

МОДЕЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРНО ЗУМОВЛЕНИХ ЗМІН ЗАПАСІВ ОРГАНІЧНОГО ВУГЛЕЦЮ ДЕРНОВО-ПІДЗОЛИСТИХ ҐРУНТІВ ПОЛІССЯ МЕТОДАМИ ГЕНЕТИЧНОГО ПРОГРАМУВАННЯ

П. І. Трофименко¹, д. с.-г. наук, професор

В. Б. Левченко¹, к. с.-г. наук, доцент

О. Л. Стебляк²

¹Національний університет "Чернігівський колегіум" імені Т.Г. Шевченка

*²Директор Житомирського регіонального центру державної установи
«Інститут охорони ґрунтів України»*

Як відомо, сучасні зміни клімату дедалі сильніше впливають на функціонування ґрунтових систем, у тому числі й в регіонах із дерново-підзолистими ґрунтами легкого гранулометричного складу. Для Полісся України ці зміни проявляються у вигляді довготривалої дегуміфікації, зумовленої поєднанням антропогенного навантаження та температурно зумовленої мінералізації органічної речовини.

Метою дослідження є кількісна оцінка температурно зумовлених змін запасів органічного вуглецю в орному шарі дерново-підзолистого супіщаного глейового ґрунту Полісся, а також прогнозування їхньої динаміки з урахуванням існуючих кліматичних трендів. Особлива увага приділялася застосуванню методів генетичного програмування (GP), які дозволяють відтворювати складні залежності між температурним режимом і запасами Сорґ.

Слід зауважити, що у даному дослідженні термін "квазірівноважний стан" використано як аналітичне наближення, що описує середній баланс між процесами акумуляції та мінералізації Сорґ за сталих умов, і не розглядається як фундаментальна властивість ґрунтової системи.

Об'єктом дослідження обрано дані моніторингових спостережень на ділянці № 7, проведених в різний час фахівцями центрів «Держродючість» (Житомирська область), що репрезентує дерново-підзолистий супіщаний глейовий ґрунт на лесовидних відкладах. Ґрунт характеризується вмістом гумусу 1,26 %, рН_{KCl} - 5,6, вмістом рухомих форм азоту 68,4 мг/кг, фосфору 130 мг/кг та калію 70 мг/кг. Зазначені агрохімічні характеристики відображають потенційну вразливість ґрунту до температурно зумовлених змін інтенсивності мінералізації органічної речовини, що надалі підтверджується результатами трендового та GP-моделювання.

Формування кліматичної та ґрунтової бази даних.

Ключовим етапом дослідження стало створення у форматі бази даних, яка слугувала основою для всіх подальших розрахунків і моделей. Виміряні значення температури були зведені в єдину таблицю (формат Excel) і включали багаторічні ряди середньорічної, сезонної (теплого та холодного періодів) температури повітря. Джерелом цих даних стали інструментальні

спостереження, виконані в геофізичній лабораторії Б. Срезневського (м. Київ).

Сформована база охоплює період з 1855 по 2024 рр. Саме ця довжина ряду є принципово важливою для відокремлення короточасних флуктуацій від довготривалих трендів і для коректного виявлення кліматичної циклічності.

Окрім кліматичних показників, база даних включала результати ґрунтового моніторингу, розраховані запаси органічного вуглецю та похідні показники швидкості їх зміни.

Методичні підходи до моделювання. Запаси органічного вуглецю для шару 0-20 см розраховано на основі даних про вміст гумусу в ґрунтах з урахуванням фактора Ван-Беммелена за формулою:

$$C_{\text{орг}} = 0,1 \cdot H \cdot \rho \cdot (0,58 \cdot G) \quad (1)$$

$C_{\text{орг}}$ - запаси органічного вуглецю, т/га

H - потужність шару, м

ρ - щільність складення ґрунту, г/см³ (або т/м³)

