

## **2.8. Оцінка агрокліматичних умов росту озимої пшениці та емісія парникових газів із ґрунтів агроєкосистеми при зміні клімату в Україні**

*Польовий А. М., Барсукова О. А.*

*Одеський національний університет імені І. І. Мечникова*

Зміна клімату є однією з найбільших проблем світу в даний час. Вона визначається як значні зміни середніх значень метеорологічних елементів, таких як опади та температура, для яких середні значення були розраховані протягом тривалого періоду [608].

Останні кілька десятиліть показують, що значні зміни клімату на

---

<sup>608</sup> World Meteorological Organization. International Meteorological Vocabulary, 2nd ed.; WMO: Geneva, Switzerland, 1992.

глобальному рівні були результатом зростання діяльності людини, що змінила склад глобальної атмосфери [609].

Абіотичні стреси, викликані зміною клімату, такі як засолення, посуха та коливання температури, руйнівні позначаються на фізіологічних реакціях сільськогосподарських культур, продуктивності та загальній урожайності, що зрештою становить серйозну загрозу глобальній продовольчій безпеці та агроекосистемам.

Продовольча та сільськогосподарська організація Об'єднаних Націй (ФАО) визначає «продовольчу безпеку» як існуючу, коли «всі люди у будь-який час мають фізичний або економічний доступ до достатньої кількості безпечної та поживної їжі для задоволення своїх дієтичних потреб і харчових переваг, для активного і здорового життя» [610].

Згідно ФАО, чотири виміри продовольчої безпеки: наявність продовольства, доступність продовольства, використання продовольства та стабільність продовольчих систем. Неприятливі впливи на зміни клімату, такі як збільшення втрат урожаю від шкідників, хвороб або посухи, що скорочують виробництво продовольства, скоротять доступність продовольства.

Сільське господарство сильно піддається зміні клімату, оскільки його діяльність безпосередньо залежить від кліматичних умов.

Зміна клімату є глобальною загрозою продовольчої та харчової безпеки, що зумовило як у минулому, так і нинішньому століттях проведення великих досліджень з цієї проблеми. Достатньо вказати кілька останніх фундаментальних робіт, виданих за кордоном, в яких розглядається інформація, зібрана в літературі щодо зміни клімату, його можливі причини, його прогноз на найближче майбутнє, його вплив на сільськогосподарський сектор як вплив на фізіологічну та метаболічну активність рослин, а також його потенційні та повідомлені наслідки для зростання та продуктивності рослин, зараження шкідниками, стратегії пом'якшення та їх економічний вплив [611, 612, 613].

Слід також відзначити створення унікального підручника з проблеми зміни клімату і сільського господарства [614], в якому критично досліджується взаємозв'язок між зміною клімату, сільським господарством та правом, від якого залежать продовольча безпека та

---

<sup>609</sup> IPCC. Climate change 2007: Impacts, adaptation and vulnerability. In *Working Group II Contribution to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*; Cambridge University Press: Cambridge, UK, 2007.

<sup>610</sup> United Nations Food Security: Framework Document (2008) 3, 2016. URL: <http://www.fao.org/forestry/15538-079b31d45081fe9c3dbc6ff34de4807e4.pdf>.

<sup>611</sup> Malhi G. S., Kaur M., Kaushik P. Impact of climate change on agriculture and its mitigation strategies: A review. *Sustainability*. 2021. Vol. 13 (3), 1318. doi: 10.3390/su13031318

<sup>612</sup> Agriculture, climate change and sustainability: The case of EU-28 / M. Agovino et al. *Ecological Indicators*. 2019. Vol. 105. P. 525–543. doi: 10.1016/j.ecolind.2018.04.064

<sup>613</sup> Bib F., Rahman A. An overview of climate change impacts on agriculture and their mitigation strategies. *Agriculture*. 2023. Vol. 13 (8), 1508.

<sup>614</sup> Research handbook on climate change and agricultural law / ed. M. J. Angelo, A. D. Plesis. *Elgaronline*, 2017. P. 488. doi: 10.4337/9781784710644

стійкий до зміни клімату розвиток сільськогосподарського виробництва.

Зміни агрокліматичних ресурсів України під впливом кліматичних змін, агрокліматичні умови формування урожаю сільськогосподарських культур у цих та очікуваних умовах, кліматичні ризики їх вирощування послідовно розглядаються у трьох фундаментальних монографіях [615, 616, 617], присвячених проблемі зміни клімату та його впливу на галузі економіки України.

Сільське господарство та зміна клімату характеризуються складним причинно-наслідковим зв'язком. Сільськогосподарський сектор генерує значні обсяги викидів газів, що впливають на клімат. У зв'язку з чим надзвичайно важливим завданням є оцінка викидів парникових газів із ґрунтів екосистем.

Проблема емісії парникових газів із ґрунту розглядається в декількох фундаментальних оглядах. В опублікованому майже десятиріччя назад огляді [618] розглядається, що ґрунти служать джерелами та поглиначами парникових газів (ПГ), таких як вуглекислий газ ( $\text{CO}_2$ ), метан ( $\text{CH}_4$ ) та закис азоту ( $\text{N}_2\text{O}$ ).

Сучасний огляд досліджень з цієї проблеми [619] містить аналіз, який починається з вивчення змінних, що впливають на викиди парникових газів, який охоплює як неорганічні фактори, так і органічні фактори. Відмічається, що на польові культури, крім зернових, такі як бобові, олійні культури, овочі та фрукти, припадає значний обсяг викидів парникових газів, що викликає необхідність моделювання цих процесів.

Нове століття характеризується прогресом розробки математичних моделей для моделювання викидів парникових газів. Підготовлено фундаментальний огляд основних процесуальних підходів до моделювання викидів  $\text{N}_2\text{O}$  із сільськогосподарських ґрунтів [620].

Таке узагальнення підходів до моделювання дозволяє уникнути невизначеностей, які виникають через мінливість викидів  $\text{N}_2\text{O}$ , що є потужною методологією для дослідження процесів нітрифікації та денітрифікації, а також виявлення взаємопов'язаної динаміки між ґрунтом, атмосферою та сільськогосподарськими культурами. Ця робота пропонує огляд широко використовуваних моделей, які моделюють викиди  $\text{N}_2\text{O}$  за різних систем землеробства та методах управління. Були розглянуті та порівняні алгоритми, що використовуються для моделювання викидів

---

<sup>615</sup> Степаненко С. М., Польового А. М. Оцінка впливу кліматичних змін на галузі економіки України. Одеса : Екологія, 2011. 605 с.

<sup>616</sup> Кліматичні зміни та їх вплив на сфери економіки України / С. М. Степаненко та ін. Одеса : ТЕС, 2015. 520 с.

<sup>617</sup> Степаненко С. М., Польовий А. М. Кліматичні ризики функціонування галузей економіки України в умовах змін. Одеса : ТЕС. 2018. 546 с.

