

Вплив змін клімату на емісію парникових газів (CO₂, N₂O) із ґрунтів агроєкосистем

*Анатолій Польовий*¹

д. геогр. н., професор, зав. кафедри агрометеорології та агроєкології

¹ Одеського державного екологічного університету,

вул. Львівська, 15, Одеса, 65016, Україна,

e-mail: apolevoy@te.net.ua,  <https://orcid.org/0000-0001-8395-0068>;

*Олександр Микитюк*²

к. біол. н., доцент, виконавчий директор

² Міжнародної благодійної організації, Інститут розвитку територіальних громад,

вул. Лютеранська, 21/12, Київ, 01024, Україна,

e-mail: alex.mykytiuk@icdu.kiev.ua,  <https://orcid.org/0000-0002-0141-8586>;

*Людмила Божко*¹

к. геогр. н., доцент, кафедра агрометеорології та агроєкології,

e-mail: bozko@i.ua,  <https://orcid.org/0000-0002-8712-2099>;

*Олена Барсукова*¹

к. геогр. н., доцент, кафедра агрометеорології та агроєкології,

e-mail: lana5933@ukr.net,  <https://orcid.org/0000-0002-9054-142x>

В статті наводяться результати чисельних експериментів з комплексною моделлю емісії парникових газів із ґрунтів агроєкосистеми озимої пшениці з використанням кліматичного сценарію RCP4.5. Класифікація умов вегетації сільськогосподарських культур дозволила звести різноманіття їх режимів до певних типів погоди, що характеризує спільність умов формування врожаю навесні та влітку, завдяки чому виділяють так звані «сухі» та «вологі» роки. Оцінка майбутніх (2021–2050 рр.) агрометеорологічних умов весняно-літньої вегетації озимої пшениці показала, що температура повітря за період вегетації культури буде нижчою від середніх багаторічних даних (1991–2020 рр.) і становитиме 12,9 °С, що на 1,5 °С нижче, ніж за базовий період. Очікується зменшення кількості опадів на 21 %. Наводиться типізація умов вегетації культури. Встановлено тенденції зміни температури повітря та кількості опадів протягом вегетації озимої пшениці, які очікуються в різні за зволоженістю роки. Інтенсивність викидів парникових газів залежить від типу зволоження періоду вегетації. У «посушливі» роки на початку вегетації емісія CO₂ становитиме 0,044–0,079 т C-CO₂ га⁻¹ д⁻¹, що значно вище середніх багаторічних значень та майже вдвічі вище, ніж у «вологі» роки. Навесні на початку вегетації як правило рівень вологості орного шару ґрунту досить високий, що зумовлюватиме формування анаеробних умов та високий рівень емісії N₂O. Зростання посушливості зменшує рівень потоків N₂O. Для «посушливих» років за рахунок досить високого рівня весняної вологи в орному шарі на початок вегетації рівень емісії N₂O буде досить високим (0,061–0,089 кг N-N₂O га⁻¹ д⁻¹). У подальшому його рівень суттєво знижуватиметься. Для «вологіх» років підвищений рівень вологості орного шару ґрунту створить сприятливі умови для формування емісії N₂O (0,096–0,148 кг N-N₂O га⁻¹ д⁻¹). Встановлено загальні закономірності вегетаційного ходу емісії CO₂ та N₂O в середньому багаторічному та в різні за умовами зволоженості роки.

Ключові слова: моделювання, емісія, двоокис вуглецю, ґрунт, закис азоту, агроєкосистема, температура повітря, опади, вологість ґрунту.

Як цитувати: Польовий Анатолій. Вплив змін клімату на емісію парникових газів (CO₂, N₂O) із ґрунтів агроєкосистем / Анатолій Польовий, Олександр Микитюк, Людмила Божко, Олена Барсукова // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, серія «Геологія. Географія. Екологія», 2023. – Вип. 58. – С. 202–216. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2023-58-16>

In cites: Polevoy Anatoly, Mykytiuk Alexander, Bozhko Lyudmila, Barsukova Elena (2023). The climate change impact on greenhouse gas emissions (CO₂ and N₂O) from soils at agroecosystems. Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, series "Geology. Geography. Ecology", (58), 202-216. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2023-58-16> [in Ukrainian]

Вступ. Ґрунти агроєкосистем є значним джерелом парникових газів, надходження яких в атмосферу формує потенціал глобального потепління. Під його впливом змінюються агрокліматичні умови вирощування сільськогосподарських культур, відбувається зміна фотосинтетичної продуктивності рослин. В останні 30 років ця проблема досить широко і повно висвітлюється в численних світових публікаціях для різних кліматичних зон світу, в тому числі, і для ґрунтово-кліматичних умов України [1-5, 28]. Моделювання

впливу зміни клімату на продуктивність сільськогосподарських культур спирається, з одного боку, на побудову різноманітних математичних моделей продукційного процесу рослин, які враховують вплив факторів зовнішнього середовища, що змінюються, на формування продуктивності агроєкосистем, а з іншого, на отримані різними способами кліматичні сценарії, що проєктуються на період вегетації культурних рослин.

Одночасно з цим вивчається і проблема емісії парникових газів, серед яких найбільш агре-

сивними є CO_2 , CH_4 та N_2O . Емісія парникових газів із ґрунтів агроєкосистем визначається впливом комплексу екологічних факторів на сукупність біологічних і фізико-хімічних процесів у ґрунтах. У фундаментальному огляді [25] узагальнено та оцінено методи, які застосовуються для оцінки викидів CO_2 та N_2O у сільськогосподарських ґрунтах. У всебічному, широкому аналізі [30] розглядаються процеси, пов'язані з викидами ґрунтів, та їх параметри впливу.

Кількісна оцінка викидів парникових газів експериментальними методами досить складна і вимагає значного часу для аналізу результатів емпіричних досліджень. Подолання цих проблем можливе при використанні моделей комп'ютерного моделювання, які пропонують широкі можливості для оцінки та прогнозування викидів парникових газів.

Так, в роботі [23] за допомогою моделі StopSyst [12], яка являє собою біофізичну модель системи землеробства, що імітує процеси вирощування сільськогосподарських культур, а також цикли води та азоту, було оцінено вплив змін клімату на викиди парникових газів. При цьому порівнювались базовий історичний період 1980–2010 рр. з трьома майбутніми періодами: 2015–2045 рр., 2035–2065 рр. і 2055–2085 рр. Невизначеність майбутнього клімату була зафіксована за допомогою 12 моделей загальної циркуляції (МОЦ), доповнених двома репрезентативними траєкторіями концентрації вуглекислого газу (RCP 4.5 та 8.5). Розглядалися сільськогосподарські угіддя Тихоокеанського Північного Заходу США стосовно культури пшениці.

В агроєкосистемах Середземномор'я є обмежена інформація про можливий вплив змін клімату на викиди N_2O із ґрунту за різних видів землекористування. У статті [10] наведено дослідження моделювання з подвійною метою. По-перше, біогеохімічна модель ґрунт–рослина DayCent [17], яка досить широко використовувалась для моделювання довгострокової реакції екосистем на зміни клімату, була оцінена для прогнозування викидів N_2O з ґрунту за різних видів землекористування в типовій середземноморській агроєкосистемі. По-друге, дослідження було спрямоване на визначення впливу змін клімату на викиди N_2O з ґрунту за різних видів землекористування у Середземномор'ї за 85-ти річний період. Для моделювання змін клімату програма DayCent використовувалась зі збагаченням атмосфери CO_2 та без нього з використанням кліматичних даних із моделі CGCM2-A2. Майже одночасно були оцінені викиди парникових газів в середземноморському кліматі на основі метааналізу [27].

Для умов Канади [21] вплив майбутніх змін клімату на викиди парникових газів оцінювався за

допомогою відкаліброваної та перевіреної моделі RZWQM2. Модель RZWQM2 [26] була використана стосовно історичного періоду (1971–2000 рр.), а також для майбутнього періоду (2038–2070 рр.) з використанням даних, отриманих з глобальних кліматичних моделей в поєднанні з регіональними кліматичними моделями.

В умовах Швейцарії [29] за допомогою моделювання DayCent вивчався довгостроковий вплив методів управління ґрунтом та їх взаємодію на викиди парникових газів, а також інтенсивність викидів парникових газів за швейцарських систем землеробства. На основі експериментальних даних були визначені параметри моделі та проведена її оцінка для імітації продуктивності сільськогосподарських культур, динаміки ґрунтового вуглецю та викидів N_2O у ґрунті за різних методів управління та кліматичних умов.

Дві емпіричні моделі, MCROPS та MGRASS, були розроблені для орних земель та пасовищ [31]. Підтверджений набором незалежних даних, MCROPS показує, що весняна температура та літні опади пояснюють 35% дисперсії річних викидів N_2O з орних земель. У MGRASS норма внесення азотних добрив та зимова температура пояснюють 48% дисперсії щорічних викидів N_2O з пасовищ. Використовуючи довгострокові спостереження за кліматом (1900–2000 рр.), чутливість моделей з урахуванням мінливості клімату оцінюється порівнянням річного прогнозу моделі з точністю, отриманою у процесі перевірки. MCROPS може фіксувати міжрічну мінливість викидів N_2O з орних земель.

В умовах Бразилії [35] модель DayCent використовувалась для прогнозування змін біомаси сільськогосподарських культур, запасів вуглецю у ґрунті та потоків N_2O у великому сільськогосподарському районі Бразилії. Модель була відкалібрована та перевірена з використанням наборів даних 30-річних експериментів. Було проведено моделювання існуючих та альтернативних методів управління до 2100 року з використанням кліматичних сценаріїв MGEIK A2 та B1.

В умовах Польщі [33] викиди парникових газів були змодельовані за допомогою сівозмін, які зазвичай використовуються у східній Польщі для традиційних і консервативних систем обробітку ґрунту. Використовувалась модель денітрифікації DNDC [23], яка складається з шести підмоделей для моделювання клімату ґрунту, росту рослин, розкладання, нітрифікації, денітрифікації та ферментації та описує виділення закису азоту (N_2O) і вуглекислого газу (CO_2) із сільськогосподарських ґрунтів. Для виконання розрахунків використовувались два майбутні кліматичні сценарії (2030 і 2050). Визначались викиди парникових газів з посівів кукурудзи, ріпаку, ярої та озимої пшениці.

