

Комплексне прогнозування геопросторових змін родючості ґрунтів Черкаської області з використанням моделей CLUE-S та ANN

Надія Сопова¹

ст. викладач кафедри управління земельними ресурсами, геодезії та кадастру,

¹ Державний біотехнологічний університет, Харків, Україна,

e-mail: lnau.sopova@gmail.com,  <https://orcid.org/0000-0003-0597-5598>;

Роман Оленір²

к. с.-г. н., доцент кафедри землеробства і агрохімії імені В. І. Сазанова,

² Полтавський державний аграрний університет, Полтава, Україна,

e-mail: roman.olepir@pdau.edu.ua,  <https://orcid.org/0000-0002-0825-7914>;

Дмитро Сопов³

д. філософії (науки про Землю), доцент кафедри геодезії, землеустрою та земельного кадастру,

³ Одеський державний аграрний університет, Одеса, Україна,

e-mail: odau.sopov@gmail.com,  <https://orcid.org/0000-0002-2684-4688>;

Ірина Кирпичова⁴

к. біол. н., доцент кафедри садово-паркового господарства та екології,

⁴ ДЗ «Луганський національний університет імені Тараса Шевченка», Полтава, Україна,

e-mail: kirinopsis@gmail.com,  <https://orcid.org/0000-0003-4633-9379>;

Катерина Березенко⁴

ст. викладач кафедри садово-паркового господарства та екології,

e-mail: berezenko.e.s@gmail.com,  <https://orcid.org/0000-0003-3975-5278>;

Ірина Чередниченко⁴

к. с.-г. н., доцент кафедри хімії, географії та наук про Землю,

e-mail: soil911@ukr.net,  <https://orcid.org/0009-0005-6325-4870>;

Наталія Маслова⁵

к. геогр. н., доцент кафедри природничих наук і методик їхнього навчання,

⁵ Центральноукраїнський державний університет імені Володимира Винниченка,

Кропивницький, Україна,

e-mail: maslnatnic@ukr.net,  <https://orcid.org/0000-0002-2637-9755>;

Ірина Бузіна¹

к. с.-г. н., доцент кафедри екології та біотехнологій в рослинництві,

e-mail: nezabudka120187@gmail.com,  <https://orcid.org/0000-0002-0885-0558>;

Людмила Макєєва¹

к. н. з держ. упр., доцент кафедри управління земельними ресурсами, геодезії та кадастру,

e-mail: makeevafiz2017@gmail.com,  <https://orcid.org/0000-0002-9121-8560>;

Аліна Бубнікович⁶

ст. викладач кафедри агрономії та землеустрою,

⁶ Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, Київ, Україна,

e-mail: ab8190805@gmail.com,  <https://orcid.org/0000-0001-6553-321X>

Об'єктом дослідження є зміни родючості ґрунтів Черкаської області під впливом природних, соціально-економічних та антропогенних факторів. Проблема, що вирішувалася, полягає у необхідності створення науково обґрунтованої моделі прогнозування змін родючості ґрунтів, яка враховує просторову динаміку землекористування та взаємозв'язки між агрохімічними параметрами, типами використання земель та економічними факторами. В ході дослідження розроблено інтегровану модель прогнозування змін родючості основних типів ґрунтів регіону, що поєднує просторово-динамічну модель CLUE-S для аналізу змін землекористування та штучну нейронну мережу (ANN) для прогнозування агрохімічних показників. Встановлено, що рівень гумусу та рН є ключовими факторами, що визначають довготривалу продуктивність ґрунтів. Згідно з результатами моделювання, у разі збереження поточних тенденцій землекористування (BAU-сценарій) рівень гумусу може знизитися на 8–12 % до 2050 року, а рН – до 5,7, що призведе до зниження родючості на 15–20 %. У сценарії сталого управління (SLU) завдяки оптимізації сівозмін та заходам із підтримання високого вмісту органіки можливе збереження гумусу на рівні 4 % та стабілізація рН у межах 6,3–6,5, що покращує ефективність використання поживних речовин. Відмінною рисою отриманих результатів є комплексне врахування соціально-економічних факторів, таких як політика державних дотацій, рівень фінансування аграрного сектору та ринкова кон'юнктура, що дозволяє формувати реалістичні сценарії прогнозування

© Сопова Надія, Оленір Роман, Сопов Дмитро, Кирпичова Ірина, Березенко Катерина, Чередниченко Ірина,

Маслова Наталія, Бузіна Ірина,

Макєєва Людмила, Бубнікович Аліна, 2025

змін ґрунтових ресурсів. Сфера практичного використання отриманих результатів охоплює планування агроландшафтів, розробку стратегій сталого землекористування та формування політики управління земельними ресурсами. Застосування інтегрованої моделі CLUE-S + ANN дозволить оцінювати довгострокові наслідки зміни землекористування, оптимізувати використання ґрунтових ресурсів та запобігати їх деградації в умовах змін клімату та соціально-економічних трансформацій.

Ключові слова: землекористування, ґрунт, родючість ґрунтів, прогнозування, просторове моделювання, CLUE-S, ANN, деградація ґрунтів, агрохімічні показники.

Як цитувати: Сопова Надія, Олєпир Роман, Сопов Дмитро, Кирпичова Ірина, Березенко Катерина, Червониченко Ірина, Маслова Наталія, Бузіна Ірина, Макієєва Людмила, Бубнікович Аліна (2025). Комплексне прогнозування геопросторових змін родючості ґрунтів Черкаської області з використанням моделей CLUE-S та ANN. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Геологія. Географія. Екологія»*, (63), 411-425. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-63-30>

In cites: Sopova Nadiia, Olepir Roman, Sopov Dmytro, Kyrpichova Iryna, Berezenko Kateryna, Cherednychenko Iryna, Maslova Nataliia, Buzina Iryna, Makieieva Liudmyla, Bubnikovych Alina (2025). Comprehensive forecasting of geospatial changes in soil fertility in Cherkasy region using CLUE-S and ANN models. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Geology. Geography. Ecology*, (63), 411-425. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-63-30> [in Ukrainian]

Вступ. Вивчення родючості ґрунтів потребує врахування просторово-часових змін землекористування, які формуються під впливом економічних, соціальних і природних факторів. Для прогнозування таких змін широко застосовується модель CLUE-S, що дозволяє оцінювати сценарії розвитку територій. Однак агрохімічні властивості ґрунтів змінюються також під дією процесів мінералізації гумусу, акумуляції поживних речовин і хімічної деградації, тому для їх аналізу використовують штучні нейронні мережі (ANN), здатні моделювати складні багатфакторні взаємозв'язки.

Попри ефективність CLUE-S та ANN окремо, комплексних рішень, що поєднують прогнозування змін землекористування з оцінкою їх впливу на родючість ґрунтів, майже немає. Такий інтегрований підхід дозволив би враховувати й соціально-економічні фактори, підвищуючи точність моніторингу та управління земельними ресурсами. Поєднання CLUE-S і ANN дає змогу не лише прогнозувати зміни родючості, а й своєчасно виявляти ризики деградації, що є ключовим для збереження продуктивності агроландшафтів і сталого розвитку сільського господарства.

