

ОЦЕНКА ЭМИССИИ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ ИЗ ОРГАНИЧЕСКИХ ПОЧВ

А. Н. ПОЛЕВОЙ¹⁾, А. Ю. МИКИТЮК²⁾

¹⁾Одесский государственный экологический университет, ул. Львовская, 15, 65016, г. Одесса, Украина

²⁾Институт развития территориальных общин, ул. Лютеранская, 21/12, 01024, г. Киев, Украина

С помощью расчетов по модели динамики органического вещества в органических почвах и эмиссии парниковых газов (PEAT-GHG-MODEL) проведена оценка выбросов парниковых газов. Моделировались эмиссия CO₂, CH₄, N₂O, NO и накопление углерода в дренированной органической почве мелиоративной системы «Крюково», расположенной в Черниговской области (Украина), в 2000–2011 гг. Материалом для оценки служил участок с растительностью типа сообщества низких корневищных осок *Cārex humilis* / *Cārex rhizīna*. Средние значения надземной сухой массы составили 125–325 г/м², содержание органического вещества в сухой массе растений – 45,5...47,8 %. Среднегодовые значения эмиссии CO₂, CH₄, N₂O, NO в 2000–2011 гг. достигли 6,718 т CO₂ – С га⁻¹ · год⁻¹; 2,960 кг CH₄ – С га⁻¹ · год⁻¹; 5,583 кг N₂O и NO – N га⁻¹ · год⁻¹ соответственно. Накопление углерода в почве колебалось по годам от 0,439 до 0,836 т С га⁻¹ · год⁻¹. Дана оценка внутригодовой изменчивости потоков CO₂, CH₄, N₂O и NO за два года – 2006-й и 2010-й, контрастных по динамике уровня грунтовых вод.

Ключевые слова: эмиссия; парниковые газы; потоки; углерод; азот; метан; закись азота; органическая почва; динамика; растительность; осадки; уровень грунтовых вод.

ASSESSMENT OF GREENHOUSE GAS EMISSIONS FROM ORGANIC SOILS

A. N. POLEVOY^a, A. Y. MYKYTIUK^b

^aOdessa State Environmental University, Lvovskaja street, 15, 65016, Odessa, Ukraine

^bInstitute for Community Development, Ljuteranskaja street, 21/12, 01024, Kyiv, Ukraine

Corresponding author: apolevoy@te.net.ua

The estimation of greenhouse gas emissions was carried out by using model calculations of the dynamics of organic matter in organic soils and emissions of greenhouse gases (PEAT-GHG-MODEL). Emissions of CO₂, CH₄, N₂O, NO and carbon accumulation in drained organic soil in reclamation «Kryukovo» system located in the Chernihiv province in the period 2000–2011 were modeled. The lot with vegetation type Community of *Cārex humilis* / *Cārex rhizīna* was studied. The average rate of above-ground dry matter is 125–325 g/m², the content of organic matter in dry matter of the plant is 45.5–47.8 %. The average annual rates of CO₂, CH₄, N₂O, NO emissions for the period 2000–2011 are 6.718 tons of CO₂ – C ha⁻¹ · y⁻¹; 2.960 kg of CH₄ – C ha⁻¹ · y⁻¹; 5.583 kg N₂O and NO – N ha⁻¹ · y⁻¹ respectively. The carbon accumulation in the soil varied from year to year, from 0.439 to 0.836 tons C ha⁻¹ · y⁻¹. The estimations of annual variability of CO₂, CH₄, N₂O and NO fluxes for the two contrasting GWL dynamics 2006 and 2010 years were given.

Key words: emission; greenhouse gases; flows; carbon; nitrogen; methane; nitrous oxide; organic soil; dynamics; vegetation; precipitations; ground water level.

Образец цитирования:

Полевой А. Н., Микитюк А. Ю. Оценка эмиссии парниковых газов из органических почв // Журн. Белорус. гос. ун-та. География. Геология. 2017. № 1. С. 71–78.

For citation:

Polevoy A. N., Mykytiuk A. Y. Assessment of greenhouse gas emissions from organic soils. *J. Belarus. State Univ. Geogr. Geol.* 2017. No. 1. P. 71–78 (in Russ.).

Авторы:

Анатолій Николаевич Полевой – доктор географических наук, профессор; заведующий кафедрой агрометеорологии гидрометеорологического факультета.

Александр Юрьевич Микитюк – кандидат биологических наук, доцент; директор.

Authors:

Anatoly Polevoy, doctor of science (geography), full professor; head of the department of agricultural meteorology, faculty of hydrometeorology.

apolevoy@te.net.ua

Aleksandr Mykytiuk, PhD (biology), docent; director.

alex.mykytiuk@icdu.kiev.ua

Введение

Разработка национальной стратегии по снижению выбросов парниковых газов основывается на их инвентаризации, которая включает и количественные оценки, полученные с помощью создания различных моделей этих процессов.

Динамическое моделирование процессов трансформации органического вещества почв является важным инструментом исследования функционирования и прогнозирования изменений почвенной системы, количественной оценки роли почвенного покрова в балансе парниковых газов в атмосфере и процессах изменений климата.