G - вміст гумусу, %

0,58 - фактор Ван-Беммелена

0,1 - коефіцієнт переходу до т/га

Динаміка $C_{\text{орг}}$ розглядалася у часовому вимірі як функція $C_{\text{орг}}(t)$, де незалежною змінною є час. Для оцінки інтенсивності процесів дегуміфікації застосовано диференціальний підхід, відповідно до якого швидкість зміни запасів органічного вуглецю визначається першою похідною:

$$\left[\frac{dC_{\text{орг}}}{dt} \right] \quad (2)$$

Від'ємні значення цієї величини інтерпретуються як втрати органічного вуглецю, додатні - як процеси його акумуляції в ґрунті.

Температура повітря в запропонованій моделі виступає як домінуючий фактор, що зумовлює величину $C_{\text{орг}}$.

У загальному вигляді це можна записати як:

$$\left[\frac{dC_{\text{орг}}}{dt} = f(T(t), X(t)) \right] \quad (3)$$

де $T(t)$ - температурний режим у часі, а $X(t)$ - сукупність інших чинників (вологість, агротехнічне навантаження, властивості ґрунту).

Для аналізу «температурної чутливості» до зміни запасів $C_{\text{орг}}$ використано правило ланцюга диференціювання:

$$\left[\frac{dC_{\text{орг}}}{dt} = \frac{dC_{\text{орг}}}{dT} \cdot \frac{dT}{dt} \right] \quad (4)$$

У цьому виразі величина $\frac{dC_{\text{орг}}}{dt}$ виражає температурну чутливість органічного вуглецю ґрунту, тоді як $\frac{dC_{\text{орг}}}{dT}$ відображає характер та швидкість кліматичних змін.

На цій основі введено температурно-градієнтну (GT) функцію, яка використовується для оцінки чутливості запасів органічного вуглецю до змін температури повітря. GT-функція відображає інтенсивність температурно зумовлених втрат $C_{\text{орг}}$ і дозволяє кількісно охарактеризувати вплив температури

на процеси дегуміфікації в різних діапазонах температур.

Урахування довготривалих трендів і кліматичної циклічності. На відміну від класичних регресійних моделей, які переважно описують лінійні або прості нелінійні залежності, методи генетичного програмування дозволяють одночасно враховувати довготривалі тренди та квазіциклічні коливання кліматичної системи. У даному дослідженні GP-моделювання базувалося на 146-річному температурному ряді, що дало змогу відтворити не лише загальну тенденцію потепління, а й багаторічні кліматичні цикли різної тривалості.