Аналіз літературних даних та постановка проблеми. У роботі [1] показано, що модель CLUE-S ефективна для прогнозування змін посівних площ до 2050 року, проте не враховує соціально-економічні фактори, що обмежує її точність. Рішенням може бути інтеграція додаткових моделей, які враховують економічні аспекти землекористування.

У роботі [2] показано, що інтеграція моделей BP-ANN і CLUE-S підвищує точність прогнозів землекористування. Проте дослідження стосується лише одного регіону Китаю, що обмежує його застосування в інших умовах. Це підкреслює потребу у більш універсальній методиці, здатній враховувати регіональні відмінності.

У дослідженні [3] запропоновано модель змін землекористування з урахуванням просторової автокореляції, яка підвищує точність прогнозів завдяки поєднанню просторових залежно-

стей і нейронних мереж. Проте вона потребує значних обчислювальних ресурсів і детальних геоданих, а деякі типи землекористування моделюються менш точно, що потребує подальшої оптимізації.

У роботі [4] проведено багатосценарне моделювання змін землекористування за допомогою CLUE-S та PLUS. Показано, що PLUS точніше моделює лісові та водні об'єкти, хоча для інших типів землекористування різниця невелика, що вказує на обмеження моделей через нестачу вхідних даних або алгоритмічні обмеження.

У роботі [5] показано, що модель Dyna-CLUE ефективно враховує просторові та екологічні фактори для прогнозування змін землекористування в Південній Італії та оцінки різних сценаріїв управління. Однак соціально-економічні фактори не враховані, що обмежує точність прогнозів через брак даних або складність їх інтеграції.

У дослідженні [6] запропоновано інтеграцію просторових асоціацій у моделі землекористування для підвищення точності прогнозів. Проте залишаються проблеми адаптації підходу до різних регіонів і масштабів, а також врахування соціально-економічних факторів.

У дослідженні [7] модель DynaCLUE використано для прогнозування змін землекористування в басейні річки Муннеру, Індія, за шістьма сценаріями до 2080 року, показавши значне розширення забудови. Проте соціально-економічні фактори в моделюванні залишилися неврахованими.

У статті [8] застосовано машинне навчання для оцінки якості ґрунтів у напіввологих умовах Чорноморського регіону. Штучні нейронні мережі ефективно прогнозують індекс якості, але їх адаптація до інших регіонів поки не вирішена.

У дослідженні [9] метод BP-ANN використано для оцінки родючості ґрунтів на тютюнових плантаціях південно-західного Китаю. Модель ефективно прогнозує інтегральний індекс родючості, проте обмеженість регіону та культури знижує універсальність результатів.

У статті [10] застосовано ГС та нейронні

мережі для моделювання просторової гетерогенності та прогнозування змін агрохімічних властивостей степових ґрунтів Херсонської області. Дослідження підкреслює ефективність нейронних мереж для просторово-часового прогнозування, водночас вказуючи на потребу врахування регіональних особливостей і специфіки культур.

Аналіз літератури показує, що попри успішне використання CLUE-S та нейронних мереж для моделювання землекористування, залишаються проблеми адаптації моделей до конкретних регіонів і культур через брак даних, складність інтеграції факторів та технічні обмеження. Недостатньо вивчено вплив змін землекористування на родючість ґрунтів і поєднання CLUE-S з ANN для комплексного прогнозування. Адаптивні моделі з урахуванням регіональних особливостей і місцевих агротехнічних практик, зокрема для Черкаської області, дозволять точніше прогнозувати стан ґрунтів і ефективніше управляти земельними ресурсами для сталого використання та продовольчої безпеки.

Мета та завдання дослідження. Мета дослідження – розробка інтегрованої моделі для прогнозування змін родючості ґрунтів Черкаської області, яка поєднує можливості моделей CLUE-S та штучних нейронних мереж, забезпечуючи високу точність та адаптивність прогнозів.

Для досягнення мети були поставлені наступні завдання:

- дослідити вплив показників ґрунту, що впливають на прогнозування змін родючості ґрунтів;
- розробити інтегровану модель прогнозування змін родючості ґрунтів Черкаської області, яка поєднує моделі CLUE-S та ANN.

Матеріали та методи досліджень. Об'єктом дослідження є найбільш поширені типи ґрунтів Черкаської області, зокрема їхні фізико-хімічні характеристики, такі як рН, вміст гумусу, азоту, фосфору та калію, що визначають родючість та продуктивність земель.

Основна гіпотеза дослідження полягає в тому, що різні типи змін землекористування, такі як інтенсивне землеробство, розширення урбанізованих територій та зміна структури посівів, безпосередньо впливають на родючість ґрунтів, і їх можна ефективно прогнозувати за допомогою інтеграції моделей CLUE-S та ANN.

У дослідженні прийнято кілька припущень. По-перше, вплив землекористування, клімату та агротехнічних заходів детермінований і може бути описаний математично. По-друге, наявні дані забезпечують можливість виконання узагальненого моделювання основних типів ґрунтів Черкаської області. По-третє, інформація з Єдиного державного веб-порталу відкритих даних

характеризується достатнім рівнем точності для проведення такого моделювання. При цьому застосовано спрощення: короткостроковий (до 10 років) вплив кліматичних змін вважається несуттєвим, вплив людської діяльності враховується лише через зміни землекористування, а деградація ґрунтів описується змінами основних агрохімічних показників.

Для просторового моделювання використовується програмне забезпечення CLUE-S [11], яке є одним із найпоширеніших інструментів для моделювання змін землекористування. Його особливістю є здатність враховувати просторово-часові закономірності змін землекористування та їхній вплив на природні та антропогенні фактори, а для побудови нейронної мережі застосовується MatLab з відповідними бібліотеками машинного навчання [12].

Для прогнозування змін родючості ґрунтів Черкаської області була розроблена інтегрована модель, яка поєднує можливості CLUE-S (Conversion of Land Use and its Effects at Small regional extent) для просторового моделювання змін землекористування та штучної нейронної мережі (ANN) для прогнозування агрохімічних параметрів ґрунтів.

Об'єднання цих моделей дозволяє отримати комплексний підхід:

- CLUE-S аналізує майбутні сценарії змін землекористування, враховуючи природні та соціально-економічні фактори, що впливають на ґрунтовий покрив;
- ANN використовує результати моделювання CLUE-S як вхідні дані для прогнозування змін агрохімічних показників ґрунтів (рН, гумус, макроелементи).

Інтегрована модель складається з кількох послідовних етапів:

1. Вхідні дані та їх підготовка. Основні категорії вхідних даних [13, 14, 15, 16, 17]:

- просторові дані: карти землекористування Черкаської області (2000, 2010, 2020 роки);
- ґрунтові показники: дані щодо вмісту гумусу, азоту, фосфору, калію та рівня рН;
- кліматичні показники: середньорічна температура та рівень зволоження;
- соціально-економічні дані: площа сільськогосподарських угідь, інтенсивність землеробства.

2. Моделювання змін землекористування за допомогою CLUE-S. CLUE-S був використаний для моделювання майбутніх сценаріїв змін землекористування на період до 2050 року. Для цього враховувалися:

- зміни у використанні ріллі, пасовищ і лісових земель;
- сценарії урбанізації та розширення сільськогосподарських угідь;

- кліматичні зміни, що можуть впливати на деградацію ґрунтів.

Результати моделювання CLUE-S дозволили визначити, які території області будуть зазнавати змін і наскільки ці зміни можуть впливати на хімічний склад ґрунтів.