В основу принятой нами концепции моделирования динамики органического вещества в органических почвах и выбросов парниковых газов [1, с. 141–147] положены принципы, сформулированные в [2, с. 8–9; 3, с. 8–9], сущность которых заключается в обосновании разделения органического материала растительных остатков и почвы на активные и пассивные компартменты и дальнейшем количественном описании их динамики. Выделяется стойкий органический материал, декомпозиционный органический материал, инертный органический материал, а также пулы микробиологической биомассы и гумуса. В модель (PEAT-GHG-MODEL) включены все главные процессы круговорота С и N, интенсивность которых описывается уравнением первого порядка. При разложении органического вещества рассматривается эмиссия CO_2 и CH_4 . Моделируются основные процессы трансформации форм азота под воздействием факторов окружающей среды: аммонификация, нитрификация, денитрификация, иммобилизация, поглощение азота корневой системой растений, вынос нитратов за пределы слоя почвы 0–50 см при инфильтрации влаги, эмиссия N_2O при нитрификации и денитрификации.

Материалы и методы исследования

В качестве объекта изучения рассматривалось моделирование эмиссии парниковых газов из органических почв Украинского Полесья. Оценка выбросов парниковых газов проводилась для мелиоративной системы «Крюково», расположенной в Черниговской области (Украина). Для наблюдаемого опытного участка с дренированной органической почвой характерны различные типы растительности.

Нами исследовался участок, на котором распространена растительность типа сообщества низких корневищных осок. Средние значения надземной сухой массы составляют 125–325 г/м², содержание органического вещества в сухой массе растений – 45,5...47,8 %. Подземная часть растений достаточно большая, и для слоя почвы 0–20 см сухая масса находится в пределах 721–3603 г/м² при содержании органического вещества 44,6–44,8 %. Общий запас биомассы составляет 3955 г/м².

Результаты исследований и их обсуждение

Моделировались эмиссия CO_2 , CH_4 , N_2O , NO и накопление углерода в дренированной органической почве в 2000–2011 гг. Для этих лет были характерны среднегодовая температура воздуха 7,2–8,7 °С, сумма годовых осадков 550–818 мм, среднегодовой уровень грунтовых вод (УГВ) от –37 до –171 см (табл. 1). Годовая эмиссия CO_2 , CH_4 , N_2O и NO из органической почвы в 2000 и 2011 гг. соответственно имела разницу в следующих пределах: 5,156–9,804 т $\text{CO}_2 - \text{C га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$; 0–8,133 кг $\text{CH}_4 - \text{C га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$; 3,482–12,329 кг N_2O и NO – $\text{N га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$. Накопление углерода в почве колебалось по годам от 0,439 до 0,836 т $\text{C га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$. Среднегодовые значения эмиссии CO_2 , CH_4 , N_2O , NO за 2000–2011 гг. составили 6,718 т $\text{CO}_2 - \text{C га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$; 2,960 кг $\text{CH}_4 - \text{C га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$; 5,583 кг N_2O и NO – $\text{N га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$ соответственно.

Таблица 1

Эмиссия CO_2 , CH_4 , N_2O и NO из органической почвы и накопление углерода в почве (мелиоративная система «Крюково», сообщество низких корневищных осок, 2000–2011 гг.)

Table 1

CO_2 , CH_4 , N_2O and NO emissions from organic soil and soil carbon storage (Kriukovo Meliorative System, a community of low rhizomatous sedge, 2000–2011)

Год	Эмиссия				Накопление углерода в почве за год, т $\text{C га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$	Средняя за год температура воздуха, °С	Сумма осадков за год, мм	Средний за год УГВ, см
	CO_2		CH_4 , кг $\text{CH}_4 - \text{C га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$	$\text{N}_2\text{O} + \text{NO}$, кг N_2O и NO – $\text{N га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$				
	т $\text{CO}_2 - \text{C га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$	среднесуточная за март – октябрь, г $\text{CO}_2 - \text{C м}^{-2}$						
2000	6,982	2,86	2,299	5,896	0,595	8,2	701	–64
2001	5,156	1,45	3,922	3,482	0,439	7,7	713	–55

Окончание табл. 1
Ending table 1

Год	Эмиссия				Накопление углерода в почве за год, т С га ⁻¹ · год ⁻¹	Средняя за год температура воздуха, °С	Сумма осадков за год, мм	Средний за год УГВ, см
	СО ₂		СН ₄ , кг СН ₄ -С га ⁻¹ · год ⁻¹	N ₂ O + NO, кг N ₂ O и NO - N га ⁻¹ · год ⁻¹				
	т СО ₂ -С га ⁻¹ · год ⁻¹	среднесуточная за март – октябрь, г СО ₂ -С м ⁻²						
2002	6,637	2,74	3,414	5,812	0,566	8,2	598	-55
2003	6,326	2,62	2,252	5,011	0,539	7,1	603	-58
2004	5,385	2,22	1,932	3,454	0,459	7,5	550	-58
2005	6,331	2,62	2,153	4,677	0,540	7,6	818	-58
2006	5,243	2,15	8,133	3,513	0,447	7,2	642	-56
2007	7,963	3,28	0,178	6,389	0,679	8,6	640	-146
2008	7,389	3,03	0,0	5,322	0,630	8,7	599	-171
2009	6,686	2,73	1,917	5,168	0,568	8,0	607	-76
2010	9,804	4,05	2,609	12,329	0,836	8,3	651	-58
2011	6,729	2,76	6,714	5,942	0,574	7,7	585	-37

Напряженность гидротермических факторов – температуры и влажности почвы – определяет интенсивность биохимических процессов, происходящих в торфяной почве, в результате которых высвобождается углерод в виде диоксида углерода и метана, а также процессов трансформации форм азота, приводящих к выбросу закиси и окиси азота.