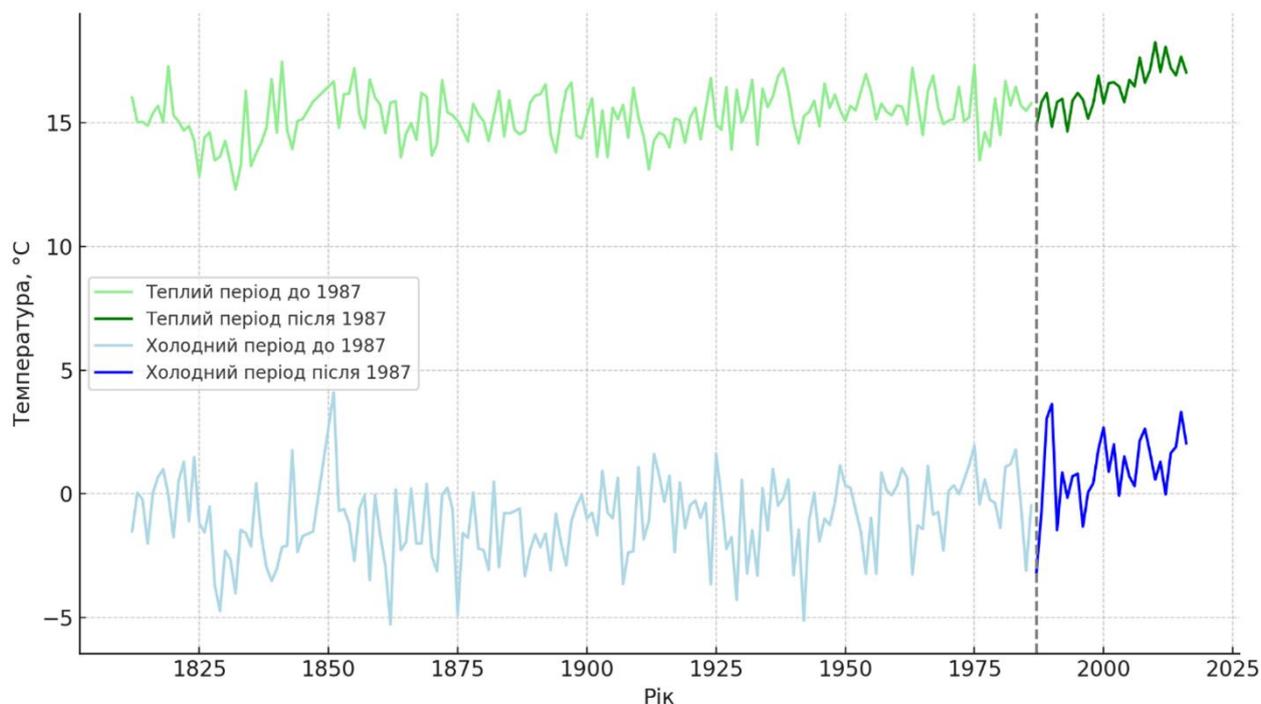


Рис. 1. Температурні зміни за період досліджень.

Кліматична циклічність у моделі температурних змін інтерпретується як результат накладання періодичних та квазіперіодичних коливань температури повітря, пов'язаних із природними кліматичними ритмами. Перевагою підходу GP є те, що повторювані температурні коливання виявляються самою моделлю, без попереднього задання їх математичної форми.

У часових рядах температури повітря простежуються коливання різної тривалості починаючи від міжрічних до багатодесятирічних, які мають квазіперіодичний характер і накладаються на довготривалий кліматичний тренд.

Результати досліджень. Фактична динаміка запасів органічного вуглецю за 1987–2016 рр. свідчить про втрати близько 3,53 т/га С, що становить 11,9 % від початкового рівня. Квадратична модель тренду без урахування температурного чинника показує швидке зменшення швидкості втрат Сорґ і практичний вихід $\frac{dC_{\text{орг}}}{dt}$ практично до нульових значень у межах 2015–2020 рр.

Отримані трендові та GP-оцінки свідчать про наближення системи до стану, близького до квазірівноважного, у контексті затухання швидкості зміни запасів органічного вуглецю до найменших значень за збереження поточного рівня агронавантаження та у відповідності з існуючими кліматичними

сценаріями.