<sup>618</sup> Greenhouse gas emissions from soils: A review / C. Oertel et al. *Geochemistry*. 2016. Vol. 76 (3). P. 327–352. doi: 10.1016/j.chemer.2016.04.002

<sup>619</sup> Chataut G., Bhatta B., Joshi D., Subedi K., Kafle K. Greenhouse gases emission from agricultural soil: A review. *Journal of Agriculture and Food Research*. 2023. Vol. 11, 100533. doi: 10.1016/j.jafr.2023.100533

<sup>620</sup> Review of the Main Process-Based Approaches for Modeling  $\text{N}_2\text{O}$  Emissions from Agricultural Soils / M. Gabbrielli et al. *Horticulture*. 2024. Vol. 10 (1), 98. doi: 10.3390/horticulturae10010098

N<sub>2</sub>O, прийнявши єдину систему позначень. Вибрані моделі (APSIM, ARMOSA, CERES-EGC, CROPSYST, CoupModel, DAYCENT, DNDC, DSSAT, EPIC, SPACSYS та STICS) були класифіковані за підходами, що використовуються для моделювання процесів нітрифікації та денітрифікації, також обговорювалась оцінка ефективності моделей.

Було виконано порівняння шести найбільш відомих агроекологічних моделей [621].

Сільськогосподарські ґрунти є найбільш важливим антропогенним джерелом викидів закису азоту (N<sub>2</sub>O). Використання цих моделей відкриває широкі можливості: прогнозування викидів парникових газів із ґрунтів агроecosystem; аналізу минулих періодів та отримання оцінок для різних кліматичних сценаріїв майбутнього; прогнозування впливу різних методів управління на викиди парникових газів з полів сільськогосподарських культур; моделювання та кількісної оцінки впливу стратегій щодо пом'якшення наслідків викидів.

Широке використання набула модель DNDC, яка була застосована для прогнозування змін викидів парникових газів через взаємодію між потеплінням клімату та управлінням пасовищами в ході 30-ти річного моделювання на півночі Англії [622], в умовах Канади [623], для території Саксонії [624], для умов Польщі [625].

Досить успішно використовується модель CropSyst – багаторічна, багатокультурна та щоденна модель для моделювання систем землеробства, що розроблена як аналітичний інструмент для вивчення впливу клімату, ґрунтів та управління на продуктивність систем землеробства та навколишнє середовище [626], а також модель DAYCENT – спеціально розроблена для моделювання потоків азоту та вуглецю з урахуванням динаміки ґрунту, сільськогосподарських культур та води [627].

На основі синтезу підходів з моделювання емісії CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O та продуктивності агроecosystem нами для ґрунтово-кліматичних умов України [628] розроблено комплексну модель емісії парникових газів із

---

<sup>621</sup> Modelling nitrous oxide emissions: comparing algorithms in six widely used agro-ecological models / H. Xing et al. *Soil Research*. 2023. Vol. 61 (6). P. 523–541. doi: 10.1071/SR22009

<sup>622</sup> Predicted Soil Greenhouse Gas Emissions from Climate. Management Interactions in Temperate Grassland / A. S. Barneze et al. *Agronomy*. 2022. Vol. 12 (12), 3055.

<sup>623</sup> Grant B., Smith W. N., Li C. Estimated N<sub>2</sub>O and CO<sub>2</sub> Emissions as Influenced by Agricultural Practices in Canada. *Climatic Change*. 2004. Vol. 65 (3). P. 1–14. doi: 10.1023/B:CLIM.0000038226.60317.35

<sup>624</sup> Quantifying the regional source strength of N-trace gases across agricultural and forest ecosystems with process-based models / K. Butterbach-Bahl et al. *Plant and Soil*. 2004. Vol. 260. P. 311–329.

<sup>625</sup> Modeling impact of climate change and management practices on greenhouse gas emissions from Arable Soils / A. Sup et al. *Pol. J. Environ. Stud.* 2011. Vol. 20 (6). P. 1593–1602.

<sup>626</sup> Stockle C. O., Donatelli M., Nelson R. CropSyst, a cropping systems simulation model. *European Journal of Agronomy*. 2003. Vol. 18. P. 289–307. doi: 10.1016/S1161-0301(02)00109-0

<sup>627</sup> A General model for soil organic matter dynamics: sensitivity to litter chemistry, texture and management / W. J. Parton et al. In: R. B. Bryant, R. W. Arnold (eds.). *Quantitative Modeling of Soil Forming Processes*, Soil Science Society of America, Madison. 1994. 147–67.

<sup>628</sup> Польовий А. М., Божко Л. Ю. Моделювання емісії парникових газів із ґрунтів агроecosystem. *Вісник ХНУ ім. В. Н. Каразіна. Сер. Геологія, географія, екологія*. 2021. № 54. С. 329–344.

ґрунтів агроєкосистем (*plant-agrosoil-GHG-model*), яка дозволяє кількісно оцінити вплив змін клімату на формування урожаю та щодакдану динаміку емісії CO<sub>2</sub> та N<sub>2</sub>O з ґрунтів агроєкосистеми в конкретних сценаріях землекористування та сівозміни. За допомогою цієї моделі виконано оцінку [629] потенційної зміни викидів CO<sub>2</sub> та N<sub>2</sub>O із ґрунтів агроєкосистеми під впливом змін температурного режиму та зростання посушливості при глобальних змінах клімату (на прикладі Східної України – Біловодськ Луганської області). Виконане також моделювання в умовах зміни клімату зміни інтенсивності процесів амоніфікації, нітрифікації, денітрифікації у чорноземних ґрунтах та викиди закису азоту за рахунок нітрифікації та денітрифікації з ґрунтів агроєкосистем Східної України [630].

Слід зазначити, що для ґрунтово-кліматичних умов України дослідження пов'язані з оцінкою майбутніх можливих потенційних викидів парникових газів практично не проводилися.

*Ціль дослідження.* Оцінка агрокліматичних умов росту озимої пшениці в період її весняно-літньої вегетації та потенційних викидів парникових газів CO<sub>2</sub> та N<sub>2</sub>O із ґрунтів агроєкосистеми при зміні клімату в Україні.

*Матеріали та методи досліджень.* Як теоретичну основу для кількісної оцінки викидів парникових газів CO<sub>2</sub> та N<sub>2</sub>O з ґрунтів агроєкосистеми озимої пшениці в період її весняно-літньої вегетації використовувалася створена нами комплексна модель емісії парникових газів із ґрунтів агроєкосистем (*plant-agrosoil-GHG-model*) [628]. Розглядалися основні агрокліматичні райони України: Полісся (Житомирська область), Лісостеп (Вінницька область), Північний Степ (Дніпропетровська область), Південний Степ (Херсонська область). Моделювання проводилося для середніх багаторічних умов 1981–2020 рр. та за сценарними умовами по десятиліттях 2021–2030, 2031–2040 та 2041–2050 рр. за допомогою кліматичного сценарію RCP4.5 [617]. Для оцінки умов посушливості використовували гідротермічний коефіцієнт Г. Т. Селянинова (ГТК) та показник атмосферного зволоження Д. І. Шашко (Md) [631].

Перейдемо до розгляду результатів наших досліджень для основних агрокліматичних зон України.