3. Прогноз агрохімічних показників за допомогою ANN. Результати CLUE-S були використані як вхідні змінні для ANN, яка прогнозувала зміни родючості ґрунтів на основі просторових характеристик та історичних даних. Структура нейронної мережі:

- вхідний шар (6 нейронів): рН, вміст гумусу, азоту, фосфору, калію, клас землекористування (змодельований CLUE-S);

- приховані шари: три шари (5, 4, 3 нейрони), функція активації – сигмоїдна;

- вихідний шар (1 нейрон): прогнозований рівень родючості ґрунту (%);

- функція навчання: алгоритм зворотного поширення помилки (backpropagation);

- розподіл даних: 80 % для навчання, 10 % для валідації, 10 % для тестування.

Перевірка адекватності моделі проводиться шляхом порівняння прогнозованих та фактичних значень родючості ґрунтів. Валідацію отриманих прогнозів, а також оцінку точності моделі виконано за допомогою метрик середньоквадратичної помилки (MSE) та коефіцієнта детермінації (R^2).

Результати дослідження розробки інтегрованої моделі для прогнозування змін родючості ґрунтів.

Вплив показників ґрунту, що впливають на прогнозування змін родючості ґрунтів. Для оцінки впливу ключових факторів на родючість ґрунтів Черкаської області проведено дисперсійний аналіз (ANOVA). Основними параметрами, що підлягали аналізу, були: вміст гумусу, рН ґрунту, вміст азоту, фосфору та калію, тип ґрунту, середньорічна температура, рівень зволоження та структура землекористування. Ці фактори відіграють ключову роль у забезпеченні продуктивності ґрунтів, оскільки впливають на доступність поживних речовин, водний баланс та мікробіологічну активність у ґрунті.

Результати дисперсійного аналізу [18] показали, що основними факторами, що визначають родючість ґрунтів, є вміст гумусу та рівень рН, що підтверджується оцінкою ANOVA ($p < 0,01$). Вміст гумусу в межах 3,5–5,5 % сприяє високій продуктивності ґрунту, тоді як зниження його рівня нижче 3 % призводить до втрати родючості на 20–30 %. Це пояснюється тим, що гумус виконує низку важливих функцій, серед яких покращення водоутримувальної здатності ґрунту, сприяння розвитку ґрунтової мікрофлори та оптимізація аераційних властивостей.

Реакція ґрунтового розчину (рН) є критичним фактором, що визначає доступність поживних речовин. Найвища ефективність засвоєння макроелементів спостерігається в межах рН 6,2–6,8. При підвищенні кислотності (рН $< 5,5$) фосфор переходить у нерозчинні форми ($FePO_4$, $AlPO_4$), що обмежує його доступність для рослин, а також підвищується концентрація токсичних елементів, таких як алюміній, що негативно впливає на кореневу систему. Окрім цього, спостерігається зниження активності мікроорганізмів, які відповідають за мінералізацію органічної речовини. Надмірно лужний ґрунт (рН $> 7,5$), навпаки, викликає дефіцит мікроелементів, таких як залізо та марганець, що також негативно позначається на розвитку рослин.

Вміст макроелементів, зокрема валових форм азоту, фосфору та калію, суттєво впливає на продуктивність ґрунту. Азот є основним елементом живлення, дефіцит якого ($< 0,15\%$) призводить до пожовтіння листя, зниження фотосинтетичної активності та слабкого розвитку кореневої системи, тоді як концентрація понад 0,25 % сприяє формуванню вегетативної маси. Фосфор відіграє ключову роль у розвитку кореневої системи та енергетичних процесах у рослинах, і його концентрація понад 0,25 % покращує вуглеводний обмін та підвищує стійкість до хвороб. Калій відповідає за регуляцію водного балансу та стійкість до стресових умов, таких як посуха та заморозки. Недостатній рівень калію ($< 0,12\%$) підвищує чутливість рослин до патогенних факторів.

Вологість ґрунту є ще одним ключовим фактором родючості. Оптимальний рівень вологості в межах 50–70 % забезпечує активне функціонування кореневої системи та розвиток мікроорганізмів. Зниження вологості нижче 30 % призводить до формування сухих зон навколо коренів, пригнічення мікробної активності та зменшення врожайності на 20–25 %. Температурний режим також впливає на процеси ґрунтоутворення: середньорічна температура повітря понад 12 °C прискорює мінералізацію органічної речовини, що в довгостроковій перспективі може зменшити вміст гумусу.

Тип ґрунту є визначальним чинником його продуктивності. Чорноземи характеризуються високим вмістом гумусу, розвинутою структурою та здатністю утримувати вологу, що забезпечує високу врожайність, яка перевищує врожайність супіщаних ґрунтів на 20–30 %. Супіщані ґрунти, навпаки, мають високу проникність і швидко втрачають вологу, що обмежує їхню придатність для вирощування культур без додаткового зрошення. Глинисті ґрунти відзначаються низькою проникністю, що може створювати проблеми з дренажем і водним балансом [19].

Вплив основних параметрів на родючість ґрунтів представлено на рисунку 1.

Для перевірки взаємозв'язків між основними факторами родючості було проведено кореляційний аналіз. Отримані результати показують сильну кореляцію між вмістом гумусу та родючістю ґрунтів ($R = 0,85$), що підтверджує важливість гумусу у підтримці довготривалої продуктивності земель. Вміст азоту та рН також виявилися значущими ($R = 0,72$ та $R = 0,78$ відповідно). Водночас рівень калію мав порівняно слабший вплив (R

$= 0,50$), що може свідчити про необхідність додаткового врахування його мобільності у ґрунті та взаємодії з іншими макроелементами.

Таким чином, результати дисперсійного аналізу підтвердили значущість основних факторів, що впливають на родючість ґрунтів. Оптимальне поєднання гумусу, рН та вологості забезпечує максимальну продуктивність, що є ключовим для підвищення врожайності сільськогосподарських культур.

Взаємозв'язок між факторами родючості

Параметр	Оптимальні умови	Родючість (%)	При несприятливих умовах (%)	P-значення (ANOVA)
Вміст гумусу (%)	3,5–5,5	90–95 < 3 %	70	< 0,01
рН ґрунту	6,2–6,8	90	< 5,5 або > 7,5: 65	< 0,01
Вміст азоту (%)	> 0,25	85	< 0,15: 60	< 0,05
Вміст фосфору (%)	> 0,25	88	< 0,15: 68	< 0,05
Вологість ґрунту (%)	50–70	92	< 30: 70	< 0,05
Температура (°C)	10–12	90	> 15: 75	< 0,05
Тип ґрунту	Чорнозем: 95; Супіщаний: 80	-	-	< 0,05

Рис. 1. Вплив агрохімічних параметрів на родючість ґрунтів /
Fig. 1. The influence of agrochemical parameters on soil fertility

ґрунтів є багатокомпонентним, що підтверджується регресійним аналізом. Наприклад, рН ґрунту безпосередньо впливає на доступність азоту, фосфору та калію. При низькому рН (нижче 5,5) спостерігається значна фіксація фосфору у нерозчинні сполуки, що робить його недоступним для рослин. При рН вище 7,5 погіршується засвоєння мікроелементів, таких як залізо та марганець, що також впливає на метаболічні процеси в рослинах.