В 2007–2008 гг. наблюдались наиболее низкое за рассматриваемый период среднее за год стояние грунтовых вод (от –140 до –150 см) и самая высокая среднегодовая температура воздуха. Для этих лет характерны достаточно высокие годовые уровни эмиссии СО₂ и практически нулевые уровни выброса СН₄. Максимальные значения потоков СО₂ наблюдались в 2007 и 2010 гг.

Экспериментальные измерения эмиссии СО₂ из органических почв, проведенные в различных почвенно-климатических условиях, позволяют сопоставить полученные нами результаты моделирования с результатами других авторов.

В условиях южной Германии для органической почвы елового леса (Hoglwald Forest) наблюдались [4, с. 1741] значения эмиссии 7,0–9,2 т СО₂ – С га⁻¹ · год⁻¹. Для условий Финляндии [5, с. 159] эмиссия СО₂ из органической почвы посаженного леса составила от 207 до 539 г СО₂ – С га⁻¹ · год⁻¹ (2,07–5,39 т СО₂ – С га⁻¹ · год⁻¹). В работе [6, с. 1059] говорится о том, что в условиях Швеции в лиственном лесу эмиссия СО₂ из органической почвы составила для недренированного участка 1,9 кг СО₂ м⁻² · год⁻¹ (5,18 т СО₂ – С га⁻¹ · год⁻¹), а на дренированном участке – 1,0 кг СО₂ м⁻² · год⁻¹ (2,72 т СО₂ – С га⁻¹ · год⁻¹). Для условий южной Швеции [7, с. 1–2] приводятся сведения об эмиссии СО₂ из органической дренированной почвы для двух участков с различной растительностью в количестве 6700–9300 и 11 200–14 800 кг м⁻² · год⁻¹ соответственно (что в пересчете составляет 1,825–2,534 и 3,052–5,432 т га⁻¹ · год⁻¹). На основе непрерывных 11-летних мониторинговых наблюдений за эмиссией СО₂ в работе [8, с. 42] получены оценки сезонных и годовых потоков СО₂ из почв южнотаежной зоны России и рассчитана их межгодовая вариабельность. В зависимости от типа растительности среднелетняя годовая эмиссия СО₂ из дерново-подзолистой и серой лесной почв изменялась от 381 до 809 г СО₂ – С га⁻¹ · год⁻¹ (в пересчете – 3,81...8,09 т СО₂ – С га⁻¹ · год⁻¹), а ее межгодовая вариабельность составляла 13–21 % для почв естественных экосистем и 33–37 % для почвы агроценоза. В условиях южной Эстонии [9, с. 40–42] в прибрежном ольховом лесу отмечалась вариация эмиссии СО₂ от 3862 до 4100 кг СО₂ – С га⁻¹ · год⁻¹, что в пересчете составляет от 3,862 до 4,100 т СО₂ – С га⁻¹ · год⁻¹.

Оценки эмиссии СО₂ из дренированной органической почвы с естественной растительностью в условиях Украинского Полесья, полученные нами, изменяются год от года (см. табл. 1). Они удовлетворительно соотносятся с оценками, полученными в результате мониторинговых наблюдений для органических почв, дренированных в разное время, с различной растительностью в климатических условиях Западной Европы, чем и объясняются пространственная изменчивость и временная вариабельность этих экспериментальных значений эмиссии СО₂.

Сравнение с результатами, полученными в условиях южной Эстонии [9, с. 40–41], наиболее близких по климату к условиям Украинского Полесья, показывает некоторое завышение выброса, рассчитанного

нами по модели эмиссии CO_2 . Это может объясняться как различием почвенных условий, так и несколько более высоким уровнем температур, определяющих интенсивность продуцирования CO_2 в условиях Украинского Полесья.

Оценки, выполненные с помощью модели, позволяют сопоставить результаты расчетов среднесуточной эмиссии CO_2 за теплый период года (март – октябрь) (см. табл. 1) с данными измерений средних суточных и часовых значений эмиссии CO_2 из органической почвы, выполненных в климатических условиях, сходных с режимом погоды Украинского Полесья. Такое сопоставление связано с рядом трудностей. Некоторые из них являются следствием различных упрощающих предположений, допущенных при моделировании, выполненных с достаточно большим временным (месячным) шагом модельных расчетов, другие зависят от различий в свойствах органических почв. Поэтому можно выполнить только достаточно условное сравнение результатов расчета и данных экспериментальных измерений.

В работе [10, с. 10–11] представлены результаты измерений эмиссии CO_2 из органической почвы в условиях Земландского полуострова (западная часть Калининградской области). Изучались почвы на ключевых участках как в лесных массивах, так и на сельскохозяйственных угодьях (пашни, залежи). На осушенной торфяно-глеевой почве под камышево-вейниково-ситниковым сообществом эмиссия CO_2 (при среднем уровне болотных вод 90 см) составила в среднем $1,2 \text{ г С м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$. Наблюдения, проведенные на аналогичной почве под пырейным сообществом (при УГВ 100–110 см), показали размеры эмиссии CO_2 в пределах $3,1 \text{ г С м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$.