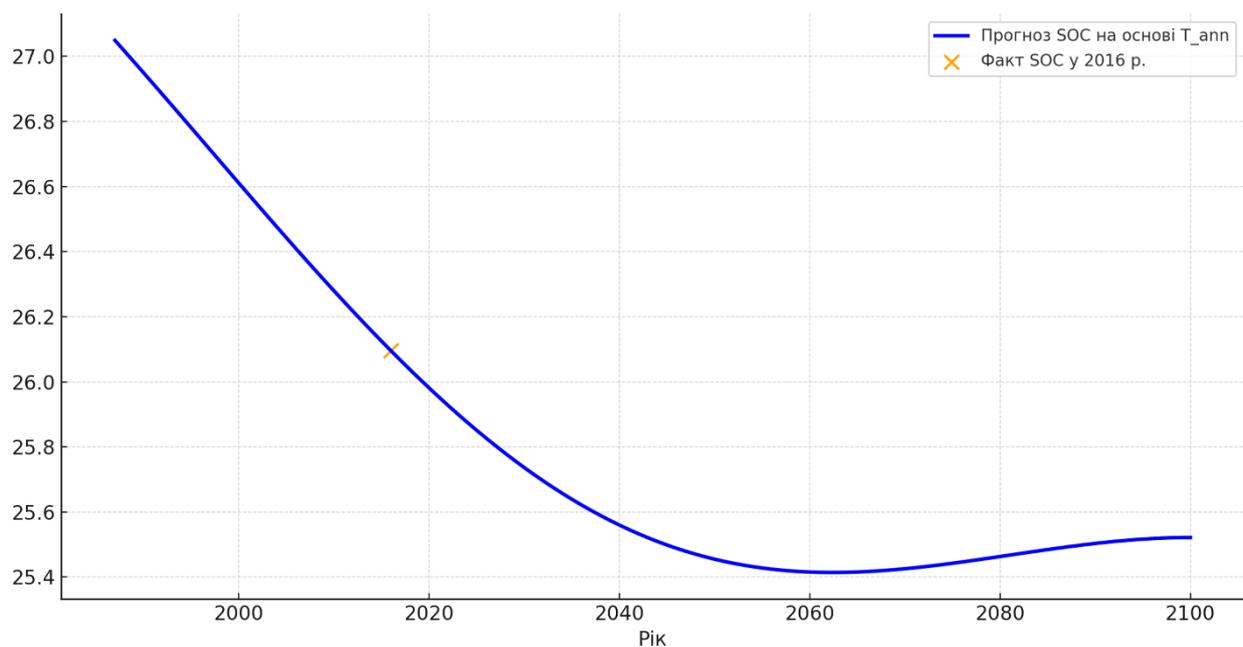


Рис. 2. Динаміка зміни запасів гумусу у дерново-підзолистому супіщаному глейовому ґрунті на лесовидних відкладах (еквівалент С) з урахуванням впливу температури повітря, 1987 – 2100 рр.

Водночас модель із урахуванням довготривалого кліматичного тренду демонструє «збереження» Сорґ протягом усього прогнозного періоду, хоча з невеликим середнім темпом (порядку 0,009 т/га·рік).

Десятирічні середні значення $\frac{dC_{\text{орг}}}{dt}$ свідчать про поступове затухання втрат і формування стану, близького до квазірівноважного, орієнтовно у 2058 ± 3 роки.

Результати GP-моделювання підтверджують, що температура пояснює майже 90 % міжрічної варіації запасів органічного вуглецю.