Тип ґрунту визначає водний баланс і рухомість поживних речовин. Наприклад, у чорноземах завдяки високому вмісту гумусу забезпечується рівномірний розподіл вологи та поживних речовин, тоді як у піщаних ґрунтах вода швидко

вимиває нітрати, що знижує ефективність азотного живлення рослин. Висока вологість (понад 70 %) у важких глинистих ґрунтах може спричинити дефіцит кисню, що обмежує діяльність кореневої системи і мікроорганізмів, відповідальних за мінералізацію органічної речовини.

З метою оцінки найбільш впливових факторів, що визначають родючість ґрунтів, був проведений множинний регресійний аналіз. В якості незалежних змінних було використано рН ґрунту, вміст гумусу, азоту, фосфору, калію та рівень вологості, а залежною змінною виступала прогнозована продуктивність ґрунту (у відсотках).

Модель регресійного аналізу має наступний вигляд:

$$Y = 5,2 + 1,8X_1 + 2,1X_2 + 0,9X_3 + 0,7X_4 + 0,5X_5 - 1,3X_6 \quad (1)$$

де Y – прогнозована родючість ґрунту; X_1 – вміст гумусу (%); X_2 – рН ґрунту; X_3 – вміст азоту (%); X_4 – вміст фосфору (%); X_5 – вміст калію (%); X_6 – відхилення вологості від оптимального рівня (50–70 %).

Розглянемо модель регресійного аналізу з точки зору впливу факторів:

- Константа (5,2) – означає базовий рівень родючості при нульових значеннях усіх факторів (що в реальних умовах є лише теоретичним припущенням);

- X_1 (1,8) – кожне збільшення вмісту гумусу на 1 % підвищує прогнозовану родючість на 1,8 %. Гумус є одним із найважливіших факторів,

що визначають здатність ґрунту утримувати вологи, засвоювати поживні речовини та підтримувати мікрофлору;

- X_2 (2,1) – рівень рН має ще більший вплив: зміна на одну одиницю рН спричиняє зміну родючості на 2,1 %. Це пояснюється тим, що рН впливає на доступність поживних елементів, мікробіологічну активність і загальний стан ґрунтового середовища;

- X_3 (0,9) – вміст азоту є ключовим елементом живлення рослин, а кожне його підвищення на 0,1 % підвищує родючість на 0,9 %. Дефіцит азоту може призводити до зменшення врожайності на 20–30 %;

- X_4 (0,7) – кожне збільшення вмісту фосфору на 0,1 % підвищує родючість на 0,7 %. Фосфор є важливим для розвитку кореневої системи та загальної енергетичної забезпеченості рослин;

- X_5 (0,5) – вплив калію є менш значним, але все ще важливим. Збільшення його концентрації на 0,1 % сприяє підвищенню родючості на 0,5 %. Калій відповідає за регуляцію водного обміну рослин та їхню стійкість до стресових факторів;

- X_6 (-1,3) – відхилення вологості від оптимального рівня має негативний вплив. Наприклад, якщо вологість падає нижче 50 % або перевищує 70 %, родючість зменшується на 1,3 % за кожен відсоток відхилення. Це пояснюється тим, що занадто сухі ґрунти обмежують доступність поживних речовин, а надмірне зволоження може спричинити анаеробні умови, негативно впливаючи на розвиток кореневої системи.

Коефіцієнти моделі показують, що найбільший внесок у родючість мають вміст гумусу ($\beta = 1,8$) та рН ґрунту ($\beta = 2,1$), що підтверджує важливість підтримки цих параметрів на оптимальному рівні. Це свідчить про те, що ці показники є ключовими у прогнозуванні змін родючості.

Аналіз впливу основних агрохімічних показників ґрунту на прогнозовану родючість було додатково ще проведено за допомогою теплової карти, яка відображає просторово-динамічні закономірності взаємозв'язку між рівнем рН, вмістом гумусу та продуктивністю ґрунтів.

Для оцінки геопросторового розподілу прогнозованої родючості ґрунтів Черкаської області було побудовано теплову карту (imagesc) та контурну карту (contourf), які відображають взаємозв'язок між агрохімічними факторами та продуктивністю ґрунтів (рис. 2).

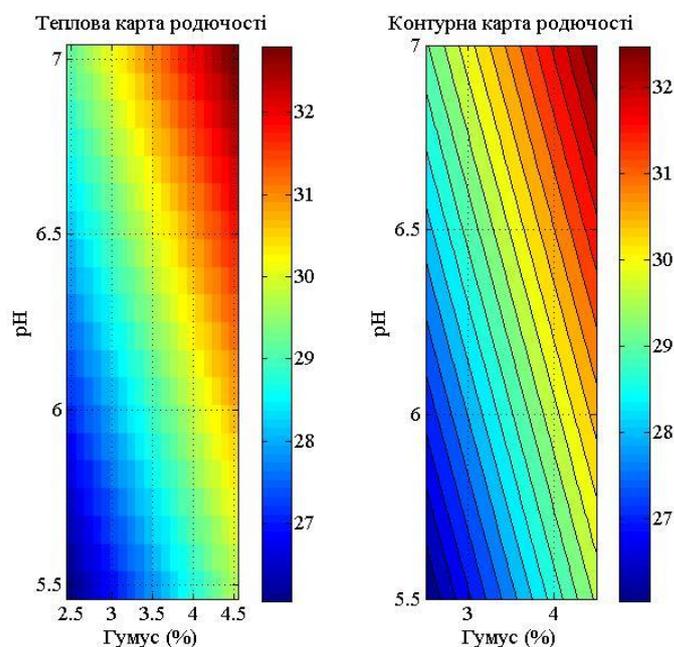


Рис. 2. Теплова та контурна карти впливу агрохімічних параметрів (рівня рН, вмісту гумусу) на прогнозовану родючість ґрунтів Черкаської області / Fig. 2. Heat and contour maps of the influence of agrochemical parameters (pH level, humus content) on the predicted fertility of soils in Cherkasy region

Карти демонструють розподіл родючості залежно від основних агрохімічних параметрів, включаючи вміст гумусу, рівень рН. Червоні та жовті ділянки карт відповідають зонам з високою родючістю, що характеризуються оптимальним рівнем основних показників, тоді як сині та темно-зелені області вказують на зони деградації ґрунтів, де відбувається зниження вмісту гумусу або відхилення кислотності від оптимальних меж.

Одним із ключових показників, використаних при створенні карт просторового розподілу родючості, є вміст гумусу, адже він визначає основні агрохімічні та фізичні властивості ґрунту. Гумус забезпечує структурну стійкість, пок-

рашує водоутримання та аерацію, слугує джерелом макро- й мікроелементів, необхідних для живлення рослин. Високий його рівень підвищує стійкість ґрунту до ерозії, знижує ризики деградації та сприяє збереженню продуктивності агроєкосистем [20].

Результати моделювання показують, що оптимальний рівень рН (6,2–6,8) та вміст гумусу (4,0–5,0 %) забезпечують максимальні значення прогнозованої родючості ґрунту. Ці зони представлені жовтими та червоними відтінками на тепловій карті, що вказує на високий потенціал продуктивності.