Результаты изучения эмиссии CO_2 , CH_4 и закиси азота (N_2O) из освоенных и естественных торфяных почв представлены в [11, с. 90]. Исследования проводились в пойме р. Яхромы (Дмитровский район Московской области) и на территории Ростовской низины (Ярославская область). Были изучены две пары (освоенная – неосвоенная) торфяных почв. Эмиссия CO_2 на этих участках регистрировалась в размере $10,1\text{--}91,4 \text{ нмоль CO}_2 \text{ см}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$, что в пересчете составило $0,026\text{--}0,261 \text{ г CO}_2\text{--С м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$ соответственно. В условиях Западно-Двинского лесоболотного стационара в Тверской области исследовалась [12, с. 83] эмиссия CO_2 и CH_4 с поверхности почвы в атмосферу в лесах разной увлажненности и на болотах различной трофности в течение вегетационного периода, равного 184 сут (май – октябрь). Максимальная эмиссия CO_2 характерна для почв наиболее продуктивных ельников-кисличников и составляет 730 г С м^{-2} , затем следуют сосняки: чернично-зеленомошный – 515 г С м^{-2} и лишайниково-зеленомошный – 450 г С м^{-2} , что в пересчете на одни сутки составляет $3,96; 2,80$ и $2,45 \text{ г CO}_2\text{--С м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$. Гидролесомелиорация, понижая уровень почвенно-грунтовых вод и увеличивая зону аэрации, создает условия для возрастания эмиссии CO_2 в осушенных грядово-мочажинном комплексе и черноольшанике крапивном до 590 и 1290 г С м^{-2} , что в пересчете составляет $3,21$ и $7,01 \text{ г CO}_2\text{--С м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$ соответственно. В условиях южной Эстонии в прибрежном ольховом лесу на двух участках с органической почвой наблюдалась [9, с. 40–41] эмиссия CO_2 в пределах от 2 до $148 \text{ мг CO}_2\text{--С м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$ и от 2 до $366 \text{ мг CO}_2\text{--С м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$ (от $0,048$ до $4,752$ и от $0,048$ до $8,784 \text{ г CO}_2\text{--С м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$ соответственно). В [13, с. 12] для условий юго-восточной Карелии приводятся средние за теплый период года скорости эмиссии CO_2 из торфяной почвы для естественного участка – $82,5 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$ и для осушаемого участка – $134,5 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$, что в пересчете составляет $1,98$ и $3,28 \text{ г CO}_2\text{--С м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$ соответственно.

Приведенные в табл. 1 данные свидетельствуют о том, что полученные нами в модельных расчетах значения среднесуточной эмиссии CO_2 за теплый период года (март – октябрь) из органической почвы на территории Украинского Полесья варьируют и сопоставимы с экспериментально установленными значениями эмиссии CO_2 для условий юго-восточной Карелии, южной Эстонии, Земландского полуострова и Западно-Двинского лесоболотного стационара.

Вместе с тем они на порядок выше, чем экспериментальные результаты, полученные на освоенных и естественных торфяных почвах в пойме р. Яхромы и на территории Ростовской низины. В связи с этим можно высказать предположение о том, что эти расхождения между размерами эмиссии CO_2 объясняются существенными различиями свойств сравниваемых органических почв и обусловлены различными сроками осушения и многолетним сельскохозяйственным использованием торфяников Подмосквья.

Результаты расчетов показывают, что эмиссия метана была значительной только в 2006 и 2011 гг., хотя средний за год УГВ в 2006 г. ненамного отличался от УГВ в период с 2000 по 2005 г., а для 2011 г. характерен самый высокий за весь рассматриваемый период среднегодовой УГВ (см. табл. 1). Минимальная эмиссия CH_4 регистрировалась в течение самого низкого за рассматриваемый период стояния УГВ, который наблюдался в 2007 г. (первые три месяца он составлял от -69 до -95 см, затем всю оставшуюся часть года был на уровне от -166 до -177 см) и 2008 г. (УГВ составлял от -145 до -196 см). При этом толща торфяной почвы работает как метанопоглощающий фильтр, который окисляет метан, образующийся в анаэробной зоне, что приводит к снижению общего потока метана из почвы в атмосферу.

Эмиссия метана значительно изменяется в пространстве и во времени в зависимости от свойств органической почвы и формирующихся под влиянием УГВ аэробных или анаэробных условий в зоне постоянного переувлажнения и затопления.