Слід зауважити, що як і модель DayCent [16, 17], модель DNDC [24] широко використовується для регіональних досліджень моделювання в Європі, США, Канаді, Китаї, Індії [33].

Мета. Оцінити потенційні зміни викидів CO₂ та N₂O із ґрунтів агроєкосистеми під впливом змін температурного режиму та зростання посушливості за глобальних змін клімату (на прикладі Східної України – Біловодськ Луганської області).

Матеріали та методи. В основу дослідження покладено матеріали агрометеорологічних спостережень гідрометеорологічної станції Біловодськ за період 1991–2020 рр. та сценарій зміни клімату RCP 4.5 [2] на період 2021–2050 рр. Як теоретична основа для оцінки реакції озимої пшениці на зміну агрокліматичних умов вирощування використовувалась комплексна модель емісії парникових газів із ґрунтів агроєкосистем [6], яка дозволяє кількісно оцінити вплив змін клімату на формування урожаю та щорічну динаміку емісії CO₂ та N₂O з ґрунтів агроєкосистеми в конкретних сценаріях землекористування та сівозміни. Модель використовувалась для оцінки викидів парникових газів як для історичного періоду (1991–2020 рр., так і для майбутнього періоду

(2021–2050 рр.)).

Результати. Умови виконання досліджень. Для виконання чисельних експериментів з комплексною моделлю були використані матеріали спостережень гідрометеорологічної станції Біловодськ, яка розташована в Східній Україні (координати: 49°13' північної широти, 39° 35' східної довготи, висота над рівнем моря 75 м.), а також кліматичний сценарій RCP 4.5. Ґрунти – чорнозем звичайний, легкоглинистий та важкосуглинковий. Ґрунти характеризуються високим вмістом часток менше 0,01 мм (53,3–64,1 %), вмістом вуглецю (44,5–69,2 т га⁻¹), гумусу (3,0–4,93 %), рН ґрунту (7,2–8,1), вмістом легкогідролізуемого азоту (114–137 мг кг⁻¹) та об'ємною щільністю ґрунту (1,21–1,28 г см⁻³).

Стрімке підвищення температури повітря, яке відбувалось в останні 30 років, призвело до суттєвих змін агрокліматичних умов вирощування озимої пшениці. Так, середня за період весняно-літньої вегетації цієї культури температура повітря в 1991-2020 роках підвищилась до 14,4 °С, кількість опадів за період значно не змінилась і становила 172 мм. Гідротермічний коефіцієнт Селянинова (ГТК) становив 0,72 відн. од., що характеризує цей період як посушливий (табл. 1).

Таблиця 1/ Table 1

Статистичні характеристики показників агрометеорологічних умов весняно-літньої вегетації озимої пшениці за період 1991–2020 рр. та очікуваних за сценарієм змін клімату RCP4.5 на період 2021–2050 рр. / Statistical characteristics of indicators of agrometeorological conditions of spring-summer vegetation of winter wheat for the period 1991–2020 and expected under the scenario of climate change RCP4.5 for the period 2021–2050

№ п/п	Показники	Період весняно-літньої вегетації озимої пшениці							
		1991–2020 рр.				2021–2050 рр.			
		температура повітря, °С	кількість опадів, мм	запаси вологи в шарі 0-20 см, мм	ГТК, відн. од.	температура повітря, °С	кількість опадів, мм	запаси вологи в шарі 0-20 см, мм	ГТК, відн. од.
1	Кількість випадків	30	30	30	30	30	30	30	30
2	Середнє	14,43	171,70	34,73	0,72	12,92	136,46	33,87	0,57
3	Медіана	14,38	182,00	33,09	0,71	12,70	130,25	32,30	0,48
4	Мода	14,12	144,00	21,34	0,75	12,40	108,30	16,00	0,84
5	Стандартне відхилення	1,04	47,80	7,85	0,27	1,22	50,04	1,84	0,28
6	Коефіцієнт варіації, %	7,19	27,84	22,60	36,86	9,44	36,67	34,94	48,99
7	Асиметрія	0,34	-0,25	0,547	0,419	0,71	0,83	0,352	1,19
8	Ексцес	0,07	-0,47	-0,30	-0,32	1,04	-0,23	-0,76	1,41
9	Діапазон	4,35	189,00	32,11	1,01	5,60	180,00	40,30	1,17
10	Мінімум	12,64	69,00	21,34	0,30	10,70	66,10	16,0	0,25
11	Максимум	16,99	258,00	53,45	1,31	16,30	246,10	56,30	1,42

Порівняння з очікуваними за сценарієм змінами клімату на період 2021–2050 рр. дозволяє зробити висновок, що температура повітря за період вегетації культури буде нижчою від середніх багаторічних даних і становитиме 12,9 °С, що на 1,5 °С нижче, ніж за базовий період. Це пояснюється тим, що початок вегетації озимої пшениці зміщується на більш ранні терміни у зв'язку з чим перша половина весняно-літньої вегетації буде проходити на фоні знижених температур повітря.

Відповідно зменшаться абсолютні величини медіани і моди середньої за вегетацію озимої пшениці температури повітря (табл. 1). За показниками стандартного відхилення відбуватиметься підвищення цього показника на 15 % порівняно з базовим періодом. Зростає також і коефіцієнт варіації від 7,19 % до 9,44 %.

Спостерігатиметься правостороння асиметрія функції розподілу значень середньої температури повітря, яка зміститься в сторону більш високих температур. Збільшиться діапазон зміни температури повітря від 4,3 до 5,6 °С. Майже на 2 °С очікується зменшення мінімального значення температури повітря та також стане меншим максимальне значення.

На фоні зниження температури повітря очікується зменшення кількості опадів на 21 %, що становитиме 136,5 мм. При цьому варіація опадів збільшиться. Суттєво зменшиться значення медіани та моди функції розподілу. Коефіцієнт варіації зростає від 27,84 % за базовий період до 36,67 % за сценарієм зміни клімату. Зростає кількість випадків зі значно меншою кількістю опадів за період вегетації пшениці. Якщо, наприклад, кількість опадів менше 150 мм за базовий період становила 30 %, то відповідно до сценарію зміни клімату очікується, що їх кількість становитиме 75 %. Відбудеться деяке зменшення діапазону зміни кількості опадів та зменшення їх мінімальної та максимальної величини.

Як видно з даних табл. 1, запаси продуктивної вологи в орному шарі ґрунту в період вегетації озимої пшениці за середніми значеннями досить близькі в базовий та сценарний періоди, відповідно 35 мм та 34 мм, але розподіл їх значно відрізняється. Для сценарного періоду буде характерним значне збільшення мінливості цієї характеристики: на 51 % збільшиться стандартне відхилення, на 54% зростає коефіцієнт варіації. В період 2021–2050 рр. мінімальна величина середніх значень запасів вологи в орному шарі ґрунту зменшиться до 16 мм в той час як максимальна величина перевищуватиме базове значення і становитиме 56 мм. Таким чином, діапазон зміни характеристики збільшиться від 32 мм до 40 мм.

Відповідно зменшенню кількості опадів збільшиться і посушливість умов вегетації озимої

пшениці. Величина ГТК (табл. 1, рис. 1) зменшиться до 0,57 відн.од., що є ознакою середньої посухи, варіація цього показника зростає до 49% порівняно з 36,9 % в базовий період. Буде характерним збільшення кількості випадків з ГТК менше 0,4 відн.од., що є ознакою дуже сильної посухи. Кількість випадків з ГТК менше 0,4 відн. од. зростає до 35 % (рис. 1б), в той час як у базовий період їх кількість складала 14 % (рис. 1а). Загальна кількість випадків з сильною посухою (ГТК менше 0,5 відн.од.) очікуватиметься в 53 % випадків порівняно з 20 % у базовому періоді.

Для врахування особливостей вегетаційного періоду озимої пшениці була виконана типізація погодних умов з метою звести різноманіття різних режимів до визначених типів погоди, які характеризують спільність умов формування урожаю у весняно-літній період. В якості критерію оцінки типу погоди була прийнята кількість опадів за вегетацію: випадки з кількістю опадів менше 60 % від середнього багаторічного значення приймалися за «посушливі» роки, при кількості опадів більше середньої багаторічної величини – за «вологі» роки.

Тенденції зміни температури повітря протягом вегетації озимої пшениці будуть в різні за зволоженістю роки досить схожі (рис. 2). Зростання температури повітря від початку вегетації відбуватиметься поступово, при цьому зберігатиметься стійке співвідношення: середня декадна багаторічна температура > температура «посушливого» року > температура «вологого» року.

Виняток складатимуть третя та четверта декади вегетації, які характеризуватимуть період «вихід в трубку - початок стеблуння», коли температура «вологого» року перевищуватиме температуру «посушливого» року.

Динаміка опадів буде ще більш показовою (рис. 3). У «вологі» роки перші чотири декади кількість опадів суттєво перевищуватиме середні багаторічні значення і становитиме 161–210 % від цієї величини. В п'яту декаду кількість опадів буде дещо меншою (127 % від середнього значення). І тільки в шосту декаду їх кількість буде недостатньою і становитиме 81 % від багаторічного значення. Сьома та восьма декади вегетації відрізнятимуться збільшенням кількості опадів від 136 до 144 %. Для кінцевої декади вегетації очікується зменшення кількості опадів до 52 % від середнього багаторічного значення.