Натомість, зниження рівня гумусу менше 3%

та рН нижче 5,5 супроводжується різким падінням прогнозованої родючості на 15–20 % (темно-сині зони на карті). Це пов'язано з посиленням процесів деградації ґрунту, погіршенням його структури та зменшенням доступності елементів живлення для рослин.

Оцінка взаємозв'язку між рівнем рН та гумусу також дозволяє встановити критичні порогові значення. Наприклад, у випадку підкислення ґрунту ($\text{pH} < 5,5$) спостерігається зменшення доступності фосфору, що знижує ефективність мінерального живлення. Водночас, лучні ґрунти ($\text{pH} > 7,5$) демонструють зменшення засвоєння мікроелементів, таких як залізо та марганець, що також негативно впливає на продуктивність агросистем.

Таким чином, результати теплового аналізу підтверджують, що найбільш сприятливі умови для підтримки стабільної родючості формуються у ґрунтах із нейтральним або слабокислим рН (6,2–6,8) та достатнім вмістом гумусу (4,0–5,0 %). Порушення цих умов призводить до падіння прогнозованої продуктивності на 10–25 %, що підтверджує необхідність впровадження заходів зі збереження органічної речовини в ґрунті та контролю рівня кислотності.

Для визначення нелінійних взаємозв'язків була застосована штучна нейронна мережа (ANN). Вибір цього підходу пояснюється тим, що традиційні регресійні моделі добре описують лінійні залежності, проте вони не враховують складних багатофакторних взаємодій між параметрами ґрунту. ANN дозволяє побудувати адаптивну модель, яка здатна виявляти приховані залежності між вхідними даними та вихідним показником родючості.

Мережа була реалізована у вигляді багатошарового перцептрона (MLP) з трьома прихованими шарами. Кількість нейронів у прихованих шарах була підібрана емпірично на основі критерію мінімізації середньоквадратичної похибки (MSE). Функція активації для прихованих шарів – sigmoid, а для вихідного шару – linear.

Дані були поділені на навчальну (80 %) та тестову (20 %) вибірки, що забезпечило коректне навчання моделі без ефекту перенавчання. В якості функції оптимізації використовувався алгоритм backpropagation із швидкістю навчання 0,01. Навчання тривало до досягнення порогу похибки 10^{-4} , що гарантувало стабільність прогнозів.

Отримані результати моделювання відображено на рисунку 3.

Для оцінки узагальнюваності ANN була проведена додаткова перевірка на незалежному наборі даних, що включав зразки ґрунту. Результати показали, що середньоквадратична похибка (MSE) залишалася стабільною на рівні 0,0025, а середнє відхилення прогнозованих значень не перевищувало 5 %, що підтверджує надійність моделі. Це свідчить про те, що нейронна мережа може бути використана для прогнозування змін родючості ґрунтів у різних умовах регіону.

Модель ANN продемонструвала високу точність прогнозування, що підтверджується низькими відхиленнями фактичних та прогнозованих значень (у межах 0,3–4,0 %). Візуалізація результатів моделі прогнозування родючості ґрунту представлена на рисунку 4.

Отримані результати моделювання вказують на те, що оптимальний рівень рН для підтримки високої родючості становить 6,5. Зниження цю-

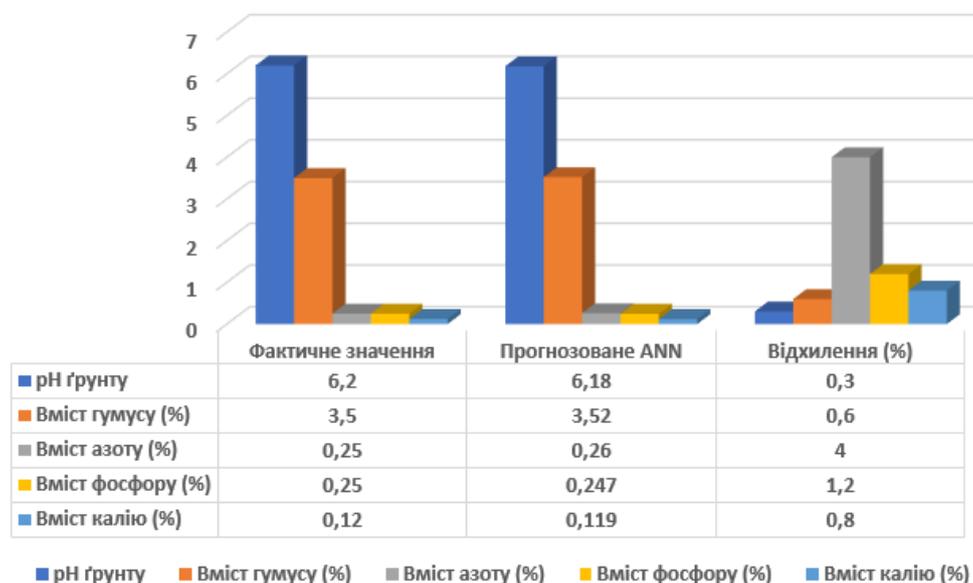


Рис. 3. Прогнозовані та фактичні значення агрохімічних показників /
Fig. 3. Predicted and actual values of agrochemical indicators

Вплив рН та гумусу на прогнозовану родючість ґрунтів

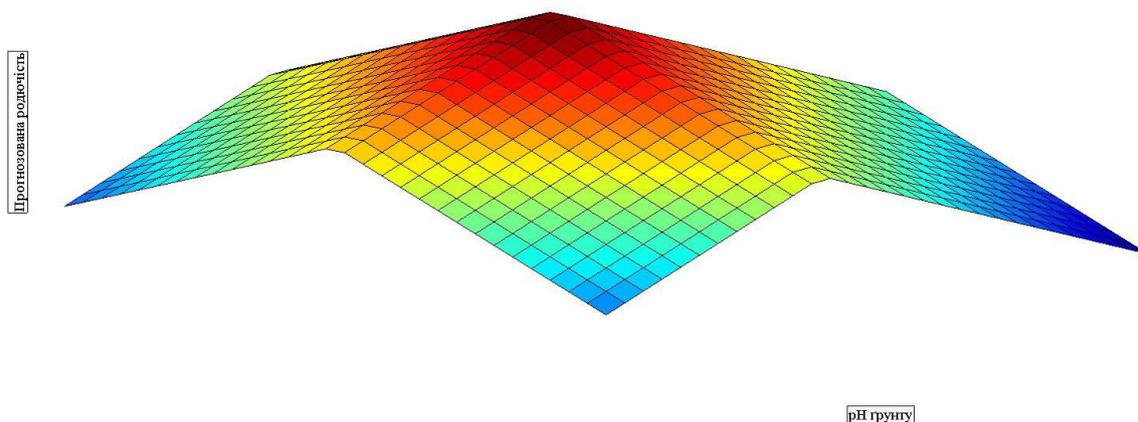


Рис. 4. Моделювання прогнозованої родючості ґрунтів / Fig. 4. Modeling predicted soil fertility

го показника до 5,5 або збільшення до 7,5 призводить до зменшення прогнозованої продуктивності на 12–18 %. Також встановлено, що рівень гумусу відіграє критичну роль у формуванні родючості, і його зменшення з 6 % до 2 % спричиняє падіння прогнозованої продуктивності ґрунтів на 25 %.

