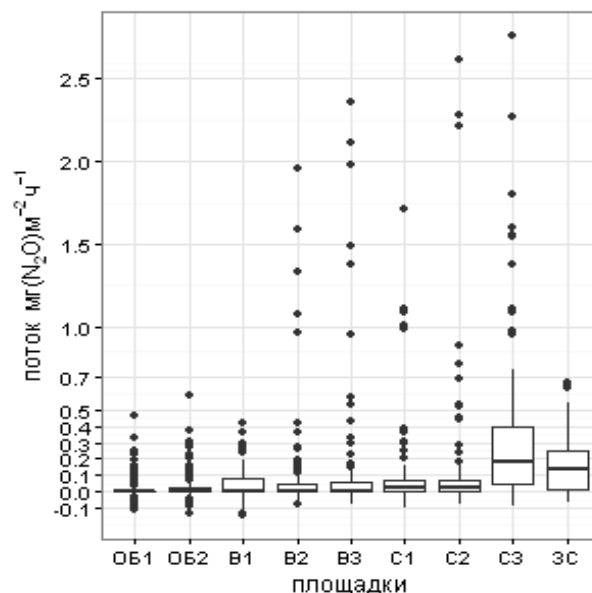


Рисунок 1 – Диаграмма размаха измеренных потоков N_2O , на каждой из опытных площадок, где указаны медиана, нижний и верхний квартили, 1,5-межквартильного размаха и отдельные выбросы

Особый интерес в данном исследовании представляли те единичные измерения, в которых фиксировались потоки N_2O , значительно превышающие значения межквартильного размаха. Эмиссия N_2O с торфяных почв обладает очень высокой временной изменчивостью, поэтому в научной литературе измеренные потоки N_2O разделяют на две категории: 1. «фоновые эмиссии» – небольшие выделения N_2O , которые наблюдаются на протяжении всего года и обладают тенденцией возрастать в теплый период в связи ростом температуры почвы; 2. «эпизодические эмиссии» – высокие выделения N_2O , которые возникают на короткий период времени (от нескольких часов до нескольких дней) и, как правило, вызваны действием различных временных экологических факторов либо явлений [1]. В научной литературе описаны случаи, когда эпизодические потоки N_2O составляли до 80% от всей годовой эмиссии N_2O с исследуемого участка.

Разница между фоновыми и эпизодическими потоками хорошо видна на графике временной динамики потоков N_2O (рис. 2). Наибольшее количество случаев эпизодической эмиссии наблюдалось на осушенном сельскохозяйственном торфянике (площадки «С1», «С2» и «С3»). На выработанном торфянике (площадки «В1», «В2» и «В3») эпизодическая эмиссия была измерена лишь дважды в августе 2010 г. и июле 2011 г. На естественном осоковом болоте (площадки «ОБ1» и «ОБ2») также присутствуют эпизодические пиковые эмиссии N_2O , однако, максимальная эмиссия на этих площадках была на порядок меньше чем на сельскохозяйственном и выработанном торфяниках.

В нашем исследовании мы попытались проанализировать возникновение пиковых эпизодических эмиссий, и определить факторы среды, которые могли быть причиной их возникновения и в дальнейшем служить для предсказания возникновения пиковых потоков N_2O и их значений. С этой целью была составлена корреляционная матрица, которая включала в качестве зависимой переменной потоки N_2O , которые были выше верхнего квартиля на каждой из площадок, а в качестве независимых переменных – следующие факторы внешней среды: температура почвы, температура воздуха, значение уровня грунтовых вод, содержание азота в верхнем слое торфяной почвы, количество выпавших атмосферных осадков в день проведения измерений потоков N_2O , суммарное количество осадков, выпавших за предыдущие три дня, значения уровня грунтовых вод, максимальное колебание УГВ за предыдущие три дня.

Применение корреляционного анализа (коэффициент корреляции Спирмена) показало наличие статистически значимой связи между потоком N_2O с большинством из указанных факторов, однако полученные коэффициенты корреляции были низкими (наиболее высокий коэффициент корреляции $R = 0,27$, $p < 0,003$ для пары «поток N_2O – колебание УГВ»). Множественная регрессионная модель, которая включала только переменные со статистически значимыми коэффициентами ($p < 0,05$, в нашем случае такими являлись: содержание азота в торфе, сумма осадков за три дня до измерения потоков, колебание УГВ), также была статистически значима, но с низким значением коэффициента детерминации ($R^2 = 0,24$). В дальнейшем мы не использовали множественную модель для предсказания эпизодических пиковых потоков и расчета годовой эмиссии N_2O .