Кількість опадів у «посушливі» роки перші чотири декади становитиме 23–58 % від середніх багаторічних значень, у п'ятій декаді вона зростає до 87 %, потім зменшиться до 39 %. Значне збільшення кількості опадів до 100 % відбудеться у сьому декаду. В подальшому кількість опадів очікуватиметься на рівні до 50–88 % від середньої

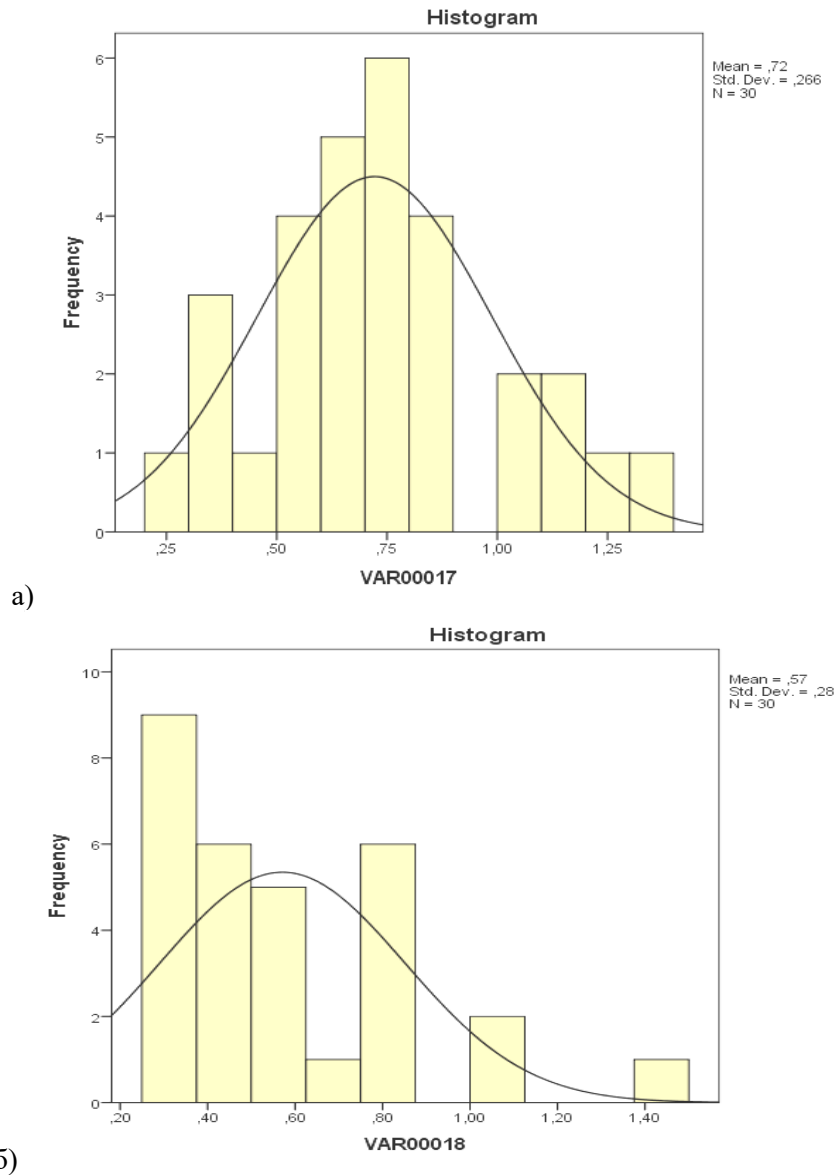


Рис.1. Порівняння гістограм розподілу кількості років з різними значеннями ГТК Селянинова:
 а) 1991–2020 рр.; б) 2021–2050 рр. Біловодськ /
 Fig. 1. Comparison of the histograms of the distribution of the number of years with different values of
 Selyaninov's GTC: а) 1991–2020; б) 2021–2050 Bilovodsk

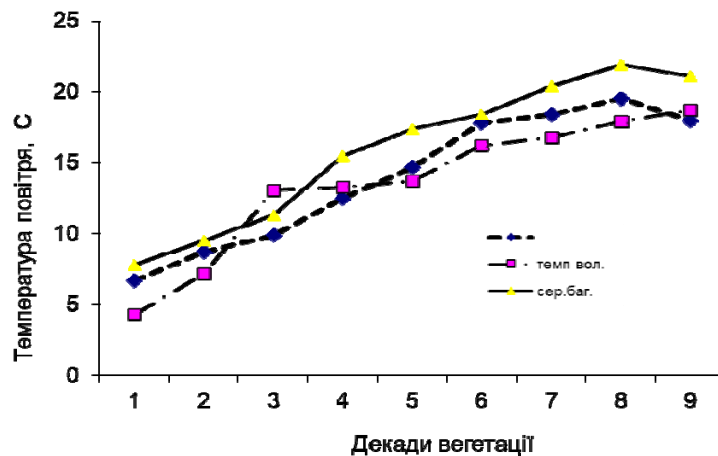


Рис. 2. Порівняння очікуваної за сценарієм зміни клімату RCP4.5 температури повітря в «посушливий» і «вологий» роки в період 2021–2050 рр. із середньою багаторічною за 1991–2021 рр. /
 Fig. 2. Comparison of air temperature expected under the RCP4.5 climate change scenario in "dry" and
 "wet" years in the period 2021–2050 with the multi-year average for 1991–2021

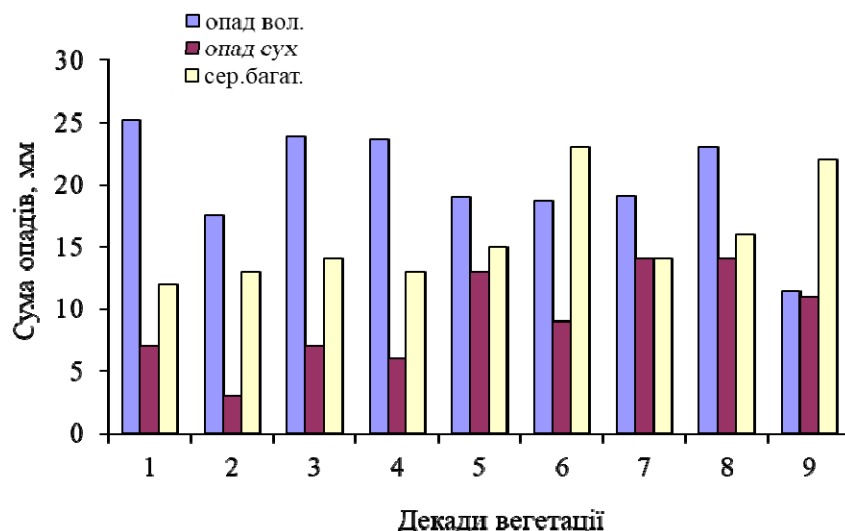


Рис. 3. Порівняння очікуваної за сценарієм зміни клімату RCP4.5 сум опадів у «посушливі» та «вологі» роки в період 2021–2050 рр. із середніми багаторічними за 1991–2021 рр. /

Fig. 3. Comparison of the amount of precipitation expected under the RCP4.5 climate change scenario in "dry" and "wet" years in the period 2021–2050 with the multi-year average for 1991–2021

багаторічної величини.

Тип зволоження періоду вегетації озимої пшениці на фоні поступового підвищення температури повітря з початку вегетації культури впродовж подальшого періоду розвитку рослин в значній мірі впливатиме на інтенсивність викидів парникових газів. Так, у «посушливі» роки (рис. 4) на початку вегетації (до п'ятої декади вегетації включно) емісія CO_2 становитиме 0,044-0,079 т

$\text{C-CO}_2 \text{ га}^{-1} \text{ д}^{-1}$, що значно вище середніх багаторічних значень та майже вдвічі вище, ніж у «вологі» роки. З шостої декади і до кінця вегетації рівень емісії CO_2 зростає від 0,107 до 0,154 т $\text{C-CO}_2 \text{ га}^{-1} \text{ д}^{-1}$. У «вологі» роки це збільшення становитиме 0,046–0,129 т $\text{C-CO}_2 \text{ га}^{-1} \text{ д}^{-1}$. Загальною закономірністю буде зростання викидів CO_2 протягом весняно-літньої вегетації озимої пшениці від початку вегетації до фази воскової стиглості. Ця закономір-

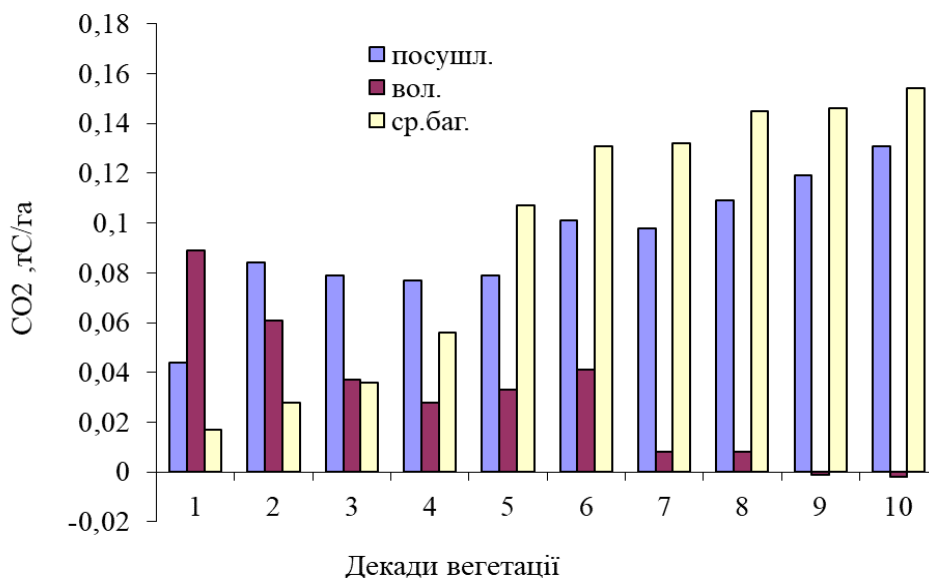


Рис. 4. Порівняння очікуваної за сценарієм зміни клімату RCP 4.5 динаміки декадних викидів CO_2 в «посушливі» та «вологі» роки в період весняно-літньої вегетації озимої пшениці із середньою багаторічною динамікою /

Fig. 4. Comparison of the dynamics of decadal CO_2 emissions expected under the RCP 4.5 climate change scenario in "dry" and "wet" years during the spring-summer vegetation period of winter wheat with the average multi-year dynamics

ність досить чітко простежується і для середніх багаторічних умов, але рівень емісії CO_2 буде значно вищим порівняно з «посушливими» та «вологими» роками. Це пояснюється тим, що у багаторічному розрізі спостерігається більш високий рівень температури повітря протягом вегетації.

Для динаміки потоків N_2O за середніх багаторічних умов було характерним зменшення рівня протягом вегетації. Навесні на початку вегетації як правило рівень вологості орного шару

грунту досить високий, що зумовлює формування анаеробних умов (рис. 5). В свою чергу вони визначають рівень емісії N_2O .