Розробка інтегрованої моделі прогнозування змін родючості ґрунтів Черкаської області, яка поєднує моделі CLUE-S та ANN. Для оцінки просторово-часових змін родючості ґрунтів Черкаської області створено інтегровану модель на основі CLUE-S та штучної нейронної мережі (ANN). CLUE-S прогнозує трансформації землекористування з урахуванням природних і соціально-економічних факторів, тоді як ANN оцінює вплив цих змін на агрохімічні показники, зокрема гумус, рН та вміст макроелементів.

Модель CLUE-S використовує карти землекористування 2000, 2010 і 2020 років, середньорічну температуру, рівень зволоження, площу сільгоспугідь, інтенсивність землеробства та сценарії урбанізації. Прогноз до 2050 року показує розширення сільськогосподарських земель на 7,5 % у центральних та південних районах та можливе скорочення орних земель на півночі через зростання площ населених пунктів і промислових об'єктів. Урбанізація найбільше вплине поблизу обласного центру, зменшуючи сільгоспугіддя на 3–5 %.

Виділено два сценарії розвитку. У ВАУ (Business as usual) продовження поточних тенденцій призводить до виснаження гумусу до 2,5 %, зниження рН до 5,7 і фіксації фосфору, що зменшує родючість на 15–20 %. У SLU (Sustainable land use) оптимізація сівозмін та застосування органічних добрив підвищує гумус до 3,8–4,2 % і підтримує рН на рівні 6,3–6,5, що забезпечує

підвищення родючості на 10–12 %. Сценарії формувалися на основі історичних даних землекористування, демографічних прогнозів та державної аграрної політики. У SLU враховано екологічні заходи: обмеження розорювання ґрунтів, розвиток органічного землеробства та фінансову підтримку фермерів.

Аналіз економічних показників виявив, що доходи агровиробників, державні дотації та ринкова ситуація впливають на темпи трансформації земель. Економічна підтримка сприяє розширенню ріллі, інтенсивнішому використанню добрив і скороченню відновлення ґрунтів, що призводить до зменшення гумусу, змін кислотності та дисбалансу поживних речовин [21].

За сценарієм інтенсивного землеробства (BAU) розширення орних земель відбувається за рахунок скорочення природних екосистем, що знижує гумус на 8–12 %, у найактивніших регіонах до 2,5 %. Це зменшує водоутримувальну здатність ґрунту, підвищує ерозійні ризики та знижує доступність фосфору й інших макроелементів через падіння рН до 5,7. Крім того, рівень азоту та фосфору зменшується на 6–9 %, що може знизити врожайність на 12–15 %.

У сценарії сталого управління (SLU) оптимізація сівозмін, скорочення площ орних земель та застосування екологічних агротехнологій стабілізують гумус на рівні 4 %, а рН підвищується до 6,3–6,5, що покращує засвоєння поживних елементів і підвищує продуктивність ґрунтів на 10–12 %. Інтеграція соціально-економічних факторів у ANN підвищує точність прогнозів: коефіцієнт детермінації R^2 досягає 0,92, що на 14 % перевищує результати моделей без економічних параметрів.

Вхідні параметри ANN включали такі ключові змінні – рисунок 5.



Рис. 5. Ключові змінні вхідних параметрів ANN / Fig. 5. Key variables of ANN input parameters

Детальний аналіз впливу окремих вхідних параметрів ANN показав, що серед соціально-економічних факторів найбільший вплив на прогнозовані агрохімічні показники мають рівень державної підтримки аграрного сектору ($\beta = 0,78$), динаміка ринкових цін на зернові культури ($\beta = 0,65$) та темпи урбанізації ($\beta = 0,52$). Це підтверджує, що політичні рішення та економічні чинники безпосередньо визначають стратегії землекористування та, відповідно, зміни родючості ґрунтів. Водночас такі параметри, як темпи застосування добрив та інтенсивність використання сільськогосподарських угідь, демонструють нелінійний вплив, що вказує на можливість оптимізації агротехнологічних практик для запобігання деградації ґрунтів.

Економічні стимули, державна підтримка екологічного землеробства та фінансові інвестиції в ґрунтозахисні заходи впливають на агрохімічні властивості ґрунтів. Регіони з більшими вкладеннями у стале землеробство характеризуються повільнішою деградацією ґрунтів, тоді як інтенсивне землеробство без екологічних обмежень прискорює виснаження гумусу та зниження родючості [22, 23].

Результати моделювання CLUE-S були використані як вхідні змінні для ANN, яка прогнозувала зміни родючості ґрунтів на основі просторових характеристик та історичних даних.

Структура нейронної мережі складається з вхідного шару (6 нейронів): рН, вміст гумусу, азоту, фосфору, калію, клас землекористування (змодельований CLUE-S). Прихованих шарів:

три шари (5, 4, 3 нейрони), функція активації – сигмоїдна. Вихідного шару (1 нейрон): прогнозований рівень родючості ґрунту (%).

У якості функції навчання виступає алгоритм зворотного поширення помилки (backpropagation).

Розподіл даних складається з 80 % для навчання, 10 % для валідації, 10 % для тестування.

Для узгодження результатів моделі CLUE-S та ANN було проведено просторове накладання прогнозованих змін землекористування на регіональні точки спостереження агрохімічних показників. Кожен полігон у CLUE-S був співвіднесений із середніми значеннями ґрунтових показників ANN, що дозволило інтегрувати просторовий підхід з детальним аналізом змін родючості.

На основі розрахунків було створено карти змін родючості, що представлені на рисунку 6 (а, б, в).

Згідно ВАУ-сценарію найбільше зниження продуктивності ґрунтів прогнозується у центральних та західних районах Черкаської області, де відбувається активна експлуатація земель. Зниження рівня гумусу (на 8–12 %) та рН (до 5,7) у ВАУ-сценарії пов'язане зі збільшенням площ орних земель на 7,5 %, що супроводжується скороченням природних екосистем, інтенсивним застосуванням мінеральних добрив та скороченням періоду природного відновлення ґрунтів.

Відповідно до SLU-сценарію прогнозоване підвищення рівня гумусу становить 3,8–4,2 %, а рН стабілізується у межах 6,3–6,5. Це сприяє зростанню продуктивності ґрунтів на 10–12 %.