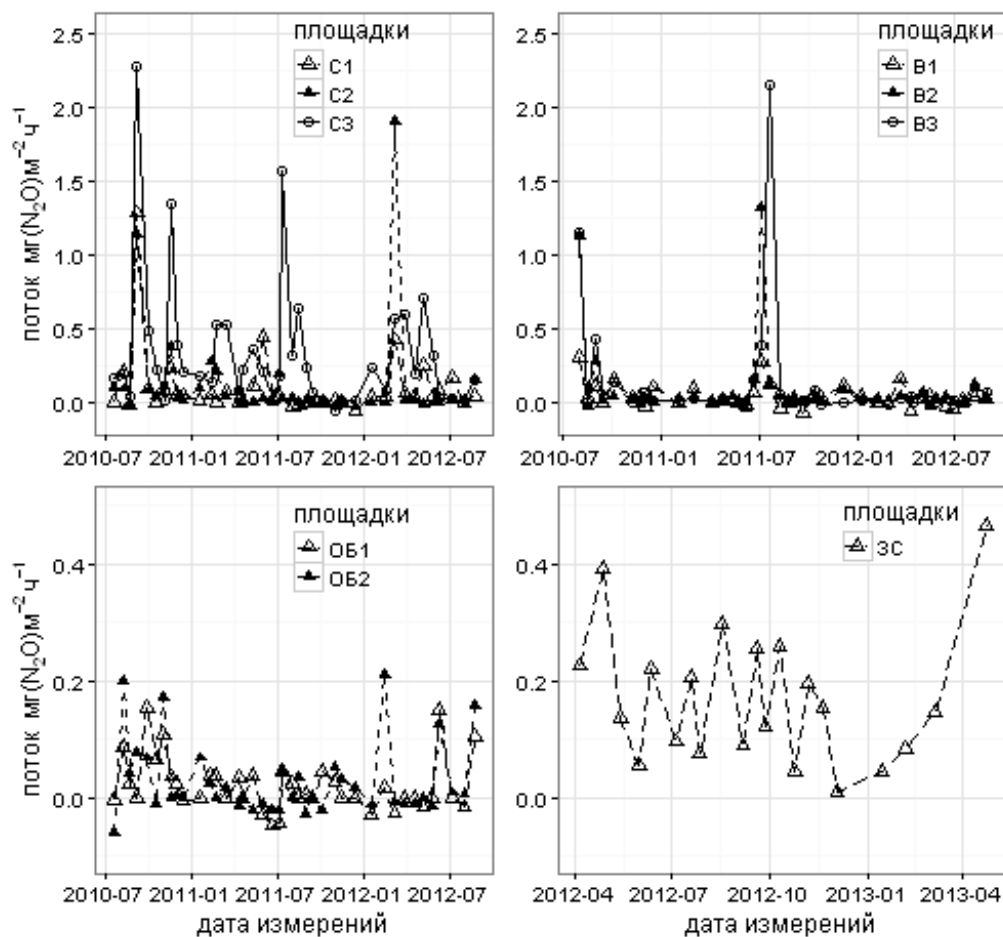


Рисунок 2 – Динамика выделения N_2O с опытных площадок за период исследования. Точкой указан средний поток с площадки во время измерительной кампании

Тем не менее, некоторые тенденции в возникновении пиковых эпизодических эмиссий были обнаружены. В частности, наблюдалось возникновение пиковых эпизодических потоков N_2O после резких возрастаний УГВ (порядка 20–30 см в течение 1–2 дней) в теплый период года. Такие скачки УГВ совпадали с периодами сильных атмосферных осадков (корреляция между резким возрастанием УГВ и атмосферными осадками $R^2 = 0,36$, $p < 0,01$), что в свою очередь, очевидно, сопровождалось заполнением почвенных пор водой, увеличению влажности почвы и сокращению доступности кислорода для почвенных микроорганизмов. В сочетании с положительной температурой и высокой влажностью в почвенном профиле формировались оптимальные условия для протекания процесса денитрификации, что вызывало резкий рост эмиссии N_2O из почвы. В нашем эксперименте УГВ непрерывно измерялся автоматическими датчиками на всех площадках, в то время как датчики количества осадков устанавливались на метеорологических станциях, удаленных от опытных площадок на расстоянии до 5–7 км. Вероятно, количество осадков на площадках и метеостанции отличалось и не совпадало по времени, что и обусловило более сильную корреляцию между потоком N_2O и колебаниями УГВ на площадках, чем потоком N_2O и количеством атмосферных осадков на метеостанции.