Протягом вегетації відбувається зменшення вологості ґрунту, що відповідно зменшує рівень потоків N_2O . У «посушливі» роки (рис. 5), незважаючи на невелику кількість опадів, за рахунок досить високого рівня весняної вологи орного шару на початок вегетації рівень емісії N_2O буде досить високим ($0,061\text{--}0,089 \text{ кг N-N}_2\text{O га}^{-1} \text{ д}^{-1}$).

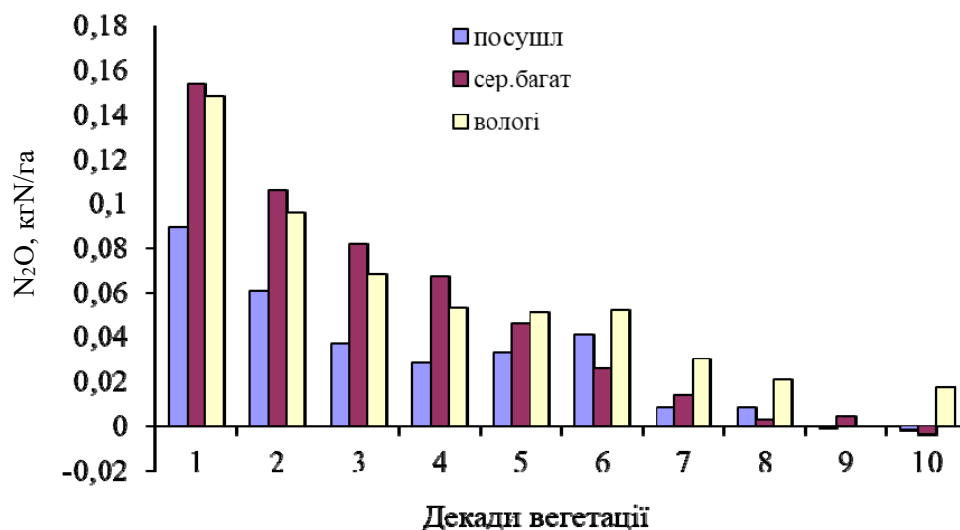


Рис. 5. Порівняння очікуваної за сценарієм зміни клімату RCP 4.5 динаміки декадної емісії N_2O у "посушливі" та "вологі" роки весняно-літньої вегетації озимої пшениці із середньою багаторічною динамікою /

Fig. 5. Comparison of the dynamics of the decadal emission of N_2O expected under the RCP 4.5 climate change scenario in the "dry" and "wet" years of the spring-summer vegetation of winter wheat with the average multi-year dynamics

У подальшому його рівень знижуватиметься до $0,037$ (третя декада вегетації), а потім (четверта декада) до $0,028 \text{ кг N-N}_2\text{O га}^{-1} \text{ д}^{-1}$. Досить значна кількість опадів у п'яту та шосту декади вегетації поповнюватимуть запаси вологи в орному шарі ґрунту, які зумовлять деяке зростання емісії N_2O до рівня $0,033\text{--}0,041 \text{ кг N-N}_2\text{O га}^{-1} \text{ д}^{-1}$. В подальшому рівень емісії буде значно зменшуватись. У «вологі» роки (рис. 5) погодні умови будуть складатися таким чином, що буде спостерігатись підвищена вологість орного шару ґрунту, яке створить сприятливі умови для формування емісії N_2O (рис. 5).

На початку вегетації (перші три декади) рівень емісії N_2O буде складати $0,096\text{--}0,148 \text{ кг N-N}_2\text{O га}^{-1} \text{ д}^{-1}$. Зменшення кількості опадів в п'ятій-шостій та сьомій декадах призведе до деякого зменшення вологості орного шару ґрунту, що обумовить дещо менший рівень викидів N_2O в цей період ($0,051\text{--}0,053 \text{ кг N-N}_2\text{O га}^{-1} \text{ д}^{-1}$). Прикінцеві декади вегетації характеризуються подальшим зменшенням емісії N_2O . Загальною законо-

мірністю вегетаційного ходу викидів N_2O є зменшення їх кількості з початку вегетації озимої пшениці до її завершення.

Узагальнена характеристика агрометеорологічних умов весняно-літньої вегетації озимої пшениці та величини очікуваних за сценарієм змін клімату RCP4.5 для періоду 2021–2050 рр. викидів парникових газів в різні за зволоженням роки надається в табл. 2. Із наведених в табл. 2 даних видно, що в порівнянні з середніми багаторічними даними за осередненими показниками вегетація озимої пшениці буде відбуватись при більш низьких температурах повітря і в «посушливі», і у «вологі» роки. Ця різниця складатиме для «посушливих» років $0,3 \text{ }^\circ\text{C}$, а для «вологіх» – $1,1 \text{ }^\circ\text{C}$.

Зміняться і умови зволоження. Кількість опадів у «посушливі» роки зменшиться на $43,3 \%$, а у «вологі» роки збільшиться на 14% . Відповідно відбудеться зміна зволоження орного шару ґрунту: у «посушливі» роки запаси продуктивної вологи в орному шарі ґрунту зменшаться на $48,4 \%$, а у «вологі» роки збільшаться на $30,5 \%$. Змен-

шення запасів органічного вуглецю у «посушливі» роки суттєво сповільниться (на 61,7 %), а у «вологі» роки прискориться на 19,9 %. Рівень викидів CO₂ буде нижчим як у «посушливі», так і у «вологі» роки порівняно з середніми багаторічними значеннями, причому для «вологіх» років це зменшення емісії CO₂ буде досить суттєвим (на 39,2 %).

Емісія N₂O у «посушливі» роки буде менше порівняно з середнім багаторічним значенням (на 35,1 %), а у «вологі» роки вона підвищиться на 15,5 %. В цілому загальна емісія парникових газів в перерахунку на CO₂-еквівалент скоротиться у «посушливі» роки на 6,2 %, а у «вологі» роки – на 32,3 %.

Таблиця 2 / Table 2

Порівняння очікуваних за сценарієм змін клімату RCP4.5 для періоду 2021–2050 рр. агрометеорологічних умов весняно-літньої вегетації озимої пшениці та викидів парникових газів з ґрунтів цієї агроєкосистеми в різні за зволоженням роки з середніми багаторічними даними (1991-2020 рр.) /

Comparison of the agro-meteorological conditions of the spring-summer vegetation of winter wheat and greenhouse gas emissions from the soils of this agro-ecosystem in years with different levels of moisture with average multi-year data (1991-2020)

	Осереднені показники за весняно-літній період вегетації озимої пшениці	Періоди, роки		
		1991–2020 рр.	2021–2050 рр.	
		середні багаторічні	«посушливі» роки за кліматичним сценарієм	«вологі» роки за кліматичним сценарієм
1	Середня температура повітря, °C	13,8	13,5	12,7
2	Кількість опадів, мм	168,0	95,4	190,9
3	Запаси продуктивної вологи в орному шарі ґрунту, мм	38,0	19,6	49,6
4	Гідротермічний коефіцієнт, відн. од.	0,74	0,49	0,87
5	Зменшення запасів органічного вуглецю, кг /га	430,0	164,7	515,6
6	Емісія CO ₂ , т С/га	0,952	0,932	0,579
7	Емісія N ₂ O, кг N/га	0,464	0,301	0,536
8	Загальна емісія парникових газів, CO ₂ -еквівалент, т/га	1,090	1,022	0,738

Дискусія. Для отримання прогнозних оцінок емісії парникових газів використовуються різноманітні комплексні моделі різного рівня складності з використанням кліматичних сценаріїв різної завчасності. Моделі швидко та ефективно прогнозують викиди та надають цінну інформацію про реалізацію відповідних стратегій скорочення викидів парникових газів в сільському господарстві. Особливістю застосування цих моделей є те, що вони надають змогу отримувати оцінку ефективності заходів, спрямованих на скорочення викидів парникових газів, та визначати стратегію адаптації сільського господарства для скорочення викидів парникових газів, тим самим вносячи посильний внесок у протидію змінам клімату.

В умовах Середземномор'я [10] для моделювання зміни клімату використовувалась модель DayCent [16] з врахуванням збагачення атмосфери CO₂ та без нього з використанням кліматичних даних із моделі CGCM2-A2. Для різних сценаріїв землекористування та клімату річні куму-

лятивні викиди N₂O варіювалися від 126 до 642 г N₂O-N га⁻¹ рік⁻¹. За змодельований 85-ти річний (2020–2100 рр.) період, зміна клімату зменшить викиди N₂O із ґрунту у всіх трьох видах землекористування. Водночас в умовах зміни клімату значення заповненого водою порового простору (WFPS) зменшилися від 40 до 15 % залежно від сценарію землекористування та зміни клімату. Це дослідження продемонструвало здатність моделі DayCent моделювати викиди N₂O з ґрунту в різних видах землекористування. Згідно з прогнозами моделей, в умовах Середземномор'я зміна клімату призведе до скорочення викидів N₂O у ряді видів землекористування.

Результати, отримані в [23] показали, що в умовах Тихоокеанського Північного Заходу США райони з великою кількістю опадів, азотних добрив та мінералізації виробляють більше викидів N₂O як у базовий, так і у майбутній періоди. Середньорічні викиди N₂O протягом базового періоду становили від 1,8 до 4,1 кг/га залежно від типу землекористування. Загальні викиди N₂O

показали майбутні тенденції до зниження з 2030-х по 2070-і роки внаслідок вищої частки азоту, використовуюваного сільськогосподарськими культурами. З 2015 до 2085 років відповідно до кліматичного сценарію RCP4.5 середні викиди N_2O становитимуть 1,8 – 4,4 кг N_2O-N га⁻¹ рік⁻¹.

Вміст органічного вуглецю в ґрунті (SOC) знизиться [23] протягом базового періоду, тоді як SOC не досяг рівноваги із системами землеробства, розглянутими у дослідженні. SOC зменшився і в наступні періоди зі швидкістю зміни від -146 до -352 кг га⁻¹ рік⁻¹ залежно від системи землеробства та кліматичного сценарію. Потепління збільшило окислення SOC у майбутніх сценаріях, але після початкового збільшення втрат SOC у період 2030-х років швидкість втрат SOC знизиться у 2050-х роках і переважно у 2070-х роках, коли SOC та надходження вуглецю досягнуть рівноваги із втратами. Більш високе надходження вуглецю зумовлено більшим накопиченням біомаси у сценаріях з підвищеним рівнем викидів CO_2 .