**Полісся.** У зв'язку зі зсувом початку періоду весняно-літньої вегетації озимої пшениці на більш ранні терміни температура повітря в цей період за сценарними даними по всіх десятиліттях очікується на 0,9–1,7 °С нижче порівняно із середньою багаторічною (табл. 1). Кількість

---

<sup>629</sup> Польовий А. М., Микитюк О. Ю., Божко Л. Ю., Барсукова О. А. Вплив змін клімату на емісію парникових газів (CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O) із ґрунтів агроєкосистем. *Вісник Харківського НУ ім. В.Н. Каразіна. Сер. Геологія. Географія. Екологія.* 2023. Вип. 58. С. 202–216. doi: 10.26565/2410-7360-2023-58-16

<sup>630</sup> Polevoy A., Mykytiuk A., Bozhko L., Barsukova E., Husieva K. Modelling of the impact of climate change on the transformation of nitrogen forms in the soil and N<sub>2</sub>O emissions from the groecosystems of Eastern Ukraine. *Regulatory Mechanisms in Biosystems.* 2023. Vol. 14 (2). P. 165–172. doi: 10.15421/022325

<sup>631</sup> Польовий А. М. Сільськогосподарська метеорологія : навч. посіб. Одеса : ТЕС, 2012. 612 с.

опадів у періоди 2021–2030 та 2031–2040 рр. незначно відрізняться від багаторічних значень, 216–228 мм порівняно з 231 мм, у період 2041–2050 рр. вона становитиме 81,4 % від багаторічних значень. Величина сумарного випаровування для всіх трьох десятиліть очікується 244–245 мм, що складе 88,1 % від кліматичної норми, відповідно і величини випаровування будуть дещо меншими, для третього десятиліття ця величина буде вищою (105,6 %).

За показником зволоження ГТК Селянинова перше десятиліття відрізняться незначною посушливістю, друге – гарним зволоженням, третє – слабкою посушливістю. За показником зволоження Шашко (Md) лише третє десятиліття за критерієм зволоження наближається до рівня середньої посушливості. Запаси продуктивної вологи в орному шарі ґрунту очікуються лише на рівні 43–48 мм, що вище багаторічних значень.

**Лісостеп.** Температурний режим весняно-літньої вегетації озимої пшениці (табл. 1) був нижчим від середнього багаторічного на 1,2–2,1 °С, особливо низьким він очікується в другому десятилітті (до 11,4 °С в порівнянні з 13,5 °С за середніх багаторічних умов).

### 1. Порівняння сценарних (RCP4.5) показників агрометеорологічних умов весняно-літньої вегетації озимої пшениці із середніми багаторічними (1981–2020 рр.) по агрокліматичних зонах України

Сценарій RCP 4.5	Показники						
	Температура повітря, Т °С	Опади, мм	Сумарне випаровування E, мм	Випаровуваність EO, мм	ГТК, відн.од.	Запаси вологи у шарі 0–20 см W, мм	Показник зволоження Шашко Md відн.од.
<b>Полісся</b>							
1981–2020	13,0	231	278	287	1,10	33,7	0,487
2021–2030	11,5	216	245	275	0,95	47,2	0,597
2031–2040	11,3	228	245	259	1,17	47,8	0,677
2041–2050	12,1	188	244	303	0,79	42,7	0,474
<b>Лісостеп</b>							
1981–2020	13,5	243	208	303	1,11	31,2	0,480
2021–2030	12,3	203	258	299	0,88	32,9	0,527
2031–2040	11,4	230	260	260	1,13	37,0	0,713
2041–2050	12,1	202	252	295	1,03	37,0	0,511
<b>Північний Степ</b>							
1981–2020	14,7	182	243	365	0,76	25,0	0,323
2021–2030	13,4	143	232	376	0,61	20,8	0,298
2031–2040	14,2	187	238	369	0,90	29,3	0,447
2041–2050	13,8	142	224	391	0,59	19,6	0,327
<b>Південний Степ</b>							
1981–2020	15,2	152	278	355	0,60	15,2	0,277
2021–2030	14,7	105	278	429	0,43	14,7	0,187
2031–2040	14,5	145	230	378	0,67	16,7	0,333
2041–2050	14,9	130	212	414	0,60	18,0	0,284

Джерело: авторські дослідження.

Очікується зменшення кількості опадів у першому та третьому десятиліттях на 16 % та у другому – на 5 %. Рівень сумарного випаровування за десятиліттями очікується вище за багаторічний (252–260 мм порівняно з нормою 208 мм). Величина випаровуваності в перше і третє десятиліття наближається до рівня багаторічної (295–299 мм) і тільки в другому десятилітті вона на 14 % менше норми, при цьому створюються оптимальні умови зволоження, сумарне випаровування буде становити 252–260 мм, а випаровуваність сягатиме 260–299 мм, показник ГТК перевищує одиницю, а показник зволоження Md також високий (0,713). Умови зволоження першого та третього десятиліть характеризуються величинами ГТК 0,88–1,03 та коефіцієнтами Md 0,511–0,527. Зволоження орного шару ґрунту в порівнянні з багаторічними умовами буде кращим, запаси продуктивної вологи становитимуть 33–37 мм.

**Північний Степ.** У період весняно-літньої вегетації озимої пшениці (табл. 1) температура повітря у другому десятилітті лише на 0,5 °С буде нижчою за багаторічну, для першого і третього десятиліть очікується, що зниження складе 0,9–1,3 °С. Кількість опадів у першому та третьому десятиліттях суттєво (на 21 %) зменшиться. Для другого десятиліття умови зволоження складуться сприятливо, кількість опадів перевищить кліматичну норму.

Сумарне випаровування незначно (на 2 %) зменшиться у другому десятилітті. Для першого десятиліття це зменшення становитиме 5 %, для третього – 8 %. Випаровуваність у другому та третьому десятиліттях буде близькою до багаторічної величини, для третього десятиліття вона зросте на 7 %. Оцінка ступеня зволоження за показником ГТК показує, що як у середньому багаторічному, так і для сценарних років умови оцінюються як слабо посушливі, перше і третє десятиліття слабо посушливі більшою мірою, а друге десятиліття дещо менш посушливе. Оцінюючи за показником зволоження Шашко багаторічні умови та сценарні в перше і третє десятиліття оцінюються як сильна посуха, а друге десятиліття приймається як настання середньої посухи. Відповідно запаси вологи в багаторічному розрізі становлять 25 мм, а в першому і третьому десятиліттях – 20–21 мм.