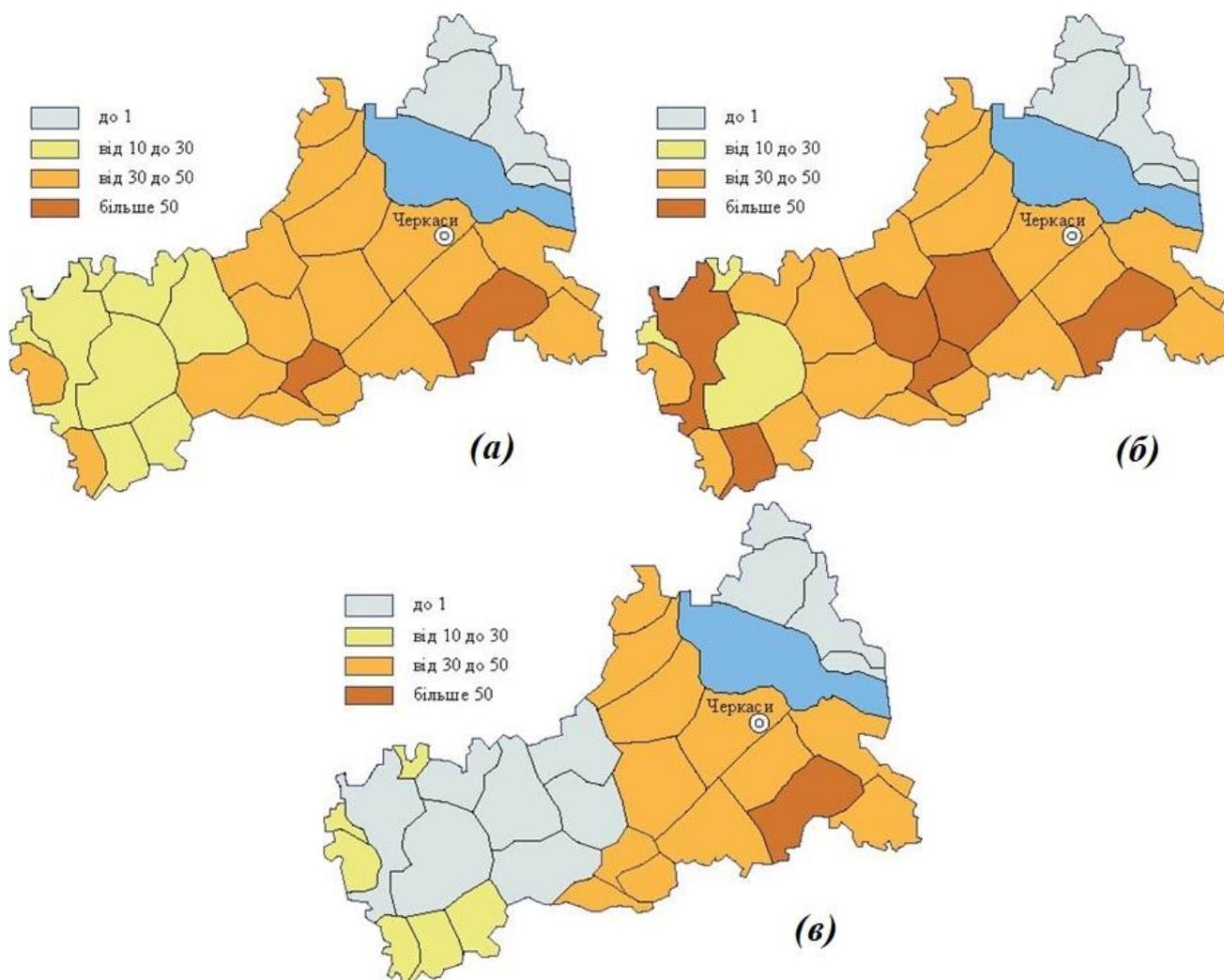


Рис. 6. Карти змін родючості Черкаської області, поточний стан (а); за сценарієм ВАУ (б) та сценарієм SLU (в), у відносних одиницях / Fig. 6. Maps of fertility changes in Cherkasy region, current state (a); under the BAU scenario (b) and the SLU scenario (c), in relative units

Моделювання змін землекористування в Черкаській області до 2050 року з використанням CLUE-S дозволило оцінити динаміку трансформації земель та її вплив на агрохімічні характеристики ґрунтів. При збереженні поточних тенденцій площа сільськогосподарських угідь збільшиться на 7,5 %, що супроводжуватиметься інтенсивним використанням ґрунтових ресурсів та прискореним виснаженням ґрунтів.

Аналіз змін землекористування показав, що найбільш інтенсивні зміни відбуваються у центральних та південних районах, де сільськогосподарські угіддя розширюються за рахунок природних луків та пасовищ. Водночас спостерігається скорочення лісових насаджень і природних екосистем, що пов'язано з урбанізацією та інтенсифікацією сільського господарства. Очікується, що до 2050 року площа лісів може зменшитися на 3–5 %, що призведе до негативних наслідків для стійкості ґрунтів та біорізноманіття.

Прогнозоване збільшення навантаження на ґрунтові ресурси сприяє їх деградації, особливо

в районах інтенсивного землеробства. Аналіз моделі CLUE-S вказує, що у цих регіонах рівень гумусу може знизитися на 5–10 % у найближчі 30 років, що призведе до погіршення фізико-хімічних характеристик ґрунту. Поєднання просторово-динамічного прогнозу CLUE-S та ANN дозволило деталізувати вплив змін землекористування на агрохімічні показники ґрунтів.

Результати ANN показали, що у районах із прогнозованим розширенням ріллі очікується зменшення вмісту гумусу на 8–12 % через прискорену мінералізацію органічної речовини. Найбільш критичні втрати гумусу прогножуються в центральних районах області, де інтенсивно використовується сільськогосподарська земля. Водночас у східних та південних районах області спостерігається тенденція до підкислення ґрунтів, де рівень рН може знизитися на 0,3–0,5. Це пов'язано з активним використанням мінеральних добрив та природними процесами деградації ґрунтів.

Аналіз динаміки макроелементів показав не-

рівномірний розподіл поживних речовин. У районах із високими аграрними навантаженнями рівень азоту може знизитися на 5–7 %, що вплине на врожайність культур. Вміст фосфору у ґрунті в окремих районах може зменшитися на 10 %, особливо у зонах інтенсивного землеробства, де недостатньо компенсується втрата поживних речовин.

Контроль за рівнем гумусу та рН є ключовим фактором підтримки високої родючості ґрунтів. Аналіз регресійної моделі показав, що збільшення гумусу на 1 % підвищує прогнозовану продуктивність на 1,8 %, а оптимізація рН на одиницю – на 2,1 %. Відхилення цих параметрів від оптимального рівня спричиняє зниження врожайності на 10–15 %. Таким чином, корекція рівня гумусу та кислотності ґрунтів є важливим заходом для підтримки їхньої довгострокової продуктивності.

Зменшення вмісту гумусу не лише знижує

врожайність, а й погіршує структуру ґрунту протягом 10–20 років. Дегуміфікація зменшує водотримання, сприяє ерозії, ущільненню та погіршенню аерації ґрунту, підвищуючи його чутливість до посухи. Крім того, вона знижує активність мікроорганізмів, уповільнюючи мінералізацію органічної речовини та засвоєння поживних елементів [24].

Окрему проблему становить тривале підкислення ґрунту через надмірне використання мінеральних добрив. Це спричиняє накопичення токсичних сполук алюмінію, що гальмують ріст кореневої системи та зменшують засвоєння поживних елементів. Без вапнування та внесення органічних добрив ці процеси можуть стати незворотними [25].

Для оцінки ефективності інтегрованої моделі CLUE-S+ANN було проведено порівняння її точності з іншими традиційними методами прогнозування, зокрема регресійним аналізом (рис. 7).