Загальні викиди парникових газів становили згідно кліматичному сценарію RCP 4.5 1,95; 3,16 та 4,84 Мг CO_2 -екв. га⁻¹ рік⁻¹ та згідно RCP 8.5 1,99, 3,43 та 5,49 Мг CO_2 -екв. га⁻¹ рік⁻¹ протягом 2070-х років при різних системах землеробства [23].

В умовах Канади на осушених землях [21] для майбутнього періоду (2038–2070 рр.) у порівнянні з базовим (1971–2000 рр.) збільшаться викиди N_2O на 21 % за рахунок більшої денітрифікації та мінералізації, а також викиди CO_2 зростуть на 16 % за рахунок більшого накопичення біомаси урожаю, більш високої інтенсивності розкладання рослинних рештків та більшої мікробіологічної активності ґрунту. Прогнозується, що запаси органічного вуглецю в майбутньому будуть зменшуватись на 22 % швидше, що в свою чергу зумовить більш високий потенціал глобального потепління.

В роботі [20] модель денітрифікації-розкладання (DNDC) використовувалася для оцінки впливу зміни методів управління викидами N_2O у семи основних ґрунтових регіонах Канади для періоду із 1970 по 2029 рік. Перетворення орних земель на постійні пасовища призведе до найбільшого скорочення викидів N_2O , особливо у східній частині Канади, де модель оцінює викиди N_2O приблизно на 60% менше за такого перетворення. Більш високі викиди N_2O у східній Канаді, пов'язані з впровадженням нульової обробки ґрунту та з більш високою вологістю ґрунту, що викликає денітрифікацію, тоді як нижчі викиди у західній Канаді були пов'язані з меншим розкладанням органічної речовини ґрунту у не ораному ґрунті порівняно із звичайним зораним ґрунтом. Суттєві викиди відбувалися в роки з більшою вологістю ґрунту, коли N накопичувався. Розрахункове

чисте скорочення викидів парникових газів під час переходу з орних земель на постійні пасовища змінювалось для семи досліджуваних ґрунтових регіонів від 0,97 до 4,24 Мг CO_2 -екв. га⁻¹ рік⁻¹. При переході зі звичайного обробки ґрунту до нульової обробки ґрунту чисте скорочення викидів парникових газів коливалось для цих регіонів від 0,33 до 0,80 Мг CO_2 -екв. га⁻¹ рік⁻¹.

При вивченні довгострокового впливу методів управління ґрунтом на викиди парникових газів в Швейцарії [29] встановлено зменшення сумарних викидів до (1361–1792 кг CO_2 -екв. га⁻¹ рік⁻¹). Змодельовані чисті викиди парникових газів у ґрунті, розраховані для окремих видів обробки ґрунту протягом 30 років, становили від -594 до 1654 кг CO_2 -екв. га⁻¹ рік⁻¹. Найвищі чисті викиди парникових газів у ґрунті були передбачені для традиційної обробки ґрунту.

Для умов Бразилії [35] накопичення ґрунтового органічного вуглецю до 2100 р. (± 16 Мг С га⁻¹ вище за поточні 46 Мг С га⁻¹) прогнозувалось в системах землеробства з пасовищами незалежно від кліматичного сценарію. Згідно з прогнозами моделі, зміна клімату призведе до більшого відносного збільшення викидів N_2O при нульовій обробці ґрунту (з 27 % у B1 до 41 % у A2), але ці підвищені потоки все одно будуть нижчими, ніж викиди від обробки ґрунту, приблизно на 25 %.

Для оцінки можливих викидів парникових газів в умовах Польщі [33] використовувались два майбутні кліматичні сценарії (2030 і 2050). Розглядалися посіви кукурудзи, ріпаку, ярої та озимої пшениці. Було показано, що підвищення температури та зменшення кількості опадів може знизити чистий потенціал глобального потепління на 2 % за кліматичним сценарієм 2030 року та на 5% за сценарієм 2050 року при традиційній обробці ґрунту щодо базового сценарію. У разі ресурсозберігаючої обробки ґрунту розраховано зниження потенціалу глобального потепління на 5 % та на 10 %. Використання результатів ресурсозберігаючої обробки ґрунту знижує потенціал потепління на 17–19 % за базовим сценарієм, за сценарієм 2030 року на 16–18 %, а за сценарієм 2050 року на 15–17 %. Також було показано, що зміна кліматичних умов призвела до зниження виробництва біомаси озимої пшениці та кукурудзи.

В умовах Австралії [11] розглядалися зміни клімату на періоди до 2030, 2050 та 2070 рр. Встановлено, що в посушливих регіонах вплив кліматичних змін буде залежати від відносної реакції на температуру і висихання ґрунту. Припускається, що для нинішніх теплих і вологих тропічних і субтропічних регіонів викиди N_2O можуть збільшитися, тоді як для більш прохолодних і сухих регіонів викиди N_2O можуть зменшитися. Однак при зрошуваних системах прогнозована змі-

на клімату збільшить викиди N_2O .

На основі огляду польових досліджень емісії N_2O у Європі було визначено основні ґрунтові, кліматичні та управлінські заходи контролю викидів N_2O із сільськогосподарських мінеральних ґрунтів у Європейському Союзі [19]. Викиди азоту з орних ґрунтів західної частини ЄС становлять у середньому нижче $2 \text{ кг } N_2O-N \text{ га}^{-1} \text{ рік}^{-1}$ і рідко перевищують $5 \text{ кг } N_2O-N \text{ га}^{-1} \text{ рік}^{-1}$. Вони регулюються параметрами добрив, органічного вуглецю у верхньому шарі ґрунту та вмістом піску. У суббореальних європейських орних ґрунтах викиди N_2O варіюються в значно ширшому діапазоні від 0 до $27 \text{ кг } N_2O-N \text{ га}^{-1} \text{ рік}^{-1}$.

В роботі [15] використана модель FASSET, яка імітувала щоденний оборот вуглецю та азоту (N). Викиди N_2O залежали від мікробних і фізичних умов ґрунту. Модель була протестована на експериментальних даних про викиди N_2O з пасовищ у Великій Британії, Фінляндії та Данії, які відрізняються кліматичними умовами, властивостями ґрунту та управлінням. Модель змодельувала загальну динаміку викидів N_2O у часі та зафіксувала спостережуваний вплив використання добрив та гною на викиди. Викиди N_2O дещо збільшувалися за більш високих температур, у той час як збільшення річної кількості опадів зазвичай призводило до зменшення викидів. При внесенні невеликої кількості азотних добрив викиди склали $2-4 \text{ кг } N_2O-N \text{ га}^{-1} \text{ рік}^{-1}$.

Слід зазначити, що отримані нами за допомогою моделі [6] оцінки викидів парникових газів за весняно-літню вегетацію озимої пшениці в середньому за період 1991–2020 рр. добре узгоджуються з даними, отриманим для окремих сільськогосподарських культур та пасовищ. Так, наприклад, в умовах Європи [22] потік емісії CO_2 з ґрунту оцінюється з трав'янистої рослинності (пасовища) кількістю $0,52 \text{ т } CO_2-C \text{ га}^{-1}$ за рік. Для орних земель спостерігається більш високе значення емісії CO_2 ($0,84 \text{ т } CO_2-C \text{ га}^{-1}$ за рік). Для чорноземів Лівобережної частини України [7] середні значення потоків CO_2 під однорічними травами знаходяться на рівні $0,524-0,525 \text{ т } CO_2-C \text{ га}^{-1}$ за рік.

В умовах нечорноземної зони [9] отримано значення потоків CO_2 для агроєкосистем: ячменю $111-467 \text{ кг } C-CO_2 \text{ га}^{-1}$, люпину $429-1356 \text{ кг } C-CO_2 \text{ га}^{-1}$, пару $141-1033 \text{ кг } C-CO_2 \text{ га}^{-1}$, озимої пшениці $792-1259 \text{ кг } C-CO_2 \text{ га}^{-1}$. В умовах Флориди [18] за допомогою моделі DayCent [16] оцінено емісію парникових газів: для різних типів ґрунтів (пасовисько, енергокультури) отримано значення емісії CO_2 на рівні $500-800 \text{ г } C \text{ м}^{-2}$ за рік.

Отримані нами в модельних розрахунках значення потоків емісії CO_2 становлять $0,952 \text{ т } CO_2-C \text{ га}^{-1}$ за весняно-літній вегетаційний період

озимої пшениці, тобто вони не значно різняться від приведених вище експериментальних та розрахункових оцінок емісії CO_2 за вегетацію сільськогосподарських культур та пасовищ.

Середні багаторічні значення емісії N_2O за весняно-літній період вегетації озимої пшениці за нашими модельними розрахунками також співвідносяться з її оцінками, отриманими як експериментальним, так і модельним шляхом для різних сільськогосподарських культур. Так, в роботі [22] наводяться дані емісії N_2O для дев'яти орних ґрунтів Європи, яка складає $0,2-6,6 \text{ кг } N-N_2O \text{ га}^{-1} \text{ рік}^{-1}$. Для території Саксонії [14] за допомогою моделі DNDC була оцінена щорічна емісія N_2O з сільськогосподарських та лісових ґрунтів, яка становила відповідно $0,5-26,0$ та $0,04-19,7 \text{ кг } N-N_2O \text{ га}^{-1}$. Для умов Італії отримані значення емісії N_2O з овочевих культур. Вони складають $0,3 - 5,5 \text{ кг } N-N_2O \text{ га}^{-1}$ за сезон [13]. За даними [32] щорічні викиди N_2O із мінеральних ґрунтів становлять $0,3 - 10,7 \text{ кг } N-N_2O \text{ га}^{-1}$. В роботі [31] встановлено, що для пшениці емісія N_2O становила $0,5 - 3,7 \text{ кг } N-N_2O \text{ га}^{-1}$.