В Англии в [14, с. 92] для елового леса получены оценки потоков эмиссии CH_4 из органической дренированной и недренированной почв, которые достигали 3,23–9,06 и 13,53–21,18 кг $\text{CH}_4 - \text{C}$ га⁻¹ · год⁻¹ соответственно. В условиях Словении [15, с. 1437] эмиссия метана из дренированной, покрытой травяной растительностью органической почвы составляла 3,1 кг $\text{CH}_4 - \text{C}$ га⁻¹ · год⁻¹. В лиственном лесу в климате Швеции изучались [6, с. 1059] потоки эмиссии метана на двух участках. Для недренированного участка эмиссия составила 7,6 г $\text{CH}_4 - \text{C}$ га⁻¹ · год⁻¹ (76 кг $\text{CH}_4 - \text{C}$ га⁻¹ · год⁻¹), для дренированного участка была равна 0,9 г $\text{CH}_4 - \text{C}$ га⁻¹ · год⁻¹ (9 кг $\text{CH}_4 - \text{C}$ га⁻¹ · год⁻¹). Для условий Финляндии в работе [5, с. 159] демонстрируются значения эмиссии метана из органической почвы от –0,32 до +0,61 г $\text{CH}_4 - \text{C}$ га⁻¹ · год⁻¹ (от –3,2 до +6,1 кг $\text{CH}_4 - \text{C}$ га⁻¹ · год⁻¹). В работе [9, с. 40] приводятся результаты измерений эмиссии метана из органической почвы в прибрежном ольховом лесу, которые показывают среднее значение эмиссии – около 0,9 кг $\text{CH}_4 - \text{C}$ га⁻¹ · год⁻¹.

Приведенные выше данные эмиссии метана получены из органических почв, обладающих различными свойствами, а также не в одинаковых климатических условиях при разном варьировании УГВ, определяющем размеры толщи торфа, в которой формируются анаэробные условия.

В выполненных нами модельных расчетах получены оценки эмиссии метана из органической почвы Украинского Полесья, которые колеблются от 0 до 8,13 кг $\text{CH}_4 - \text{C}$ га⁻¹ · год⁻¹. Они коррелируют с приведенными выше данными других авторов.

Рассмотрение динамики выбросов N_2O и NO по годам показывает, что она повторяет динамику выбросов CO_2 и максимальные значения этих выбросов также наблюдались в 2007 и 2010 гг. (см. табл. 1).

В аэробной зоне складываются условия для эмиссии закиси азота в процессе нитрификации и окиси азота – в процессе денитрификации.

Данные наблюдений в Исландии [16, с. 24] показали, что из участка дренированной органической почвы регистрировалась эмиссия закиси азота от 5,5 до 17,0 кг $\text{N}_2\text{O} - \text{N}$ га⁻¹ · год⁻¹. В Англии для елового леса [14, с. 21] изучались выбросы закиси азота из дренированной и недренированной почв, которые составили 1,87–13,71 и 2,18–14,55 кг $\text{N}_2\text{O} - \text{N}$ га⁻¹ · год⁻¹ соответственно. Для западной Голландии [17, с. 583] эмиссия из органической почвы оценивается в пределах 8–30 кг $\text{N}_2\text{O} - \text{N}$ га⁻¹ · год⁻¹, а в условиях дренированной органической почвы пастбища в [18, с. 35] приводится значение выброса закиси азота, которое колеблется от 14 до 61 кг $\text{N}_2\text{O} - \text{N}$ га⁻¹ · год⁻¹. В лиственном лесу в условиях Швеции [6, с. 1059–1060] из дренированной почвы наблюдалась эмиссия закиси азота в размере 2–9 кг $\text{N}_2\text{O} - \text{N}$ га⁻¹ · год⁻¹. Для условий Финляндии в работе [5, с. 159–160] отмечаются на двух залесенных участках выбросы закиси азота из органической почвы от 1 до 30 кг $\text{N}_2\text{O} - \text{N}$ га⁻¹ · год⁻¹ и от 0,1 до 4,8 кг $\text{N}_2\text{O} - \text{N}$ га⁻¹ · год⁻¹.

Измерения эмиссии N_2O в северной и южной Финляндии из полевых участков органической почвы под разными сельскохозяйственными культурами показали [19, с. 591] существенно отличающиеся результаты. На севере эмиссия закиси азота составляла от 4,0 до 13,0 кг $\text{N}_2\text{O} - \text{N}$ га⁻¹ · год⁻¹, а на юге ее уровень был выше и достигал 7,3–25,0 кг $\text{N}_2\text{O} - \text{N}$ га⁻¹ · год⁻¹. На неиспользуемых заброшенных участках органической почвы, где ранее возделывались сельскохозяйственные культуры, эмиссия регистрировалась в размере 5,5 кг $\text{N}_2\text{O} - \text{N}$ га⁻¹ · год⁻¹, а на заброшенных залесенных участках – в среднем 2,4 кг $\text{N}_2\text{O} - \text{N}$ га⁻¹ · год⁻¹.

Проведенные нами модельные расчеты суммарных потоков эмиссии N_2O и NO показали, что годовые значения меняются в пределах 3,45–12,33 кг $\text{N}_2\text{O} - \text{N}$ га⁻¹ · год⁻¹. Они соотносятся с результатами экспериментальных измерений приведенных выше литературных данных.

В 2006 и 2010 гг. на территории Украинского Полесья наблюдалась максимальная эмиссия CO_2 и CH_4 . Представляет интерес рассмотрение особенностей динамики УГВ и внутригодовой динамики CO_2 и CH_4 в эти годы (табл. 2). Динамика УГВ в 2006 и 2010 гг. характеризуется большой изменчивостью по месяцам. Как видно из данных табл. 2, в 2006 г. по сравнению с январем – мартом УГВ в апреле – июне повысился, в июле – августе произошло понижение УГВ, а затем он снова повысился. В 2010 г. с января по апрель УГВ повышался, затем с мая по август понижался и с сентября по декабрь происходило его повышение.