Еще одна тенденция возникновения пиковых эмиссий была связана с температурным режимом. Были установлены два температурных режима, при которых возникали высокие выделения N_2O . Во-первых, выше описанный эффект воздействия атмосферных осадков (резких повышений УГВ) наблюдался при температурах в диапазоне от 14 °C до 25 °C. Во-вторых, еще один пик эмиссии N_2O наблюдался при температурах воздуха и почвы близких к 0 °C. Несмотря на то, что это явление часто встречается в подобных исследованиях, биогеохимический механизм его еще не достаточно изучен. Считается, что одной из причин является активация денитрифицирующих микроорганизмов во время цикла заморзания-оттаивания почвы [1].

Для расчета годовой эмиссии N_2O необходимо было оценить поток N_2O для каждой из площадок в период между измерительными кампаниями. Так как сильной корреляции между эмиссией N_2O и факторами среды, которые непрерывно измерялись на площадках или метеостанциях, установлено не было, для расчета годовой модели мы использовали линейную интерполяцию между измеритель-

ными кампаниями. Для каждой измерительной кампании рассчитывался средний поток N₂O с площадки, и затем промежуточные потоки N₂O между кампаниями рассчитывались с помощью линейной функции, которая соединяет значения потока на соответствующем временном интервале. Шаг данной модели – одни сутки. Полученные линейные модели эмиссии N₂O представлены на рис. 2. Следует отметить, что применение линейной интерполяции при расчете годовых или сезонных моделей выделения N₂O из почв является общепринятым для такого рода исследований [1]

Годовая эмиссия N₂O рассчитывалась как сумма суточных эмиссий за период 365 дней. Так как измерения потоков N₂O продолжались более двух лет (кроме пл. «ЗД» – один год), мы рассчитали для каждого года с каждой площадки суммарную эмиссию N₂O, также были рассчитаны среднегодовые и медианные значения температуры почвы и воздуха, УГВ, и годовая сумма атмосферных осадков (табл. 2).

Таблица 2

Оценка годовой эмиссий N₂O и факторов среды для каждой площадки

Площадки:		ОБ1	ОБ2	В1	В2	В3	С1	С2	С3	ЗС
Первый год	N ₂ O, кг/га·г	1,5	1,2	4,3	8,7	15,5	11,4	11,3	35,4	—
	УГВ, м	0,06	0,06	-0,31	-0,34	-0,41	-0,58	-0,44	-0,71	—
	Температура, °C	9,2	9,2	8,6	8,6	8,7	9,1	9	9,3	—
	Осадки, мм	813	813	802	802	802	813	813	813	—
Второй год	N ₂ O, кг/га·г	0,5	1,1	0,4	1,8	0,9	5,1	8,4	21,3	8,9
	УГВ, м	-0,24	-0,24	-0,32	-0,35	-0,43	-0,66	-0,57	-0,84	-1,05
	Температура, °C	8,6	8,6	8,2	8,1	8,2	8,8	9	8,9	8,7
	Осадки, мм	518	518	650	650	650	518	518	518	585
Средне-годовой	N ₂ O, кг/га·г	1,0	1,15	2,35	5,25	8,2	8,25	9,85	28,35	8,9
	УГВ, м	-0,09	-0,09	-0,315	-0,345	-0,42	-0,62	-0,505	-0,775	-1,05

Как видно из табл. 2, в полученных оценках эмиссии наблюдались значительные различия между первым и вторым годом (попарное сравнение, тест Вилкоксона, $p = 0,008$), особенно для площадок на выработанном торфянике, где годовая эмиссия отличалась на порядок. Причины таких существенных различий заключались в количестве эпизодических пиковых выделений N₂O, которых, как видно на рис. 2, на площадках «В1», «В2» и «В3» после июля 2011 года измерено не было. Также, вероятно, использование линейной интерполяции между измерительными кампаниями дополнительно увеличивает вклад эпизодической эмиссии, особенно в случаях увеличения временного периода между измерениями. В нашем исследовании доля эпизодической эмиссии составляла более 90% на большинстве исследованных площадок. Очевидно, что в будущих исследованиях необходимо уделять основное внимание именно эпизодическим выбросам N₂O, увеличивая частоту полевых измерений в периоды их возможного возникновения.