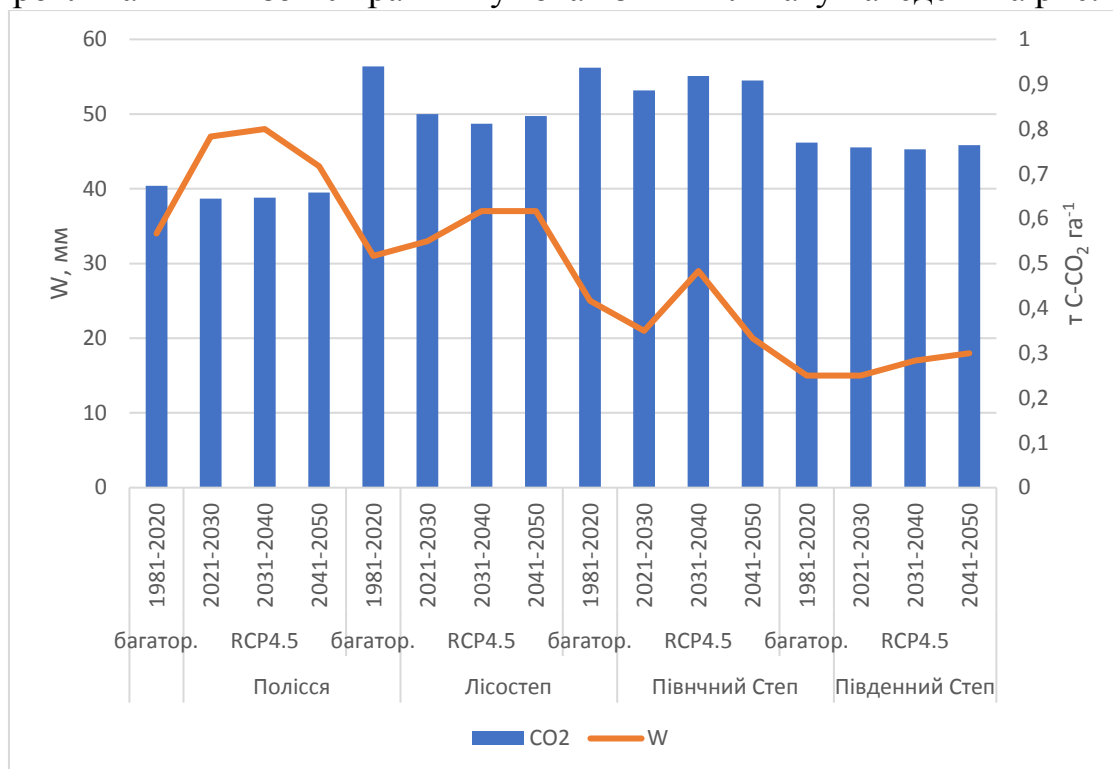
**Південний Степ.** Весняно-літня вегетація пшениці озимої (табл. 1) характеризується більш підвищеною температурою повітря, середня багаторічна становить 15,2 °С, а в сценарні роки вона буде утримуватися в межах 14,5–4,9 °С. Кількість опадів у першому та третьому десятиліттях зменшиться: у першому десятилітті на 31 %, у третьому – на 14 %. Менш значним буде скорочення кількості опадів у другому десятилітті (на 5 %). Сумарне випаровування у першому десятилітті очікується лише на рівні середнього багаторічного (278 мм), у другому десятилітті зменшиться на 13 %, у третьому – на 24 %. Середня багаторічна величина випаровуваності становить 355 мм, у сценарні десятиліття вона зросте, особливо значно у

першому десятилітті (на 21 %), дещо менше у третьому десятилітті (на 17 %) та мінімальне збільшення у другому десятилітті (на 6 %).

За умовами зволоження (за показником ГТК) багаторічні умови слід віднести до слабо посушливих, умови першого десятиліття характеризуються як сильно посушливі, а третього десятиліття як середньозасушливі. Порівняно сприятливі умови очікуються у другому десятилітті. За показником зволоження Шашко середні багаторічні умови характеризуються як сильна посуха. Умови першого десятиліття оцінюються дуже жорстко як дуже сильна посуха, третього десятиліття як сильна посуха, умови другого десятиліття слід віднести до умов, характерних для середньої посухи. Запаси продуктивної вологи в орному шарі в середньому багаторічному та за сценарних умов становлять 15–18 мм.

**Емісія CO<sub>2</sub>.** Комплекс факторів визначає рух газів у системі «грунт – рослина – атмосфера». В першу чергу він визначається температурним режимом та режимом зволоження, біологічними та біохімічними процесами, які відбуваються у ґрунті, станом рослинного покриву.

Результати моделювання емісії CO<sub>2</sub> із ґрунтів агроєкосистеми за період весняно-літньої вегетації озимої пшениці у розрізі основних агрокліматичних зон України в умовах зміни клімату наведені на рис. 1.



**Рис. 1. Динаміка викидів CO<sub>2</sub> із агроєкосистеми озимої пшениці та запасів продуктивної вологи в орному шарі ґрунту (W)**

Джерело: авторські дослідження

Стосовно *Полісся* при середніх багаторічних умовах (запасах продуктивної вологи в орному шарі ґрунту 34 мм та температурі повітря 13,0 °C) викиди CO<sub>2</sub> в атмосферу становитимуть 0,673 т C-CO<sub>2</sub> на га. При

підвищенні запасів вологи до 47 мм та зниженні температури до 11,5 °С у першому десятилітті емісія CO<sub>2</sub> буде зменшуватись до 0,645 т С-CO<sub>2</sub> на га. Для другого десятиліття при температурі повітря 11,3 °С та запасах продуктивної вологи у орному шарі ґрунту 48 мм викиди CO<sub>2</sub> залишаться на рівні викидів у першому десятилітті і становитимуть 0,647 т С-CO<sub>2</sub> на га. У третьому десятилітті волого-температурний режим зміниться (відбудеться зниження вологості ґрунту до 43 мм і підвищення температури повітря до 12,1 °С), викиди CO<sub>2</sub> становитимуть 0,658 т С-CO<sub>2</sub> на га.

У *Лісостепу* за середніх багаторічних умов при запасах вологи 31 мм та температурі повітря 13,5 °С емісія CO<sub>2</sub> становитиме 0,940 т С-CO<sub>2</sub> на га. Так, при підвищенні вологості ґрунту до 33 мм за температури повітря 12,3 °С у першому десятилітті викиди CO<sub>2</sub> становитимуть 0,833 т С-CO<sub>2</sub> на га. Зростання запасів вологи (до 37 мм) та зниження температури повітря (до 11,4 °С) призведе до зменшення викидів до 0,812 т С-CO<sub>2</sub> на га. В третьому десятилітті при підвищенні температури повітря відбудеться деяке збільшення викидів до 0,829 т С-CO<sub>2</sub> на га.

Для *Північного Степу* буде характерним збільшення викидів CO<sub>2</sub>. Так, при багаторічних запасах вологи 25 мм і температурі повітря 14,7 °С викиди CO<sub>2</sub> становлять 0,937 т С-CO<sub>2</sub> на га. У першому десятилітті при зниженні температури повітря до 13,4 °С та зменшенні запасів вологи до 21 мм відбудеться зменшення викидів до 0,886 т С-CO<sub>2</sub> на га. У другому десятилітті очікується дещо вищий рівень зволоження ґрунту (до 29 мм) та деяке підвищення температури повітря (до 14,2 °С), внаслідок таких агрометеорологічних умов викиди зростуть до 0,918 т С-CO<sub>2</sub> на га.

Для третього десятиліття буде характерним погіршення умов зволоження. При запасах вологи 20 мм та температурі повітря 13,8 °С емісія буде складати 0,908 т С-CO<sub>2</sub> на га.