Наші модельні розрахунки оцінюють середньо багаторічні значення емісії N_2O за весняно-літній період вегетації озимої пшениці в розмірі $0,464 \text{ кг } N-N_2O \text{ га}^{-1}$. Ці дані досить задовільно узгоджуються з наведеними вище літературними даними, що відносяться до різних сільськогосподарських культур, в тому числі, і до пшениці.

Виконані нами розрахунки з застосуванням сценарію зміни клімату демонструють зменшення емісії CO_2 у майбутньому (період 2021–2050 рр.) як у «посушливі», так і у «вологі» роки порівняно з базовим періодом. Викиди N_2O скоротяться у «посушливі» роки, але зростуть у «вологі» роки. Загальна емісія парникових газів скоротиться до 2050 року.

Отримані тенденції викидів парникових газів узгоджуються з даними, отриманими для умов Європи. Так, довгострокове прогнозування показало, що в умовах Середземномор'я зміна клімату призведе до скорочення викидів N_2O у ряді видів землекористування [10]. Зменшення сумарних викидів при вивченні довгострокового впливу методів управління ґрунтом встановлено в Швейцарії [29]. Для умов Польщі було показано, що за сценаріями до 2030 та 2050 років може знизитись чистий потенціал глобального потепління [33].

Слід зауважити, що аналогічні висновки отримані при дослідженні впливу змін клімату на викиди парникових газів в умовах Канади [20], в той же час для органічних ґрунтів [21] отримано протилежний результат. Для умов Тихоокеанського Північного-Заходу США результати, отримані в [33] загальні викиди N_2O показали майбутні тенденції до зниження з 2030-х по 2070-і роки.

Для Південної Америки, що досить сильно відрізняється за ґрунтово-кліматичними умовами від Північної Америки, одержано протилежний результат [35].

Для різних за режимом опадів кліматичних регіонів Австралії очікується, що у вологих тропічних і субтропічних регіонах викиди N_2O можуть збільшитися, тоді як для більш прохолодних і сухих регіонів викиди N_2O можуть зменшитися [11]. На підставі результатів цієї роботи та результатів, отриманих для умов Бразилії [35] можна зробити висновок, що в умовах вологого клімату зміни кліматичних мов можуть привести до збільшення викидів N_2O , що добре узгоджується з результатами, отриманими нами для «вологих» років.

В той же час в більш посушливих умовах буде відбуватись зменшення викидів парникових газів та зменшення вмісту органічного вуглецю у ґрунті. В роботі [20] приводяться величини щорічного зменшення запасів органічного вуглецю від 146 до 352 кг С га⁻¹ рік⁻¹. У нашому дослідженні ця величина становила у «посушливі» роки 164,7 кг га⁻¹, а у «вологі» роки 515,6 кг га⁻¹. Що кореспондується з наведеними вище даними для Канади.

Висновки. На основі чисельних експериментів з комплексною моделлю емісії парникових газів із ґрунтів агроєкосистем та використанням кліматичного сценарію RCP 4.5 виконано оцінку викидів парникових газів з ґрунтів агроєкосистеми озимої пшениці весняно-літньої вегетації на період до 2050 року та встановлено закономірність вегетаційного ходу викидів N_2O .

Порівняння з очікуваними за сценарієм змінами клімату на період 2021–2050 рр. дозволяє зробити висновок, що температура повітря за період вегетації культури буде нижчою від середніх багаторічних даних і становитиме 12,9 °С, що на 1,5 °С нижче, ніж за базовий період. На фоні зниження температури повітря очікується зменшення кількості опадів на 21 %, що становитиме 136,5 мм. При цьому варіація опадів збільшиться.

Відповідно зменшенню кількості опадів збільшиться і посушливість умов вегетації озимої пшениці. Величина ГТК зменшиться до 0,57 відн.од., що є ознакою середньої посухи. Буде характерним збільшення кількості випадків з ГТК менше 0,4 відн.од., що є ознакою дуже сильної посухи.

Для врахування особливостей вегетаційного періоду озимої пшениці була виконана типізація погодних умов з метою звести різноманіття їх режимів до визначених типів погоди, які характеризують спільність умов формування урожаю у весняно-літній період. В якості критерію оцінки типів погоди була прийнята кількість опадів за вегетацію: випадки з кількістю опадів менше 60 % від

середнього багаторічного значення приймалися за «посушливі» роки, при кількості опадів більше середньої багаторічної величини – за «вологі» роки.

Встановлено тенденції зміни температури повітря та кількості опадів протягом вегетації озимої пшениці будуть в різні за зволоженістю роки. Зростання температури повітря від початку вегетації відбуватиметься поступово, при цьому зберігатиметься стійке співвідношення: декадна середня багаторічна температура > температура «посушливого» року > температура «вологого» року.

У «вологі» роки перші чотири декади кількість опадів суттєво перевищуватиме середні багаторічні значення і становитиме 161–210 % від цієї величини. В п'яту декаду кількість опадів буде дещо меншою (127 % від середнього значення). І тільки в шосту декаду їх кількість буде недостатньою і становитиме 81 % від багаторічного значення. Сьома та восьма декади вегетації відрізнятимуться збільшенням кількості опадів до 136–144 %. Кількість опадів у «посушливі» роки перші чотири декади становитиме 23–58 % від середніх багаторічних значень, у п'ятій декаді вона зростає до 87 %, потім зменшиться до 39 %.

Тип зволоження періоду вегетації озимої пшениці на фоні поступового підвищення температури повітря з початку вегетації культури впродовж подальшого періоду розвитку рослин в значній мірі впливатиме на інтенсивність викидів парникових газів. Так, у «посушливі» роки на початку вегетації емісія CO_2 становитиме 0,044–0,079 т С- CO_2 га⁻¹ д⁻¹, що значно вище середніх багаторічних значень та майже вдвічі вище, ніж у «вологі» роки. Рівень викидів CO_2 буде нижчим як у «посушливі», так і у «вологі» роки порівняно з середніми багаторічними значеннями, причому для «вологих» років це зменшення емісії CO_2 буде досить суттєвим (на 39,2 %).

Для динаміки потоків N_2O за середніх багаторічних умов буде характерним зменшення їх рівня протягом вегетації. Навесні на початку вегетації як правило рівень вологості орного шару ґрунту досить високий, що обумовлює формування анаеробних умов. В свою чергу вони визначають рівень емісії N_2O . Протягом вегетації відбувається зменшення вологості ґрунту, що відповідно зменшує рівень потоків N_2O .

У «посушливі» роки, незважаючи на невелику кількість опадів, за рахунок досить високого рівня весняної вологості орного шару на початок вегетації рівень емісії N_2O буде досить високим (0,061–0,089 кг N- N_2O га⁻¹ д⁻¹). У подальшому його рівень знижуватиметься до 0,037, а потім до 0,028 кг N- N_2O га⁻¹ д⁻¹.

У «вологі» роки погодні умови будуть скла-

датися таким чином, що зумовлять рівень підвищеної вологості орного шару ґрунту, що створить сприятливі умови для формування емісії N_2O . На початку вегетації її рівень буде складати 0,096–0,148 кг $N-N_2O$ га⁻¹ д⁻¹. Емісія N_2O у «посушливі» роки буде менше порівняно з середнім багаторічним значенням (на 35,1 %), а у «вологі» роки вона підвищиться на 15,5 %.

Загальною закономірністю є зростання викидів CO_2 протягом весняно-літньої вегетації озимої пшениці від початку вегетації до фази воскової

стиглості. Ця закономірність досить чітко простежується і для середніх багаторічних умов, але рівень емісії CO_2 буде значно вищим порівняно з «посушливими» та «вологими» роками. Для вегетаційного ходу викидів N_2O загальною закономірністю є зменшення їх кількості з початку вегетації озимої пшениці до її завершення.

В цілому загальна емісія парникових газів в перерахунку на CO_2 –еквівалент скоротиться у «посушливі» роки на 6,2 %, а у «вологі» роки на 32,3 %.