Еще одним существенным фактором, повлиявшим на межгодовую разницу эмиссии N₂O, являлась сумма атмосферных осадков между годами. Если в первый год исследования количество осадков составило 120–135% от среднего значения в период 1979–2009 гг., то во втором году количество осадков составило 87–97%. Что в свою очередь, вероятно, увеличивает частоту возникновения эпизодических эмиссий, их пиковые значения и продолжительность.

Для обоих годов справедливо утверждение, что годовая эмиссия N₂O между площадками возрастает с уменьшением среднегодового значения УГВ. Применение регрессионного анализа показало наличие статистически значимой экспоненциальной зависимости между годовой эмиссией N₂O и среднегодовым значением УГВ для каждого года. Площадка «ЗС» не учитывалась в регрессионном анализе, т.к. период измерений там и количество осадков не совпадало с остальными площадками. Ниже представлены уравнение полученных моделей и основные статистические критерии:

$$\text{год. эм. (N}_2\text{O)} [\text{кг/га} \cdot \text{год}] = e^{(-4,094 \cdot \text{УГВ}[\text{м}] + 0,542)} \quad (R^2 = 92, p = 0,00015) \text{ – для первого года мониторинга;}$$

$$\text{год. эм. (N}_2\text{O)} [\text{кг/га} \cdot \text{год}] = e^{(-5,874 \cdot \text{УГВ}[\text{м}] - 1,908)} \quad (R^2 = 83, p = 0,0016) \text{ – для второго года исследований.}$$

Множественный регрессионный анализ, где в качестве предсказывающих переменных использовались среднегодовые значения УГВ, годовая сумма атмосферных осадков, среднегодовая температура воздуха, содержание азота в верхнем слое торфа, содержание углерода в верхнем слое торфа и объёмная плотность верхнего слоя торфяной почвы, не показал статистически значимой модели для предсказания годовых значений эмиссии N₂O на основе перечисленных факторов. Сокращение числа предсказывающих параметров показало наличие статистически значимой множественной регрессионной модели, которая включала годовую сумму атмосферных осадков (АО) и среднегодовое значение УГВ. Уравнение данной модели имело следующий вид:

$$\text{год. эм. (N}_2\text{O)} [\text{кг/га} \cdot \text{год}] = e^{(-4,067 \cdot \text{УГВ}[\text{м}] + 0,006 \cdot \text{АО}[\text{мм}] - 4,276)} \quad (R^2 = 0,65, p = 0,0002).$$

Полученные в рамках исследования оценки годовой эмиссии N₂O были выше значений, указанных в ТКП 17.09-02-2011 (02120), однако ниже предложенных методикой МГЭИК. Наименьшие выбросы N₂O наблюдались на участке естественного осокового болота (площадки «ОБ1» и «ОБ2»), где значение годовой эмиссии варьировало от 0,5 до 1,5 кг(N₂O)/ га·г. На остальных площадках наблюдалось очень высокое варьирование годовых выбросов N₂O, в пределах их типа землепользования. Например, на выработанном торфянике (площадки «В1», «В2» и «В3») эмиссии варьировали от 0,4 до 15,5 кг(N₂O)/ га·г, а на сельскохозяйственных торфяниках (площадки «С1», «С2», «С3» и «ЗС») от 5,1 до 35,4 кг(N₂O)/ га·г. Также в пределах каждого типа землепользования наблюдалась тенденция, когда эмиссии N₂O были выше на площадках с более низким УГВ. Среднегодовые значения УГВ между площадками статистически значимо отличались в соответствии с типом землепользования (среднегодовой УГВ ± стандартное отклонение (м.), естественное болото -0,09±0,17 м, выработанный торфяник -0,36±0,05 м, сельскохозяйственные торфяники -0,68±0,2 м). Таким образом, тип землепользования может быть использован как косвенный показатель для оценки среднегодового значения УГВ, и принимая во внимание обнаруженную зависимость выбросов N₂O от УГВ, может быть использован для грубого предсказания выбросов N₂O с торфяников.