У посушливих умовах *Південного Степу* за середніх багаторічних умов (запаси вологи 15 мм, температура повітря 15,2 °С) викиди CO<sub>2</sub> становитимуть 0,770 т С-CO<sub>2</sub> на га. У першому та другому десятиліттях за практично однакового зволоження, але незначного (на 0,5–0,7 °С) зниження температури повітря емісія становитиме 0,755–0,759 т С-CO<sub>2</sub> на га. Невелике підвищення рівня зволоження (до 18 мм) та підвищення температури повітря (до 14,9 °С) у третьому десятилітті наблизить викиди CO<sub>2</sub> до багаторічного рівня (0,764 т CO<sub>2</sub> на га).

Таким чином, найбільші викиди CO<sub>2</sub> (0,886–0,940 т С-CO<sub>2</sub> на га) будуть очікуватися при середніх за період весняно-літньої вегетації пшениці озимої запасах продуктивної вологи в орному шарі ґрунту 20–40 мм і температурі повітря 12–15 °С. Перевищення рівня середніх за період запасів вологи понад 40 мм та температура повітря 11–12 °С супроводжується зниженням рівня емісії CO<sub>2</sub> (0,645–0,658 т С-CO<sub>2</sub> на га). У посушливих умовах при зниженні середніх за період весняно-літньої

вегетації пшениці озимої запасів вологи в орному шарі ґрунту менше 20 мм і підвищених середніх за весняно-літній період вегетації пшениці озимої температурах повітря (14,5–15,2 °С) очікується зниження емісії (0,755–0,770 т С-СО<sub>2</sub> на га).

**Емісія N<sub>2</sub>O.** В основі процесу викидів N<sub>2</sub>O лежать процеси денітрифікації та нітрифікації форм азоту, інтенсивність яких визначається волого-температурним режимом ґрунту та вмістом мінерального азоту у ґрунті. Нітрифікація переважно відбувається в добре аерованих ґрунтах з помірним вмістом води, тоді як денітрифікація відбувається в анаеробних умовах, переважно у важких ґрунтах із мізерним дренажем. Вклад кожного процесу у викиди N<sub>2</sub>O контролюється та обмежується біогеохімією ґрунту.

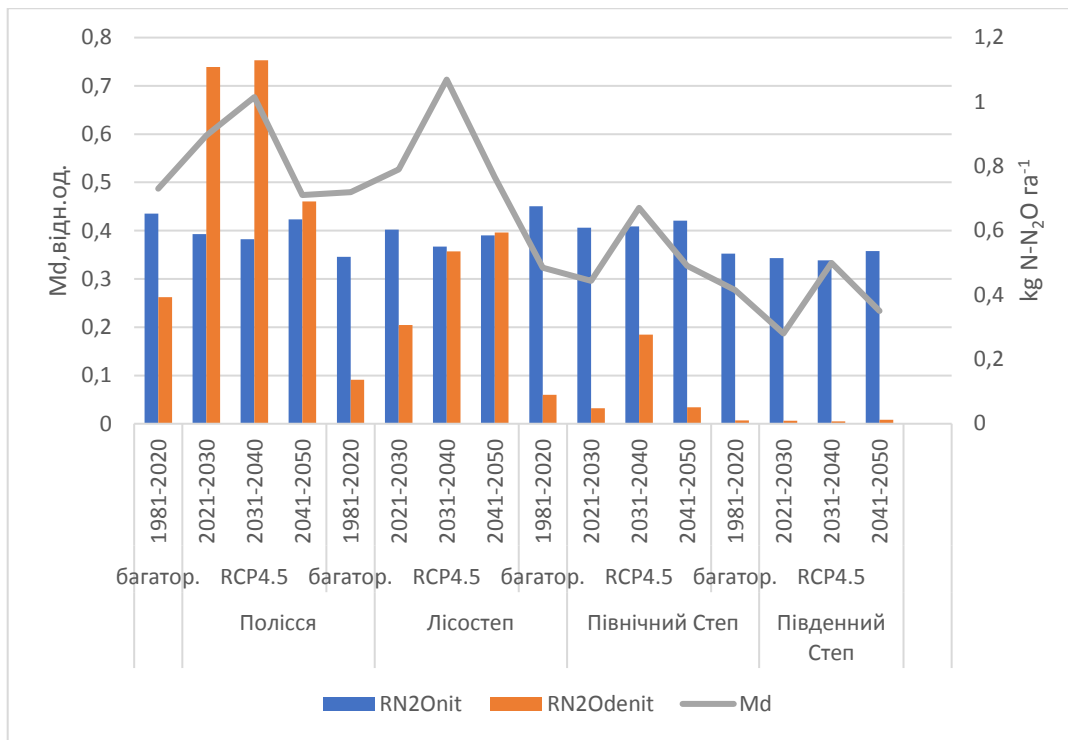
Зупинимося на результатах моделювання цих процесів протягом весняно-літнього періоду вегетації пшениці озимої в умовах зміни клімату. Вони наведені на рис. 2 для основних агрокліматичних зон України.

У ґрунтово-кліматичних умовах *Полісся* за середніх багаторічних агрометеорологічних умов спостерігається емісія N<sub>2</sub>O, яка переважно відбувається за рахунок нітрифікації. Її частка становить 62 % від сумарної величини емісії (1,046 кг N-N<sub>2</sub>O на га). Характеристика умов зволоження за показником зволоження Шашко (0,487 відн. од.) дозволяє такі умови ідентифікувати як слабо посушливі, при цьому температура повітря становить 13,0 °С.

У першому десятилітті будуть спостерігатись помірно-вологі умови зволоження (коефіцієнт зволоження Шашко буде дорівнювати 0,597 відн.од., температура повітря складатиме 11,5 °С). Ще більш інтенсивним буде зволоження в другому десятилітті (коефіцієнт зволоження Шашко буде дорівнювати 0,677 відн.од., температура повітря складатиме 11,3 °С).

Очікувані за сценарієм RCP4.5 волого-температурні умови призведуть до зміни співвідношення емісії N<sub>2</sub>O між двома її складовими (нітрифікація та денітрифікація). Так, при більшому зволоженні ґрунту нітрифікація уповільнюється та зростає інтенсивність процесу денітрифікації. Це добре видно з даних рис. 2, частка емісії за рахунок денітрифікації і у першому і у другому десятиліттях збільшиться до 65–66 % від загальної суми емісії (1,698–1,703 кг N-N<sub>2</sub>O на га). У третьому десятилітті очікується деяке погіршення умов зволоження до величини показника Md, близьких до умов, які характеризуються як середня посуха, температура повітря складатиме 12,1 °С. Такі волого-температурні умови у третьому десятилітті знизять частку емісії за рахунок денітрифікації до 49 % від загальної суми емісії (1,321 кг N-N<sub>2</sub>O на га).

Для середніх багаторічних умов *Лісостепу* при величині показника Md 0,480 відн.од. та температурі повітря 13,5 °С характерним буде значне переважання емісії N<sub>2</sub>O за рахунок нітрифікації. В таких умовах її частка становитиме 74 % від загальної величини емісії (0,706 кг N-N<sub>2</sub>O на га).



**Рис. 2. Динаміка емісії N<sub>2</sub>O за рахунок нітрофікації (RN<sub>2</sub>Onit) та денітрофікації (RN<sub>2</sub>Odenit) із агроєкосистеми озимої пшениці та показника зволоження Шашко Md**

Джерело: авторські дослідження.