Список використаної літератури

1. Степаненка С.М. Кліматичні ризики функціонування галузей економіки України в умовах зміни клімату [Текст] / С.М. Степаненка, А.М. Польового. Одеса: «ТЕС». 2018. – 546 с.
2. Степаненка С.М. Кліматичні зміни та їх вплив на сфери економіки України [Текст] / С.М. Степаненка, А.М. Польового. Одеса: «ТЕС». 2015. – 518 с.
3. Степаненка С.М. Оцінка впливу кліматичних змін на галузі економіки України [Текст] / С.М. Степаненко, А.М. Польового. Одеса: «Екологія». 2011. – 694 с.
4. Полевой А.Н. Моделирование влияния изменений климата на формирование продуктивности озимой пшеницы в Украине [Текст] / А.Н. Полевой, Н.И. Кульбида, И.В. Трофимова, Т.И. Адаменко // В сб. Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. Санкт-Петербург: Гидрометеиздат, 2005. – Том XX. – С. 191–218.
5. Полевой А.Н. Моделирование фотосинтеза зеленого листа у растений типа C_3 и C_4 при изменении концентрации CO_2 в атмосфере [Текст] / А.Н. Полевой // В сб. Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. – Москва: IGCE, 2010. – № XXIII. – С. 297–316.
6. Польовий А.М. Моделювання емісії парникових газів із ґрунтів агроєкосистем [Текст] / А.М. Польовий, Л.Ю. Божко // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Геологія. Географія. Екологія». – 2021. – № 54. – С. 329–344. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2021-54-25>
7. Сябрук О.П. Оцінка втрат вуглецю з чорнозему типового за різних способів обробітку та систем удобрення [Текст] / О.П. Сябрук // Агрохімія і ґрунтознавство. 2013. – Вип. 80. – С. 140–146.
8. Васильченко В.В. Україна та глобальний парниковий ефект [Текст] Книга 2. Вразливість і адаптація екологічних та економічних систем до зміни клімату / В.В. Васильченко, М.В. Рацуна, І.В. Трофимової. – Київ: Агентство раціонального використання енергії та екології, 1998. – 208 с.
9. Шилова Н.А. Динамика выделения CO_2 в посевах полевых культур на дерново-подзолистых и торфяных почвах [Текст] / Н.А. Шилова. // Почвоведение и агрохимия. – 2014. – № 1(52). – С. 104–113.
10. Alvaro-Fuentes J. Simulating climate change and land use effects on soil nitrous oxide emissions in Mediterranean conditions using the Daycent model [Текст] / J. Alvaro-Fuentes, J.L. Arrúe, A. Bielsa et al. // Agriculture, Ecosystems & Environment. – Volume 238, – 1 February 2017, – Pages 78–88. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.07.017>
11. Baldock J.A. Soils and climate change: potential impacts on carbon stocks and greenhouse gas emissions, and future research for Australian agriculture [Текст] / J.A. Baldock, A.D.I. Wheeler, C.N. McKenzie et al. // Crop & Pasture Science, – 2012, – 63, – P. 269–283. <http://dx.doi.org/10.1071/CP11170>
12. Benli B. Assessment of winter wheat production under early sowing with supplemental irrigation in a cold highland environment using CropSyst simulation model [Текст] / B. Benli, M. Pala, C. C.Stockle, T. Oweis // Agricultural Water Management. – Volume 93, – Issues 1–2, – 16 October 2007, – Pages 45–53. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2007.06.014>
13. Bosko S. Greenhouse Gas Emissions from Soil Cultivated with Vegetables in Crop Rotation under Integrated, Organic and Organic Conservation Management in a Mediterranean Environment [Текст] / S. Bosko, I. Volpi, D. Antichi, et al. // Agronomy. – 2019. – Volume 9. – 446 p.
14. Butterbach-Bahl K. Quantifying the regional source strength of N-trace gases across agricultural and forest ecosystems with process based models [Текст] / K. Butterbach-Bahl, M. Kesik, P. Miehle et al. // Plant and Soil. – 2004. – Volume 260. – P. 311–329.
15. Chatskikh D. Simulation of Effects of Soils. Climate and Management on N_2O Emission from Grasslands [Текст] / D. Chatskikh, J.E. Olesen, J. Berntsen et al. // Biogeochemistry. – 2005. – Vol. 76. – No. 3. – P. 395–419. <https://www.jstor.org/stable/20055312>
16. Del Grosso S.J. Modeling soil CO_2 emissions from ecosystems [Текст] / S.J. Del Grosso, W.J. Parton, A.R. Moiser et al. // Biogeochemistry. – 2005. – Volume 73. – P. 71–91.
17. Del Grosso S.J. DayCent Model Simulations for Estimating Soil Carbon Dynamics and Greenhouse Gas Fluxes from Agricultural Production Systems [Текст] / S.J. Del Grosso, W.J. Parton, R. Paul et al. // In book: Managing Agricultural Greenhouse Gases. – 2012. – P.241–250. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-386897-8.00014-0>
18. Duval B.D. Predicting Greenhouse Gas Emissions and Soil Carbon from Changing Pasture to an Energy Crop [Текст] / B.D. Duval, K.J. Anderson-Teixeira, S.C. Davis et al. // PLoS ONE. – 2013. – Volume 8(8). – 12 p.

19. Freibauer A. Controls and models for estimating direct nitrous oxide emissions from temperate and sub-boreal agricultural mineral soils in Europe [Текст] / A. Freibauer, M. Kaltschmitt // Biogeochemistry. – 2003. – Volume 63, – Pages 93–115. <https://doi.org/10.1023/A:1023398108860>
20. Grant B. Estimated N₂O and CO₂ Emissions as Influenced by Agricultural Practices in Canada [Текст] / B. Grant, W.N. Smith, C. Li // Climatic Change. – 2004. – Vol. 65. – Iss. 3. 1–14. <https://doi.org/10.1023/B:CLIM.0000038226.60317.35>
21. Jiang Q. Assessing climate change impacts on greenhouse gas emissions, N losses in drainage and crop production in a subsurface drained field [Текст] / Q. Jiang, Z. Qi, L. Xue et al. // Science of The Total Environment. – 2020. – Volume 705. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135969>
22. Kaiser E-A. What predicts nitrous oxide emissions and denitrification N-loss from European soils? [Текст] / E-A. Kaiser, F. Eiland, J.C. Germon et al. // Z Pflanzenernaehr Bodenkd. – 1996. – Volume 159. – P. 541–547. <https://onlinelibrary.wiley.com/journal/13652486>
23. Karimi T., Stöckle C.O., Higgins S.S. et al. Impact of climate change on greenhouse gas emissions and water balance in a dryland-cropping region with variable precipitation [Текст] / T. Karimi, C.O. Stöckle, S.S. Higgins et al. // Journal of Environmental Management. – 2021. Volume 287, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112301>
24. LI C. A model of nitrous-oxide evolution from soil driven by rainfall events: model structure and sensitivity [Текст] / C. LI, S. Frolking, T.A. Frolking // Journal of Geophysical Research-Atmospheres. –1992. – P. 9759–9776.
25. Lokupitya F. Agricultural soil greenhouse gas emissions: A review of national inventory methods. Article Literature Review [Текст] / F. Lokupitya, K. Paustian // Journal of Environmental Quality. – 2006. – 35(4). – P. 1413–1427. <https://doi.org/10.2134/jeq2005.0157>
26. Ma L. Root zone water quality model (RZWQM2): model use, calibration and validation. Transactions of the ASABE [Текст] / L. Ma, L.R. Ahuja, B.T. Nolan et al. // American Society of Agricultural and Biological Engineers. – 2012. – Vol. 55(4). – P. 1425–1446. ISSN 2151-0032 1425
27. Maria L. Direct nitrous oxide emissions in Mediterranean climate cropping systems: Emission factors based on a meta-analysis of available measurement data [Текст] / L. Maria, Cayuela et al. // Agriculture, Ecosystems and Environment. – 2017. – 238. – P. 25–35. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2016.10.006>
28. Müller D. Impact of Climate Change on Wheat Production in Ukraine [Текст] / D. Müller, A. Jungandreas, F. Koch, F. Schierhorn // Agricultural Policy Report APD/APR/02/2016. – Kyiv. – 2016. – 89 p.
29. Necpalova M. Potentials to mitigate greenhouse gas emissions from Swiss agriculture [Текст] / M. Necpalova, J. Lee, C. Skinner et al. // Agriculture, Ecosystems and Environment. – 2018. – 265. – P. 84–102. <http://hdl.handle.net/20.500.11937/75587>
30. Oertel C. Greenhouse gas emissions from soils. [Текст] / C. Oertel, J. Matschullat, K. Zurba et al. // A review. Geochemistry. – 2016. – 76(3). – P. 327–352. <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2016.04.002>
31. Roelandt C. Estimating annual N₂O emissions from agricultural soils in temperate climates [Текст] / C. Roelandt, B. van Wesemael, M. Rounsevell // Global Change Biol. – 2015. – Volume 11. – P. 1701–1711. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2005.01025.x>
32. Stehfest E., Bouwman L. N₂O and NO emission from agricultural fields and soils under natural vegetation: summarizing available measurement data and modeling of global annual emissions [Текст] / E. Stehfest, L. Bouwman // Nutr. Cycl. Agroecosys. – 2006. – Volume 74. – P. 207–228.
33. Sup A. Modeling Impact of Climate Change and Management Practices on Greenhouse Gas Emissions from Arable Soils [Текст] / A. Sup, A. Faber, J. Kozura et al. // Pol. J. Environ. Stud. – 2011. – Vol.20. – No. 6. P. 1593–1602.
34. Vleeshouwers L.M. Carbon emission and sequestration by agricultural land use: a model study for Europe [Текст] / L.M. Vleeshouwers, A. Verhagen // Global Change Biology. – 2002. – Volume 8. – P. 519–530.
35. Weiler D.A., Tornquist C.G., Parton W. et al. Crop Biomass, Soil Carbon, and Nitrous Oxide as Affected by Management and Climate: A DayCent Application in Brazil [Текст] / D.A. Weiler, C.G. Tornquist, W. Parton et al. // Soil Science Society of America Journal. Soil & Water Management & Conservation. –2017. –Volume 81. – Issue 4. – Pages 945–955. <https://doi.org/10.2136/sssaj2017.01.0024>

Внесок авторів: всі автори зробили рівний внесок у цю роботу

The climate change impact on greenhouse gas emissions (CO₂ and N₂O) from soils at agroecosystems

Anatoly Polevoy¹,

DSc (Geography), Professor, Head of Department of Agrometeorology and Agroecology,

¹ Odessa State Environmental University, 15 Lvivska St., Odessa, 65016, Ukraine;

Alexander Mykytiuk²,

PhD (Biology), Associate Professor, Executive Director,

² International charitable organization, Institute for the Development of Territorial Communities;

Lyudmila Bozhko¹,

PhD (Geography), Associate Professor, Department of Agrometeorology and Agroecology;

Elena Barsukova¹,

PhD (Geography), Associate Professor, Department of Agrometeorology and Agroecology

ABSTRACT

Formulation of the problem. Soils are a significant source of greenhouse gases (GHGs), the release of which into the atmosphere forms the global warming potential. Mathematical models describing greenhouse gas emissions make it

possible to assess the impact of climate change on the GHG emissions on a regional scale, and study how land-use changes affect these emissions.

The study is aimed at assessment of potential changes in CO₂ and N₂O emissions from soils at agroecosystems under the influence of temperature regime changes and increasing aridity in the context of global climate change.

Materials and methods. Numerical experiments with a comprehensive model of GHG emissions from the soils at the winter wheat agroecosystem were performed by means of RCP4.5 climate change scenario. The study is based on the materials of agrometeorological observations at the hydrometeorological station of Bilovodsk (Eastern Ukraine) for the period of 1991-2020 and the climate change scenario RCP4.5 for the period of 2021-2050.

Results. Classification of crop vegetation conditions allowed us to reduce the diversity of their regimes to certain weather types, characterizing the common conditions of crop formation in spring and summer, due to which the so-called 'dry' and 'humid' years were distinguished. The tendencies of change in air temperature and rainfall during vegetation of winter wheat in years different on humidity have been established. The increase in air temperature from the beginning of the growing season was gradual, while maintaining a stable correlation: a ten-day average long-term temperature was more than a temperature of the 'dry' year which was more than a temperature of the 'humid' year.