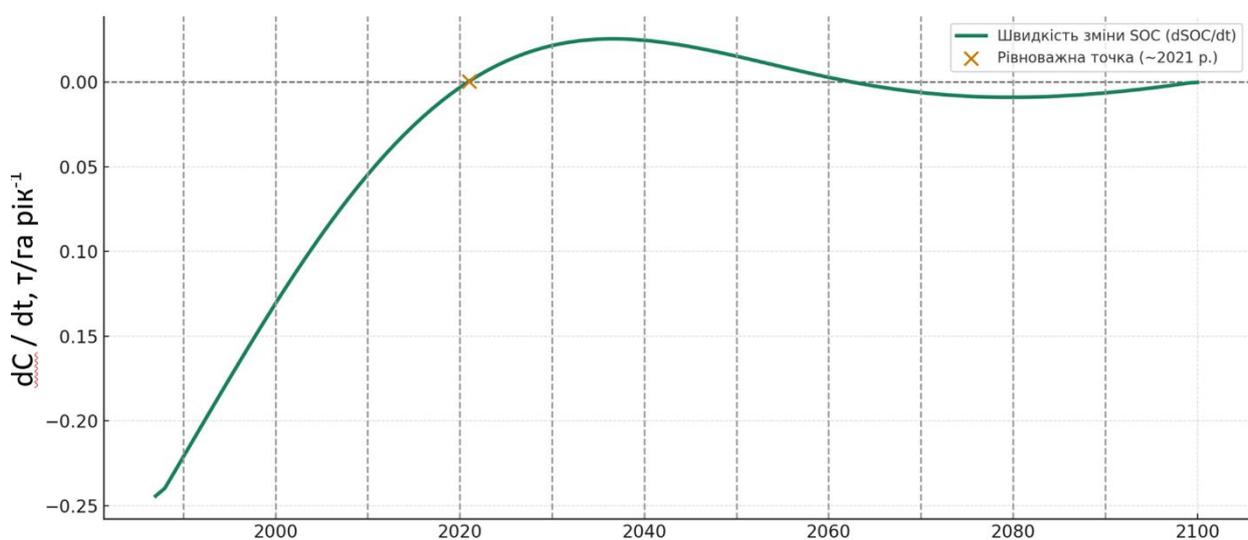


Рис. 3. Швидкість зміни запасів С (0–20 см) у дерново-підзолистому супіщаному глейовому ґрунті на лесовидних відкладах

Поєднання довготривалого температурного тренду та кліматичної циклічності дозволило оцінити наближення ґрунту до нової рівноважної точки приблизно у 2060 р., із прогнозованими запасами Сорґ на рівні близько 25,5 т/га.

Висновки.

Дерново-підзолистий супіщаний глейовий ґрунт Полісся характеризується кліматично зумовленою дегуміфікаційною траєкторією, типовою для ґрунтів легкого гранулометричного складу. За 1987–2016 рр. втрати органічного вуглецю становили близько 3,53 т/га (11,9 % від початкового рівня), що свідчить про істотне ослаблення вуглецевого пулу під впливом сучасних кліматичних змін.

GP-моделювання методами генетичного програмування показало, що зміни температури повітря пояснюють майже 90 % міжрічної варіації запасів Сорґ, що дозволяє розглядати клімат як провідний чинник дегуміфікації поряд з агрогенним навантаженням і властивостями ґрунту.

Модель без урахування температурного чинника вказує на швидке затухання втрат Сорґ і наближення ґрунтової системи до певного рівноважного стану вже у 2015–2020 рр. Натомість модель з урахуванням довготривалого температурного тренду демонструє збереження дегуміфікації протягом усього прогнозного періоду за невеликого середнього темпу (~0,009 т/га·рік) та формування нового квазірівноважного стану орієнтовно близько 2060 року.

Урахування поєднання довготривалого потепління та кліматичної циклічності дозволило оцінити параметри цього квазістану, для якого прогнозовані запаси органічного вуглецю становлять близько 25,5 т/га.

Отримані результати підтверджують високу чутливість дерново-підзолистих супіщаних ґрунтів Полісся до температурних змін і коректність застосування методів генетичного програмування для прогнозування довготривалої динаміки органічного вуглецю.

Список джерел

1. Трофименко П.І., Паламарчук, Р. П., Трофименко, Н. В., Вишневський, Ф. & О., Борисов, Ф. І., (2018). Запаси та втрати органічного вуглецю дерново-підзолистими ґрунтами Житомирського Полісся. У Інноваційні агротехнології: тези Всеукраїнської науково-практичної конференції (28 березня 2018 р., с. 56–58). Умань, Україна.

2. Трофименко П.І., Паламарчук, Р. П., Вишневський, Ф. О., Трофименко, Н. В., & Борисов, Ф. І., (2018). Запаси та втрати органічного вуглецю дерново-підзолистими ґрунтами Житомирського Полісся у контексті змін клімату. *Агрохімія і ґрунтознавство*, спец. випуск до XI з'їзду ґрунтознавців та агрохіміків України (17–21 вересня 2018 р., с. 220–223). Харків, Україна.

3. Стеблянюк, О. Л., Трофименко, П. І., Левченко, В. Б., Фучило, Я. Д., & Рудовський, П. Д. (2025). Запаси та втрати органічного вуглецю дерново-підзолистими ґрунтами Полісся у процесі їх переходу до квазірівноважного стану. У Матеріалах конференції «Поліські наукові читання – 2025», 2-4 грудня 2025 року.