Очікується, що деяке поліпшення умов зволоження в першому десятилітті (Md зросте до 0,527 відн. од. при температурі повітря 12,3 °C) призведе до деякої зміни співвідношення двох потоків емісії N<sub>2</sub>O, остання за рахунок нітрифікації становитиме 66 % від загальної суми (0,910 кг N-N<sub>2</sub>O на га). Разом з цим відбудеться зростання абсолютної величини емісії N<sub>2</sub>O за рахунок денітрифікації порівняно з багаторічною величиною (0,307 порівняно з 0,187 кг N-N<sub>2</sub>O на га). Слід відмітити, що для другого та третього десятиліть за показниками зволоження Md 0,511–0,713 відн. од. та температурах повітря 11,4–12,1 °C кількість емісії за рахунок обох процесів практично зрівняється. Для цих десятиліть сумарно емісія N<sub>2</sub>O становитиме 1,089–1,179 кг N-N<sub>2</sub>O на га.

Для *Північного Степу* переважним потоком емісії N<sub>2</sub>O є потік емісії за рахунок нітрифікації. За середніх багаторічних умов (Md дорівнює 0,323 відн. од., що характеризуються як сильно посушливі умови, і температура повітря становить 14,7 °C) потік емісії за допомогою нітрифікації становить 88 % від загальної суми 0,766 кг N-N<sub>2</sub>O на га. Слід очікувати аналогічної ситуації і в першому десятилітті. Це буде викликано погіршенням умов зволоження при температурі повітря 13,4 °C. Емісія N<sub>2</sub>O за рахунок нітрифікації становитиме 92 % від загальної суми 0,659 кг N-N<sub>2</sub>O на га. При поліпшенні режиму зволоження (Md зросте до 0,447 відн. од.) при температурі повітря 14,2 °C, у другому десятилітті дещо зменшиться частка емісії N<sub>2</sub>O за рахунок нітрифікації (до 69 %) і підвищиться частка емісії N<sub>2</sub>O

з допомогою денітрифікації (до 31 %). У другому десятилітті сумарна емісія N<sub>2</sub>O становитиме 0,890 кг N-N<sub>2</sub>O на га. Для кліматичних умов третього десятиліття очікується, що умови зволоження погіршуватимуться. За показником зволоження Md (0,327 відн. од.) вони характеризуються як сильна посуха. Температура повітря становитиме 13,8 °С. Процес денітрифікації сповільниться, кількість емісії за рахунок нітрифікації дещо зросте до загальної суми 0,683 кг N-N<sub>2</sub>O на га.

Агрокліматичні умови *Південного Степу* як багаторічні, так і очікувані сценарні характеризуються за критерієм Md як посушливі. Слід відмітити, що перше десятиліття ідентифікується як дуже посушливе. Процеси денітрифікації в середньому багаторічному і в очікуваних умовах практично відсутні (вони становлять 0,007–0,012 кг N-N<sub>2</sub>O на га). За багаторічних умов сумарна емісія N<sub>2</sub>O становитиме 0,539 г N-N<sub>2</sub>O на га, а в сценарні роки очікується в межах 0,515–0,549 кг N-N<sub>2</sub>O на га при температурі повітря 14,5–4,9 °С.

Таким чином, за період весняно-літньої вегетації озимої пшениці найбільша емісія N<sub>2</sub>O (1,089–1,703 кг N-N<sub>2</sub>O на га) очікується при високому рівні зволоження (Md дорівнює 0,474–0,713 відн.од. і температура повітря 11,3–13,0 °С) при високій інтенсивності процесів нітрифікації та денітрифікації. Середній рівень емісії N<sub>2</sub>O (0,706–0,890 кг N-N<sub>2</sub>O на га) створюється при зволоженні на рівні Md 0,298–0,447 відн. од. та температурі повітря 13,4–14,7 °С. При цьому відбувається уповільнення процесів денітрифікації та зростання частки вкладу емісії за рахунок нітрифікації. Найменша емісія N<sub>2</sub>O (0,508–0,537 кг N-N<sub>2</sub>O на га) очікується в умовах сильної та дуже сильної посухи (за критерієм Md), при підвищеній середній температурі 14,5–15,2 °С за весняно-літній період вегетації пшениці озимої.

**Дискусія.** Першу спробу оцінити зміну агрокліматичних умов весняно-літнього періоду вегетації озимої пшениці у зв'язку із змінами клімату було виконано в роботі [632]. При цьому як сценарії зміни кліматичних параметрів, були використані опубліковані в [633] результати побудови сценаріїв зміни клімату в Україні (до 2030–2040 рр.):

- розрахунків змін кліматичних показників за стаціонарними моделями загальної циркуляції атмосфери, що досліджують реакцію кліматичної системи на подвоєння вмісту CO<sub>2</sub>: GFDL (модель Лабораторії геофізичної гідродинаміки США); UKMO (модель Метеорологічного бюро Сполученого Королівства);
- сценаріїв зміни температури повітря та кількості атмосферних

---

<sup>632</sup> Полевой А. Н., Кульбида Н. И., Трофимова И. В., Адаменко Т. И. Моделирование влияния изменений климата на формирование продуктивности озимой пшеницы в Украине. *Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем*. 2005. Т. XX. С. 191–218.

<sup>633</sup> Україна та глобальний парниковий ефект. Книга 2. Вразливість та адаптація екологічних та економічних систем до зміни клімату / за ред. В. В. Васильченка, М. В. Рапцуна, І. В. Трофімової. Київ : Агентство раціонального використання енергії та екології, 1998. 208 с.

опадів в Україні на основі результатів розрахунків за нестационарною моделлю, в якій моделюється відгук на поступове (як більш реалістичне) зростання вмісту парникових газів на 30 %, розроблене Лабораторією геофізичної гідродинаміки США (GFDL 30 %).

За виконання досліджень як базових агрокліматичних величин розглядалися середні багаторічні характеристики у період 1961–1990 рр. По відношенню до цих величин розглядалася зміна агрокліматичних умов осінньої вегетації, перезимівлі та весняно-літньої вегетації озимої пшениці за різних сценаріїв зміни клімату.

Цікавим є порівняння як середніх багаторічних даних за різні часові інтервали, так і ранніх і пізніших сценарних даних за весняно-літню вегетацію озимої пшениці (табл. 2).

**2. Порівняння середніх багаторічних за періоди (1981–2020 рр.) і (1961–1990 рр.) та сценарних (RCP4.5) і (GFDL, GFDL 30 % та UKMO) показників агрометеорологічних умов весняно-літньої вегетації озимої пшениці для агрокліматичних зон України**

Сценарій RCP 4.5 період, рік	Показники		Сценарій, період, рік	Показники	
	Температура повітря, Т С	Опади, мм		Температура повітря, Т С	Опади, мм
<b>Полісся</b>					
1981–2020	13,0	231	1961–1990	15,2	260
2021–2030	11,5	216	GFDL	16,0	194
2031–2040	11,3	228	GFDL 30 %	14,2	196
2041–2050	12,1	188	UKMO	15,05	186
<b>Лісостеп</b>					
1981–2020	13,5	243	1961–1990	15,5	189
2021–2030	12,3	203	GFDL	16,4	157
2031–2040	11,4	230	GFDL 30 %	14,8	172
2041–2050	12,1	202	UKMO	15,6	174
<b>Північний Степ</b>					
1981–2020	14,7	182	1961–1990	15,8	147
2021–2030	13,4	143	GFDL	16,4	144
2031–2040	14,2	187	GFDL 30 %	15,8	151
2041–2050	13,8	142	UKMO	16,6	131
<b>Південний Степ</b>					
1981–2020	15,2	152	1961–1990	16,4	114
2021–2030	14,7	105	GFDL	15,8	107
2031–2040	14,5	145	GFDL 30 %	14,3	111
2041–2050	14,9	130	UKMO	14,6	106

Джерело: авторські дослідження.