Для оценки внутригодовой изменчивости потоков CO_2 , CH_4 , N_2O и NO использованы результаты расчетов, выполненных за два года, контрастных по динамике УГВ, – 2006-й и 2010-й. Внутригодовая динамика выбросов CO_2 , CH_4 , N_2O и NO имеет четко выраженный годовой ход. В 2010 г., так же как и в остальные годы, максимальные значения суммарных месячных величин эмиссии CO_2 приходились на летние месяцы (июнь – июль), что объясняется глубоким залеганием УГВ и интенсивно протекающим в аэробных условиях процессом разложения органического вещества почвы и растительных остатков (см. табл. 2).

Внутригодовая эмиссия CO₂, CH₄, N₂O и NO из органической почвы
(мелиоративная система «Крюково», сообщество низких корневищных осок, 2006 и 2010 гг.)

Table 2

CO₂, CH₄, N₂O and NO intra-annual emissions from organic soil
(Kriukovo Meliorative System, a community of low rhizomatous sedge, 2006 and 2010)

Месяц	Эмиссия			Средний за месяц УГВ, см	Эмиссия			Средний за месяц УГВ, см
	CO ₂ , т CO ₂ – С га ⁻¹ · мес. ⁻¹	CH ₄ , кг CH ₄ – С га ⁻¹ · мес. ⁻¹	N ₂ O + NO, кг N ₂ O и NO – N га ⁻¹ · мес. ⁻¹		CO ₂ , т CO ₂ – С га ⁻¹ · мес. ⁻¹	CH ₄ , кг CH ₄ – С га ⁻¹ · мес. ⁻¹	N ₂ O + NO, кг N ₂ O и NO – N га ⁻¹ · мес. ⁻¹	
2006 г.				2010 г.				
I	0	0	0,001	-69	0	0	0,0015	-50
II	0	0	0,0008	-79	0	0	0,0019	-46
III	0,0223	0	0,0043	-69	0,0264	0,089	0,0056	-41
IV	0,1106	0,603	-0,0054	-30	0,0889	1,383	-0,0084	-15
V	0,6543	1,114	0,1913	-46	1,1246	0,898	0,7503	-54
VI	1,1709	5,532	0,4712	-29	3,8607	0	5,2964	-74
VII	2,0146	0	2,0733	-76	2,8986	0	4,6388	-98
VIII	0,9115	0	0,699	-80	1,304	0	1,487	-98
IX	0,1796	0,536	0,0417	-42	0,3496	0	0,1256	-80
X	0,1112	0,285	0,0223	-45	0,0767	0,058	0,0137	-57
XI	0,0324	0,046	0,0061	-52	0,075	0,182	0,014	-46
XII	0,00354	0,018	0,0069	-60	0	0	0,0023	-35

Колебания УГВ вызывают увеличение или уменьшение объема торфяной почвы, где складываются анаэробные условия для продуцирования CH₄. Из данных, представленных в табл. 2, следует, что при высоких значениях УГВ в начале 2006 г., особенно в апреле – июне, в анаэробных условиях шло интенсивное образование CH₄ и максимальные за месяц значения потоков эмиссии метана наблюдались в июне. В период низкого стояния грунтовых вод в июне – октябре эмиссия метана была практически нулевой.

Поток закиси азота в 2010 г., в отличие от метана, в этих условиях, наоборот, возрастает. Максимальные значения суммарного потока эмиссии N₂O и NO наблюдались при низком залегании грунтовых вод в июне – июле.

Заключение

Таким образом, предложенная нами PEAT-GHG-MODEL позволяет оценить эмиссию парниковых газов с органических почв Украинского Полесья, занятых естественной растительностью, и сопоставить полученные результаты с результатами экспериментальных исследований выбросов парниковых газов с органических почв в климатических условиях Западной Европы и России. Сравнение показало, что расчетные значения эмиссии CO₂, CH₄, N₂O и NO удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными.

Перспектива применения таких расчетов состоит в том, что модельные расчеты, выполненные для преобладающих типов растительности с учетом площади их распространения, особенно с использованием спутниковой информации, позволяют оценить эмиссию парниковых газов на обширных территориях Украинского Полесья, занятых органическими почвами, определить долю вклада этих выбросов в суммарную эмиссию парниковых газов на территории Украины. Применение модельных расчетов делает возможным построение карт, характеризующих условия формирования выбросов парниковых газов, и при использовании существующих сценариев изменения климата позволяет оценить эмиссию парниковых газов в будущем.

Дальнейшее развитие расчетных методов количественной оценки выбросов парниковых газов связано с необходимостью получения более широкого спектра экспериментальных данных об их эмиссии с торфяников.