The intensity of greenhouse gas emissions is defined by the type of humidification in the growing season. In the 'dry' years at the beginning of the vegetation season, CO₂ emissions will make up 0.044-0.079 tons of C-CO₂ ha⁻¹ per a ten-day period, which is higher than the average long-term values and almost twice as high as in the 'humid' years.

In the spring at the beginning of the growing season, as a rule, the level of moisture content in the arable soil layer is quite high, which leads to the formation of anaerobic conditions. They, in turn, determine the level of N₂O emissions. Increasing aridity reduces the level of N₂O fluxes. For 'dry' years, at the expense of a fairly high level of spring moisture of the arable layer at the beginning of the growing season, the level of N₂O emissions was quite high (0.061-0.089 kg of N-N₂O ha⁻¹ per a ten-day period). Subsequently its level decreased significantly.

In general, total greenhouse gas emissions in terms of CO₂ equivalent will decrease by 6.2% in 'dry' years and by 32.3% in 'humid' years.

Conclusions. Based on numerical experiments with the model of greenhouse gas emissions from soils at the winter wheat agroecosystem, the general patterns of vegetation-related variation of CO₂ and N₂O emissions are identified. The main patterns feature consists in increasing CO₂ emissions during spring-summer vegetation of winter wheat from the beginning of a growing season to the wax ripeness phase and in decreasing N₂O emissions from the beginning of the winter wheat growing season until its ending. Their peculiarities are defined by the years' different humid conditions.

Keywords: modelling, emission, carbon dioxide, nitrous oxide, soil, productivity, agroecosystem, air temperature, precipitation, soil moisture.

References

1. Stepanenko, S.M. ta Polovyyi, A.M. (2018). *Climatic risks of functioning of industries of economy of Ukraine are in the conditions of change of climate*. Odessa, TES. 546 [in Ukrainian]
2. Stepanenko, S.M. ta Polovyyi, A.M. (2015). *Climatic changes and their influence on the spheres of economy of Ukraine*. Odessa: TES. 518 [in Ukrainian]
3. Stepanenko, S.M. ta Polovyyi, A.M. (2011). *Assessment of the impact of climate change on the economy of Ukraine*. Odessa: Ecology. 694 [in Ukrainian]
4. Polovoy, A.M., Kul'bida, N.I., Trofimova, I.V., Adamenko, T.I. (2005). *Modeling the impact of climate change on the formation of winter wheat productivity in Ukraine*. On Sat. *Problems of ecological monitoring and modeling of ecosystems*. Sankt-Peterburg: Gidrometeoizdat, XX. 191-218. [in Russian]
5. Polevoy, A.N. (2010). *Modeling of green leaf photosynthesis in plants of C₃ and C₄ types with changes in CO₂ concentration in the atmosphere*. On Sat. *Problems of ecological monitoring and modeling of ecosystems*. XXIII, Moskva: IGCE. 297-316 [in Russian]
6. Polovyyi, A.M., Bozhko, L.Yu. (2021). *Modeling of greenhouse gas emissions from agro-ecosystem soils*. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, series "Geology. Geography. Ecology"* (54), 329–344. [in Ukrainian] <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2021-54-25>
7. Siabruk, O.P. (2013). *Estimation of carbon losses from typical chernozem by different tillage methods and fertilizer systems*. *Agrochemistry and soil science*. 80. 140–146 [in Ukrainian]
8. Vasylychenko, V.V., Raptun, M.V., Trofymova, I.V. (1998). *Ukraine and the global greenhouse effect. Book 2. Vulnerability and adaptation of ecological and economic systems to climate change*. Kyiv: Ahenstvo ratsionalnoho vykorystannia enerhii ta ekolohii, 208. [in Ukrainian]
9. Shilova, N.A. (2014). *Dynamics of CO₂ release in field crops on sod-podzolic and peat soils*. *Soil science and agrochemistry*. 1(52). 104–113 (In Russia).
10. Alvaro-Fuentes, J., Arrúe, J.L., Bielsa, A. et al. (2017) *Simulating climate change and land use effects on soil nitrous oxide emissions in Mediterranean conditions using the Daycent model*. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 238, 78-88. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.07.017>
11. Baldock, J.A., Wheeler, A.D.I., McKenzie, C.N. et al. (2012) *Soils and climate change: potential impacts on carbon stocks and greenhouse gas emissions, and future research for Australian agriculture*. *Crop & Pasture Science*, 63, 269–283. <http://dx.doi.org/10.1071/CP11170>

12. Benli, B., Pala, M., C.Stockle, C., Oweis, T. (2007). Assessment of winter wheat production under early sowing with supplemental irrigation in a cold highland environment using CropSyst simulation model. *Agricultural Water Management*, 93(1–2), 45–53. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2007.06.014>
13. Bosko, S., Volpi, I., Antichi, D., et al. (2019). Greenhouse Gas Emissions from Soil Cultivated with Vegetables in Crop Rotation under Integrated, Organic and Organic Conservation Management in a Mediterranean Environment. *Agronomy*, 9, 446.
14. Butterbach-Bahl, K., Kesik, M., Miehle, P. et al. (2004). Quantifying the regional source strength of N-trace gases across agricultural and forest ecosystems with process-based models. *Plant and Soil*, 260, 311–329.
15. Chatskikh, D., Olesen, J.E., Berntsen, J. et al. (2005). Simulation of Effects of Soils, Climate and Management on N₂O Emission from Grasslands *Biogeochemistry*, 76(3), 395–419. <https://www.jstor.org/stable/20055312>
16. Del Grosso, S.J., Parton, W.J., Moiser, A.R et al. (2005). Modeling soil CO₂ emissions from ecosystems. *Biogeochemistry*, 73, 71–91.
17. Del Grosso, S.J., Parton, W.J., Paul, R. et al. (2012). DayCent Model Simulations for Estimating Soil Carbon Dynamics and Greenhouse Gas Fluxes from Agricultural Production Systems. In book: *Managing Agricultural Greenhouse Gases*, 241–250. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-386897-8.00014-0>
18. Duval, B.D., Anderson-Teixeira, K.J., Davis, S.C, et al. (2013). Predicting Greenhouse Gas Emissions and Soil Carbon from Changing Pasture to an Energy Crop. *PLoS ONE*, 8(8): 12.
19. Freibauer, A., Kaltschmitt, M. (2003). Controls and models for estimating direct nitrous oxide emissions from temperate and sub-boreal agricultural mineral soils in Europe. *Biogeochemistry*, 63, 93–115. <https://doi.org/10.1023/A:1023398108860>
20. Grant, B., Smith, W.N., Li, C. (2004) Estimated N₂O and CO₂ Emissions as Influenced by Agricultural Practices in Canada. *Climatic Change*, 65(3), 1–14. <https://doi.org/10.1023/B:CLIM.0000038226.60317.35>
21. Jiang, Q., Qi, Z., Xue, L. et al. (2020). Assessing climate change impacts on greenhouse gas emissions, N losses in drainage and crop production in a subsurface drained field. *Science of The Total Environment*, 705, 135969. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135969>
22. Kaiser, E-A., Eiland, F., Germon, J.C. et al. (1996). What predicts nitrous oxide emissions and denitrification N-loss from European soils? *Z Pflanzenernaehr Bodenkd.* 159, 541–547. <https://onlinelibrary.wiley.com/journal/13652486>
23. Karimi, T., Stöckle, C.O., Higgins, S.S. et al. (2021). Impact of climate change on greenhouse gas emissions and water balance in a dryland-cropping region with variable precipitation. *Journal of Environmental Management*, 287, 112301. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112301>
24. LI, C., Frolking, S., Frolking, T.A. (1992). A model of nitrous-oxide evolution from soil driven by rainfall events.: I model structure and sensitivity. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 97, 9759–9776.
25. Lokupitya, F., Paustian, K. (2006) Agricultural soil greenhouse gas emissions: A review of national inventory methods. *Article Literature Review. Journal of Environmental Quality*, 35(4): 1413–1427. <https://doi.org/10.2134/jeq2005.0157>
26. Ma, L., Ahuja, L.R., Nolan, B.T. et al. (2012). Root zone water quality model (RZWQM2): model use, calibration and validation. *Transactions of the ASABE*. 55(4): 1425–1446. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*. ISSN 2151-0032 1425.
27. Maria, L. Cayuela et al. (2017). Direct nitrous oxide emissions in Mediterranean climate cropping systems: Emission factors based on a meta-analysis of available measurement data. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 238, 25–35 <http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2016.10.006>
28. Müller, D., Jungandreas, A., Koch, F., Schierhorn, F. (2016). Impact of Climate Change on Wheat Production in Ukraine. *Agricultural Policy Report APD/APR/02/2016*. Kyiv, 89.
29. Necpalova, M., Lee J., Skinner, C. et al. (2018). Potentials to mitigate greenhouse gas emissions from Swiss agriculture. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 265, 84–102. <http://hdl.handle.net/20.500.11937/75587>
30. Oertel, C., Matschullat, J., Zurba, K. et al. (2016). Greenhouse gas emissions from soils. A review. *Geochemistry*, 76(3), 327–352. <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2016.04.002>
31. Roelandt, C., van Wesemael, B., Rounsevell, M. (2015). Estimating annual N₂O emissions from agricultural soils in temperate climates. *Global Change Biol.*, 11, 1701–1711. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2005.01025.x>
32. Stehfest, E., Bouwman, L. (2006). N₂O and NO emission from agricultural fields and soils under natural vegetation: summarizing available measurement data and modeling of global annual emissions. *Nutr. Cycl. Agroecosys*, 74, 207–228.
33. Sup, A., Faber, A., Kozura, J. et al. (2011). Modeling Impact of Climate Change and Management Practices on Greenhouse Gas Emissions from Arable Soils. *Pol. J. Environ. Stud.*, 20(6), 1593–1602.
34. Vleeshouwers, L.M., Verhagen, A. (2002). Carbon emission and sequestration by agricultural land use: a model study for Europe. *Global Change Biology*, 8, 519–530.
35. Weiler, D.A., Tornquist, C.G., Parton, W. et al. (2017). Crop Biomass, Soil Carbon, and Nitrous Oxide as Affected by Management and Climate: A DayCent Application in Brazil. *Soil Science Society of America Journal. Soil & Water Management & Conservation*, 81(4), 945–955. <https://doi.org/10.2136/sssaj2017.01.0024>