В умовах Полісся різниця багаторічних значень за два різні часові інтервали склала 2,2 °С. Температура весняно-літньої вегетації озимої пшениці виявилася нижчою в пізніший період, що пов'язано зі зсувом як початку вегетації, так і всього періоду у бік більш ранніх термінів. Кількість опадів зменшилась на 29 мм. Очікувані за сценарієм RCP4.5 рівні температури повітря на 2031–2040 рр. передбачаються на 3–4,5 °С нижче порівняно зі сценаріями GFDL, GFDL 30 % і UKMO. Очікується більша кількість опадів (на 20–30 мм) за винятком сценарію UKMO.

Слід зазначити, що аналогічна тенденція зниження рівня температури повітря та підвищення (за рідкісним винятком) кількості опадів у період весняно-літньої вегетації озимої пшениці за сценарієм RCP4.5 у порівнянні з більш ранніми сценаріями зміни клімату зберігається і для Лісостепу, Північного Степу та Південного Степу. З певним ступенем обережності порівнюючи температуру повітря у період 1981–2020 рр. зі сценарними даними за сценаріями GFDL, GFDL 30 % та UKMO, що транспонуються на період 2030–2040 рр., можна сказати, що в останніх простежується тенденція до завищення рівня температур періоду весняно-літньої вегетації озимої пшениці.

За допомогою створеної нами моделі (*plant-agrosoil-GHG-model*) у чисельних експериментах отримано оцінки потенційної емісії CO<sub>2</sub> із ґрунтів агроєкосистеми озимої пшениці за період весняно-літньої вегетації культури за середніх багаторічних умов для всіх агрокліматичних районів України. Отримані оцінки стосовно Лісостепу (0,940 т С-CO<sub>2</sub> на га) та зони Північного Степу України (0,937 т С-CO<sub>2</sub> на га) досить добре узгоджуються з результатами, отриманими для орних земель Європи (0,840 т С-CO<sub>2</sub> на га) [634].

У дослідях з різним внесенням добрив та різною системою обробітку ґрунту полів кукурудзи в умовах північно-східної частини Лісостепу України [635] отримані результати відповідно при внесенні різних варіантів добрив (0,789–0,909 т С-CO<sub>2</sub> на га) та застосуванні різних способів обробітку ґрунту (0,622–0,701 т С-CO<sub>2</sub> на га). Співставлення з цими результатами можливо розглядати як додаткове підтвердження реальності отриманих нами потенційних оцінок викидів CO<sub>2</sub> для середніх багаторічних умов.

У тривалому стаціонарному досліді вивчалася динаміки виділення CO<sub>2</sub> з дерново-підзолистого супіщаного ґрунту нечорноземної зони [636] в залежності від культури, що вирощується, системи застосування добрив, характеру використання ґрунту, а також з різних типів ґрунтів. Результати

---

<sup>634</sup> Vleeshouwers L. M., Verhagen A. Carbon emission and sequestration by agricultural land use: a model study for Europe. *Global Change Biology*. 2002. Vol. 8. P. 519–530. doi: 10.1046/j.1365-2486.2002.00485.x

<sup>635</sup> Сябрук О. П. Оцінка втрат вуглецю з чорнозему типового за різних способів обробки та систем удобрення. *Агрохімія та ґрунтознавство*. 2013. Вип. 80. С. 140–146.

<sup>636</sup> Шилова Н. А. Динаміка виділення CO<sub>2</sub> в посевах польових культур на дерново-подзолистых и торфяных почвах. *Почвоведение и агрохимия*. 2014. № 1 (52). С. 104–113.

багаторічних досліджень показали, що продукування вуглекислого газу однією і тією самою культурою в різні роки варіює залежно від гідротермічних умов, коливання між мінімальним та максимальним виділенням С-СО<sub>2</sub> становить по ячменю 111–467 кг/га С-СО<sub>2</sub>, люпину – 429–1356 кг/га, пару –141–1033 кг/га, озимої пшениці – 792–1259 кг/га, картоплі – 521–883 кг/га. У отриманих нами розрахунках близькі до нечорноземної зони за ґрунтово-кліматичними умовами будуть умови Полісся, де емісія СО<sub>2</sub> за багаторічними даними становила на рівні 0,673 т С-СО<sub>2</sub> на га, що досить близько до даних, отриманих в умовах Нечорнозем'я.

Отримана нами в чисельних експериментах з моделлю оцінка потенційної емісії N<sub>2</sub>O за період весняно-літньої вегетації озимої пшениці за середніх багаторічних умов показала, що вона найвища у Поліссі (1,046 кг N-N<sub>2</sub>O на га), менша у Лісостепу (0,706 кг N-N<sub>2</sub>O на га) та Північного Степу (0,766 кг N-N<sub>2</sub>O на га) і найменша у Південному Степу (0,539 кг N-N<sub>2</sub>O на га). Наші модельні дані добре співвідносяться даними досліджень емісії N<sub>2</sub>O з орних ґрунтів Європи, які оцінюються як 0,2–6,6 кг N-N<sub>2</sub>O на га в рік [637].

Для умов Саксонії за допомогою моделі DNDC була виконана щорічна оцінка емісії N<sub>2</sub>O [624]. В цій роботі розглядалися викиди N<sub>2</sub>O із сільськогосподарських та лісових ґрунтів. Стосовно першої групи ґрунтів емісія оцінювалася в 0,5–26,0 кг N-N<sub>2</sub>O на га в рік, для другої – 0,04–19,76 кг N-N<sub>2</sub>O на га в рік. Слід зазначити, що отримані нами за середніх багаторічних умов дані про емісію N<sub>2</sub>O у ґрунтово-кліматичних зонах України узгоджуються з цими величинами.

Значний інтерес становить зіставлення отриманих нами сценарних даних емісії СО<sub>2</sub> та N<sub>2</sub>O зі сценарними даними, отриманими в роботі з іншою моделлю [625] для території, ґрунтово-кліматичні умови якої порівняно близькі до умов України.