Библиографические ссылки

1. Польовий А. М., Микитюк О. Ю. Моделювання емісії парникових газів із органічних ґрунтів (PEAT-GHG-MODEL) // Український гідрометеорологічний журнал. 2015. № 16. С. 141–147.
2. Coleman K., Jenkinson D. S. A model for the turnover of carbon in soil. Model description and windows users guide. Harpenden Herts, 2008. URL: http://www.rothamsted.ac.uk/sites/default/files/users/kcoleman/RothC_guide_WIN.pdf (date of access: 10.12.2016).
3. Smith J., Gottschalk P., Bellarby J. Model to Estimate Carbon in Organic Soils – Sequestration and Emissions (ECOSSE). Aberdeen, 2010.
4. Decadal variable of soil CO₂, NO, N₂O and CH₄ fluxes at the Hoglewald Forest, Germany / G. L. Lun [et al.] // *Biogeosciences*. 2012. Vol. 9, issue 5. P. 1741–1763.
5. Soil greenhouse gas emissions from afforested organic soil croplands and cutaway peatlands / P. Makiranta [et al.] // *Boreal Env. Res.* 2007. Vol. 12, issue 2. P. 159–175.
6. Fluxes of CO₂, CH₄ and N₂O from drained organic soils in deciduous forests / K. Von Arnold [et al.] // *Soil Biol. & Biochem.* 2005. Vol. 37, issue 6. P. 1059–1071.
7. Ernfors M. Greenhouse gas fluxes between drained forested peatlands and the atmosphere : a thesis submitted for the degree of doctor of philosophy. Gothenburg, 2009.
8. Курганова И. Н. Эмиссия и баланс диоксида углерода в наземных экосистемах России : автореф. дис. ... д-ра биол. наук : 03.00.27 ; 03.00.16. М., 2010.
9. Dynamics of gaseous nitrogen and carbon fluxes in riparian alder forests / K. Soosaar [et al.] // *Ecol. Eng.* 2011. Vol. 37, issue 1. P. 40–53.
10. Анциферова О. А., Столбовский А. В. Эмиссия CO₂ из почв западной части Калининградской области // Эмиссия и сток парниковых газов на территории северной Евразии : тез. докл. III Междунар. конф. (Пушино, 4–8 июня 2007 г.). Пушино, 2007. С. 10–11.
11. Новиков В. В., Степанов А. Л. Эмиссия парниковых газов в торфяных почвах разной степени освоения // Эмиссия и сток парниковых газов на территории северной Евразии : тез. докл. II Междунар. конф. (Пушино, 16–20 июня 2003 г.). Пушино, 2003. С. 90.
12. Эмиссия диоксида углерода и метана с поверхности почв лесных и болотных экосистем разной увлажненности в подзоне южной тайги Европейской территории России / С. Э. Вомперский [и др.] // Эмиссия и сток парниковых газов на территории северной Евразии : тез. докл. нац. конф. с междунар. участием (Пушино, 20–24 нояб. 2000 г.). Пушино, 2000. С. 83.
13. Икконен Е. Н. Влияние осушения на интенсивность выделения CO₂ мезоолиготрофным болотом Юго-Восточной Фенноскандии : автореф. дис. ... канд. биол. наук : 03.00.16. Петрозаводск, 2000.
14. Mojeremane W. Effects of site preparation for afforestation on soil properties and greenhouse gas emission : a thesis submitted for the degree of doctor of philosophy. Edinburgh, 2009.
15. Emissions of CO₂, CH₄ and N₂O from Southern European peat lands / T. Danevcic [et al.] // *Soil Biology & Biochemistry*. 2010. Vol. 42. P. 1437–1446.
16. Jansen E. The effects of land use, temperature and water level fluctuations in the emission of nitrous oxide (N₂O), carbon dioxide (CO₂) and methane (CH₄) from organic soil cores in Iceland. M. Sc. : thesis in environment and resources. Reykjavik, 2008.
17. Hendriks R. F. A., Wolleswinkel R. J., van den Akker Alterra J. J. H. Predicting greenhouse gas emission from peat soils depending on water management with the SWAP – ANIMO model // *Peatland and Climate*. Wageningen, 2006. P. 583–586.
18. Emissions of CO₂, CH₄ and N₂O from pasture on drained peat soils in the Netherlands / C. A. Langeveld [et al.] // *Europ. J. Agron.* 1997. Vol. 7 (1). P. 35–42.
19. Fluxes of N₂O from farmed peat soils in Finland / K. Regina [et al.] // *Europ. J. Soil Sci.* 2004. Vol. 55, issue 3. P. 591–599.