Выводы

В результате проведенных нами исследований установлено:

Эмиссия N₂O с торфяных почв обладает высокой временной изменчивостью, для которой характерной чертой является возникновение высоких «эпизодических» выделений N₂O при определенных условиях среды (например: выпадение обильных атмосферных осадков в теплый сезон года, замерзание -расстраивание почвы при температурах близких к 0 °С).

Оценки годовой эмиссии N₂O на основе линейной модели показывают, что эпизодические пиковые выделения N₂O вносят наибольший вклад (до 90%) в формирование годовой эмиссии с торфяников. В будущих исследованиях необходимо увеличивать частоту проведения измерений потоков N₂O в периоды возможного возникновения эпизодических пиковых эмиссий (после интенсивных атмосферных осадков, и при температурах среды близких к 0 °С). Это позволит более точно оценить годовые значения выделения N₂O.

В рамках исследования была обнаружена статистически значимая взаимосвязь экспоненциального вида между значением годовой эмиссии N₂O с участка и значением его среднегодового УГВ и годовой суммой осадков. Остальные факторы среды и характеристики торфяной почвы на площадках статистически значимых корреляций не показали. Значительная разница эмиссии N₂O между первым и вторым годом исследования, которая, вероятнее всего, объясняется разницей в годовой сумме атмосферных осадков.

Полученные в рамках исследования оценки годовой эмиссии N₂O были выше значений, указанных в ТКП 17.09-02-2011 (02120), однако ниже предложенных методикой МГЭИК. Тип землепользования определяет среднегодовое значение УГВ на торфянике, и таким образом, влияет на годовую эмиссию N₂O.

Исследование выполнялась в рамках проекта международной технической помощи «Восстановление торфяников Беларуси и применение концепции их устойчивого управления – снижение воздействия на климат с эффектом для экономики и биоразнообразия». Деятельность проекта осуществляется при поддержке Программы развития Организации Объединенных Наций в Беларуси и Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь и финансируется Федеральным министерством охраны природы ФРГ.

Литература

1. Freibauer A. Designing an observation strategy for N₂O //The Continental-Scale Greenhouse Gas Balance of Europe. – Springer New York, 2008. – Pp. 135–151.

2. IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.
3. Бурло, А. В., Инструментальные методы оценки потоков парниковых газов с торфяников и болотных экосистем / А. В. Бурло, М. Минке, И. П. Наркевич // Природные ресурсы. – 2012. – №2, – С. – 119–129.
4. Кудеяров, В. Н. Азотный цикл и продуцирование закиси азота // Почвоведение. – 1999. – Т. 8. – С. 988–998.
5. О некоторых вопросах в области сохранения и рационального (устойчивого) использования торфяников: Постановление Совета Министров Республики Беларусь, 30 декабря 2015 г., № 1111 // Нац. правовой Интернет-портал Республика Беларусь. – 2016. – 5/41510.
6. Рижия, Е. Я. и др. Прямая эмиссия закиси азота из лугопастбищных почв северо-западного федерального округа Российской Федерации // Агрофизика. – Агрофизический научно-исследовательский институт РАСХН, 2013. – № 1. – С. 9.
7. ТКП 17.09-02-2011 (02120) Технический кодекс установившейся практики. «Охрана окружающей среды и природопользование. Климат. Выбросы и поглощение парниковых газов. Правила расчета выбросов и поглощения от естественных болотных экосистем, осушенных торфяных почв, выработанных и разрабатываемых торфяных месторождений» Минск: Бел НИЦ Экология, 2011. – 102 с.
8. Шестое Национальное сообщение в соответствии с обязательствами Республики Беларусь по Рамочной конвенции ООН об изменении климата. РУП «Бел НИЦ «Экология», Министерство природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь. – Минск, 2015.

**A. V. Burlo, A. A. Chuvashova, A. M. Pavluchenko,
N. V. Liashchynskaya, I. P. Narkevitch**

**EMISSION OF NITROUS OXIDE FROM DISTURBED PEAT SOILS:
QUANTITATIVE ASSESSMENT AND INFLUENCE
OF ENVIRONMENTAL FACTORS**

The article presents results of two-years monitoring of nitrous oxide fluxes from disturbed peat soils with different land use types. The study shows that peak emission of nitrous oxide has a tendency to occur after precipitation events or in conditions when environmental temperature was close to 0 °C. The annual average water level and annual sum of precipitation were the main factors that control annual nitrous oxide emission from disturbed peatlands.