В цій роботі модель DNDC була використана в умовах східної частини Польщі для моделювання потоків вуглецю, що відбуваються на кордоні між атмосферою та екосистемою. У повній 4-ти річній сівозміні передбачувані зміни клімату у майбутніх сценаріях призвели до зниження швидкості накопичення вуглецю. У базовому сценарії С2000 під озимою пшеницею в атмосферу було викинуто 1868 та 1725 кг С-СО<sub>2</sub> на га в рік відповідно при різних варіантах обробітку ґрунту. Робиться висновок, що з підвищенням температури та зменшенням середньої суми опадів інтенсивність викидів СО<sub>2</sub> під озимою пшеницею знизилася. Для сценарія С2030 також відмічається зменшення викидів на 61 та 83 кг С-СО<sub>2</sub> на га в рік при обробітку ґрунту та скороченому обробітку ґрунту відповідно. Для більш пізнього сценарію С2050 емісія становила 1721 та

---

<sup>637</sup> What predicts nitrous oxide emissions and denitrification N-loss from European soils? / E.-A. Kaiser et al. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde*. 1996. Vol. 159 (6). P. 541–547. doi: 10.1002/jpln.1996.3581590604

1541 кг С-СО<sub>2</sub> на га в рік для обох систем обробітку ґрунту. Взагалі, емісія СО<sub>2</sub> під озимою пшеницею знижувалась від базового періоду. Відносна близькість кліматичних умов дозволяє одержані в умовах східної частини Польщі результати порівнювати з нашими модельними даними, які отримано для Лісостепу України. У наших розрахунках також очікується зниження емісії за період весняно-літньої вегетації озимої пшениці СО<sub>2</sub> від базового рівня 0,937 т С-СО<sub>2</sub> на га до 0,833 т С-СО<sub>2</sub> на га до 2030 року і до 0,828 т С-СО<sub>2</sub> на га до 2050 року. Проте, слід зазначити, що, незважаючи на те, що тенденції зниження рівня емісії СО<sub>2</sub>, отримані в наших розрахунках і в умовах східної частини Польщі збігаються, чисельні значення величин практично вдвічі менші порівняно з результатами, які отримано в умовах Польщі.

Розраховані в умовах східної частини Польщі середні сукупні річні викиди N<sub>2</sub>O з ґрунту для 4-річного циклу сівозміни з використанням моделі DNDC були різними для кожного кліматичного сценарію та системи обробітку ґрунту. Для базового сценарію С2000 емісія N<sub>2</sub>O під озимою пшеницею склала 1,59 та 1,63 кг N-N<sub>2</sub>O на га в рік відповідно при обробітку ґрунту та скороченому обробітку ґрунту. При реалізації сценарію С2030 емісія становила 1,25 та 1,41 кг N-N<sub>2</sub>O на га в рік для обох систем обробітку ґрунту. При можливій реалізації більш пізнього сценарію С2050 зменшення емісії N<sub>2</sub>O порівняно з базовою становило 0,39 кг N-N<sub>2</sub>O на га в рік. Наші модельні оцінки потенційної емісії N<sub>2</sub>O у зоні Лісостепу будуть в 1,4–2 рази (за деяким винятком) менші, ніж у роботі [625]. Цілком очевидно, що як і при оцінці результатів моделювання емісії СО<sub>2</sub>, це можна пояснити відмінностями в агрохімічних умовах вирощування озимої пшениці (норма внесення N, тип добрива, вміст органічного вуглецю в ґрунті, рН, текстура ґрунту), які природно відрізнялися

**Висновки.** Моделювання емісії СО<sub>2</sub> та N<sub>2</sub>O із ґрунтів агроєкосистеми озимої пшениці в період її весняно-літньої вегетації дозволило дати оцінку інтенсивності цих процесів для середніх багаторічних та сценарних умов.

Встановлено особливості змін клімату за десятиліттями (2021–2030, 2031–2040, 2041–2050 рр.) стосовно базового періоду по основним агрокліматичним зонам України: У Поліссі кількість опадів у першому та другому десятиліттях незначно відрізнятиметься від багаторічних значень вона становитиме 81,4 % від багаторічних значень. За показником зволоження ГТК Селянинова перше десятиліття відрізнятиметься незначною посушливістю, друге – гарним зволоженням, третє – слабкою посушливістю; у Лісостепу очікується зменшення кількості опадів у першому та третьому десятиліттях на 16 % та у другому – на 5 %. У Північному Степу кількість опадів у першому та третьому десятиліттях суттєво (на 21 %) зменшиться. Для другого десятиліття умови зволоження

складуться сприятливо, кількість опадів перевищить кліматичну норму. У Південному Степу кількість опадів у першому та третьому десятиліттях зменшиться: у першому десятилітті на 31 %, у третьому – на 14 %. Менш значним буде скорочення кількості опадів у другому десятилітті (на 5 %).

Здійснене з певним ступенем умовності порівняння температури повітря за період 1981–2020 рр. зі сценарними даними за сценаріями GFDL, GFDL 30 % та UKMO, що транспонуються на період 2030–2040 рр., показало, що в останніх простежується тенденція до завищення рівня температур періоду весняно-літньої вегетації озимої пшениці.

Виконана оцінка емісії CO<sub>2</sub> показала, що найбільші викиди CO<sub>2</sub> (0,886–0,940 т С-CO<sub>2</sub> на га) очікуються при середніх за період весняно-літньої вегетації озимої пшениці запасах продуктивної вологи в орному шарі ґрунту 20–40 мм. Перевищення рівня середніх за період запасів вологи понад 40 мм та температура повітря 11–12 °С супроводжується зниженням рівня емісії CO<sub>2</sub> (0,645–0,658 т С-CO<sub>2</sub> на га). У посушливих умовах при зниженні середніх за період весняно-літньої вегетації пшениці озимої запасів вологи в орному шарі ґрунту менше 20 мм і підвищених середніх за весняно-літній період вегетації пшениці озимої температурах повітря (14,5–15,2 °С) очікується зниження емісії CO<sub>2</sub> (0,755–0,770 т С-CO<sub>2</sub> на га).

Проведені чисельні експерименти з моделлю показали, що найбільша емісія N<sub>2</sub>O (1,089–1,703 кг N-N<sub>2</sub>O на га) очікується при високому рівні зволоження (Md дорівнює 0,474–0,713 відн. од. і температурі повітря 11,3–13,0 °С) при високій інтенсивності процесів нітрифікації та денітрифікації. Умови, які характеризують середній рівень емісії N<sub>2</sub>O (0,706–0,890 кг N-N<sub>2</sub>O на га), створюються при зволоженні на рівні Md 0,298–0,447 відн.од. та температурі повітря 13,4–14,7 °С. Відбувається уповільнення процесів денітрифікації та зростання частки вкладу емісії за рахунок нітрифікації. Найменша емісія N<sub>2</sub>O (0,508–0,537 кг N-N<sub>2</sub>O на га) очікується в умовах сильної та дуже сильної посухи (за критерієм Md), за підвищеної середньої за весняно-літній період вегетації пшениці озимої 14,5–15,2 °С.

Таким чином, для умов України на основі чисельних експериментів із комплексною моделлю емісії парникових газів із ґрунту агроecosистеми озимої пшениці та сценарію зміни клімату RCP4.5 в умовах майбутніх кліматичних змін: встановлені особливості впливу температури та умов зволоження на інтенсивність процесів емісії CO<sub>2</sub> та N<sub>2</sub>O; отримано кількісні оцінки потенціалу емісії CO<sub>2</sub> та N<sub>2</sub>O із ґрунтів агроecosистеми озимої пшениці по агрокліматичних зонах України на період до 2050 року.