References

1. Pol'ovii A. M., Mykytjuk O. Ju. Modelyuvannya emisii parnykovykh gaziv iz organichnykh g'runtiv [Modeling greenhouse gas emission from organic soils] (PEAT-GHG-MODEL). *Ukrains'kyj gidrometeorologichnyj zhurnal*. 2015. No. 16. P. 141–147 (in Ukrainian).
2. Coleman K., Jenkinson D. S. A model for the turnover of carbon in soil. Model description and windows users guide. Harpenden Herts, 2008. URL: http://www.rothamsted.ac.uk/sites/default/files/users/kcoleman/RothC_guide_WIN.pdf (date of access: 10.12.2016).
3. Smith J., Gottschalk P., Bellarby J. Model to Estimate Carbon in Organic Soils – Sequestration and Emissions (ECOSSE). Aberdeen, 2010.
4. Lun G. L., Bruggemann N., Wolf B., et al. Decadal variable of soil CO₂, NO, N₂O and CH₄ fluxes at the Hoglewald Forest, Germany. *Biogeosciences*. 2012. Vol. 9, issue 5. P. 1741–1763. DOI: 10.5194/bg-9-1741-2012, 2012.
5. Makiranta P., Hytonen J., Aro L., et al. Soil greenhouse gas emissions from afforested organic soil croplands and cutaway peatlands. *Boreal Env. Res.* 2007. Vol. 12, issue 2. P. 159–175.
6. Von Arnold K., Nilsson M., Hanell B., et al. Fluxes of CO₂, CH₄ and N₂O from drained organic soils in deciduous forests. *Soil Biol. & Biochem.* 2005. Vol. 37, issue 6. P. 1059–1071. DOI: 10.1016/j.soilbio.2004.11.004.
7. Ernfors M. Greenhouse gas fluxes between drained forested peatlands and the atmosphere : a thesis submitted for the degree of doctor of philosophy. Gothenburg, 2009.
8. Kurganova I. N. Emissiya i balans dioksida ugleroda v nazemnykh ekosistemakh Rossii [Emission and balance of dioxide of carbon is in the surface ecosystems of Russia] : avtoref. diss. ... d-ra biol. nauk : 03.00.27 ; 03.00.16. Mosc., 2010 (in Russ.).
9. Soosaar K., Mander U., Maddison M., et al. Dynamics of gaseous nitrogen and carbon fluxes in riparian alder forests. *Ecol. Eng.* 2011. Vol. 37, issue 1. P. 40–53. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2010.07.025.

10. Antsiferova O. A., Stolpovskii A. V. Emissiya SO_2 iz pochv zapadnoi chasti Kaliningradskoi oblasti [Emission of CO_2 from soils of western part of the Kaliningrad area]. *Emissiya i stok parnikovykh gazov na territorii severnoi Evrazii* : tez. dokl. III Mezhdunar. konf. (Pushchino, 4–8 June, 2007). Pushchino, 2007. P. 10–11 (in Russ.).

11. Novikov V. V., Stepanov A. L. Emissiya parnikovykh gazov v torfyanykh pochvakh raznoi stepeni osvoeniya [Emission of greenhouse gases in peat soils of different degree of mastering]. *Emissiya i stok parnikovykh gazov na territorii severnoi Evrazii* : tez. dokl. II Mezhdunar. konf. (Pushchino, 16–20 June, 2003). Pushchino, 2003. P. 90 (in Russ.).

12. Vomperskii S. E., Kovalev A. G., Glukhova T. V., et al. Emissiya dioksida ugleroda i metana s poverkhnosti pochv lesnykh i bolotnykh ekosistem raznoi uvlazhnennosti v podzone yuzhnoi taigi Evropeiskoi territorii Rossii [Emission of dioxide of carbon and methane from the surface of soils of forest and bog ecosystems of different moisture in subregion of south taiga European territory of Russia]. *Emissiya i stok parnikovykh gazov na territorii severnoi Evrazii* : tez. dokl. nats. konf. s mezhdunar. uchastiem (Pushchino, 20–24 Novemb., 2000). Pushchino, 2000. P. 83 (in Russ.).

13. Ikkonen E. N. Vliyanie osusheniya na intensivnost' vydeleniya SO_2 mezooligotrofnym bolotom Yugo-Vostochnoi Fennoskandii [Influence of drainage on intensity of selection of CO_2 the meso-oligotrophic bog of South-east Fennoscandia] : avtoref. diss. ... kand. biol. nauk : 03.00.16. Petrozavodsk, 2000.

14. Mojeremane W. Effects of site preparation for afforestation on soil properties and greenhouse gas emission : a thesis submitted for the degree of doctor of philosophy. Edinburgh, 2009.

15. Danevcic T., Mandic-Mulec I., Stres B., et al. Emissions of CO_2 , CH_4 and N_2O from Southern European peat lands. *Soil Biology & Biochemistry*. 2010. Vol. 42. P. 1437–1446.

16. Jansen E. The effects of land use, temperature and water level fluctuations in the emission of nitrous oxide (N_2O), carbon dioxide (CO_2) and methane (CH_4) from organic soil cores in Iceland. M. Sc. : thesis in environment and resources. Reykjavik, 2008.

17. Hendriks R. F. A., Wolleswinkel R. J., van den Akker Alterra J. J. H. Predicting greenhouse gas emission from peat soils depending on water management with the SWAP – ANIMO model. *Peatland and Climate*. Wageningen, 2006. P. 583–586.

18. Langeveld C. A., Segers R., Dirks B. O. M., et al. Emissions of CO_2 , CH_4 and N_2O from pasture on drained peat soils in the Netherlands. *Europ. J. Agron.* 1997. Vol. 7 (1). P. 35–42. DOI: 10.1016/S1161-0301(97)00036-1.

19. Regina K., Syvasalo E., Hunnukkala A., et al. Fluxes of N_2O from farmed peat soils in Finland. *Europ. J. Soil Sci.* 2004. Vol. 55, issue 3. P. 591–599. DOI: 10.1111/j.1365-2389.2004.00622.x.

Статья поступила в редколлегию 18.11.2016.
Received by editorial board 18.11.2016.