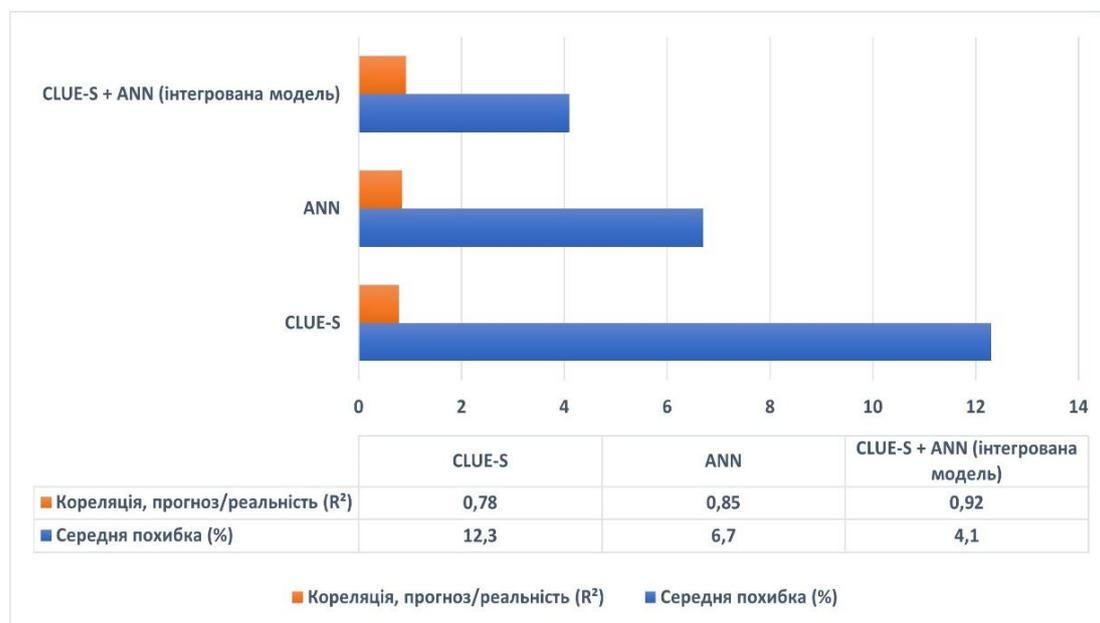


Рис. 7. Порівняння точності прогнозів / Fig. 7. Comparison of forecast accuracy

Порівняння прогнозів за різними підходами продемонструвало, що коефіцієнт детермінації R^2 зріс до 0,92.

Обговорення результатів. Результати показали, що зміни родючості ґрунтів Черкаської області значною мірою залежать від трансформацій землекористування (за моделлю CLUE-S) та просторово-агрохімічних змін, врахованих у ANN. Зокрема, збільшення площ сільськогосподарських угідь у центральних і південних районах на 7,5 % спричиняє виснаження гумусу та підкислення ґрунтів. Аналіз сценарію інтенсивного землеробства (BAU) показав, що при збереженні поточних тенденцій рівень гумусу може знизитися до 2,5 %, а середній рН – до 5,7. Сценарій сталого управління (SLU) демонструє мо-

жливість стабілізації родючості; ANN прогнозує зростання гумусу до 4,2 % завдяки оптимізації сівозмін, внесенню органічних добрив і регулюванню кислотності.

Порівняння моделей показало перевагу інтегрованого підходу: CLUE-S мала похибку 12,3 % ($R^2 = 0,78$), ANN – 6,7 % ($R^2 = 0,85$), а їх комбінація знизила похибку до 4,1 % і підвищила R^2 до 0,92. Це пояснюється тим, що CLUE-S враховує просторову динаміку змін землекористування, а ANN моделює нелінійні взаємозв'язки агрохімічних показників.

Інтеграція моделей дозволяє врахувати агрохімічні та просторові зміни, а також соціально-економічні фактори, що підвищує точність прогнозів для Черкаської області. Висока коре-

ляція між прогнозованими та фактичними значеннями підтверджує ефективність підходу.

Обмеження дослідження включають: залежність точності від вхідних даних, обмеження CLUE-S на горизонті понад 30 років, специфічність для Черкаської області, недостатню деталізацію впливу кліматичних змін та відсутність економічного аналізу сценаріїв SLU.

Подальші дослідження можуть розширити часовий горизонт прогнозів, включити кліматичні змінні (температура, опади) та економічні фактори в ANN для оцінки агрохімічних і фінансових наслідків змін землекористування.

Висновки. Дослідження показало, що на прогнозування змін родючості ґрунтів найбільше впливають рівень гумусу, рН та концентрації азоту, фосфору й калію. Регресійний аналіз визначив гумус і рН як ключові фактори з коефіцієнтами 1,8 та 2,1. Зниження гумусу нижче 3 % зменшує врожайність на 20–30 %, а відхилення рН від оптимального діапазону 6,2–6,8 ускладнює засвоєння поживних речовин. Комплексний підхід виявив нелінійні взаємозв'язки між агро-

хімічними показниками: гумус підтримує водний баланс і доступність макроелементів, а кислотність впливає на їхню хімічну активність.

Інтегрована модель CLUE-S та ANN для Черкаської області дозволила точніше прогнозувати вплив змін землекористування. За сценарієм інтенсивного землеробства (BAU) площа угідь збільшується на 6,5–7,5 % до 2050 року, гумус знижується на 8–12 %, а рН падає до 5,7, що може призвести до втрати родючості на 15–20 % у найбільш експлуатованих районах. Сценарій сталого управління (SLU) прогнозує стабілізацію гумусу на 4 % та оптимізацію рН до 6,3, зберігаючи продуктивність ґрунтів.

Порівняння моделей показало, що інтеграція CLUE-S та ANN підвищує точність прогнозів на 14 % ($R^2 = 0,92$) завдяки поєднанню просторового аналізу змін землекористування та врахуванню нелінійних взаємозв'язків агрохімічних показників. Модель може застосовуватися для довгострокових стратегій сталого управління ґрунтовими ресурсами.

Список використаних джерел

1. Akın A., Erdoğan N., Berberoğlu S., Çilek A., Erdoğan A., Donmez C., Şatir O. (2022). Evaluating the efficiency of future crop pattern modelling using the CLUE-S approach in an agricultural plain. *Ecological Informatics*, 71. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2022.101806>
2. Liao G., He P., Gao X., Lin Z., Huang C., Zhou W., Deng L. (2022). Land use optimization of rural production–living–ecological space at different scales based on the BP–ANN and CLUE–S models. *Ecological Indicators*, 137. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.108710>
3. Chu H.-J., Wu C.-F., Lin Y.-P. (2013). Incorporating Spatial Autocorrelation with Neural Networks in Empirical Land-Use Change Models. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 40(3), 384–404. <https://doi.org/10.1068/b37116>
4. Yu Z., Zhao M., Gao Y., Wang T., Zhao Z. & Wang S. (2023). Multiscenario Simulation and Prediction of Land Use in Huaibei City Based on CLUE-S and PLUS Models. *Applied Sciences*, 13(12), 7142. <https://doi.org/10.3390/app13127142>
5. Pindozzi S. (2017). Predicting land use change on a broad area: Dyna-CLUE model application to the Litorale Domizio-Agro Aversano (Campania, South Italy), *Journal of Agricultural Engineering*, 48(s1), 27–35. <https://doi.org/10.4081/jae.2017.657>
6. Anpuhas M., Janmaat J. J. A., Nichol C. F. & Wei X. (Adam). (2016). Modelling spatial association in pattern based land use simulation models. *Journal of Environmental Management*, 181, 465–476. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.06.034>
7. Loukika K. N., Keesara V. R., Buri E. S. & Sridhar V. (2023). Future prediction of scenario based land use land cover (LU&LC) using DynaCLUE model for a river basin. *Ecological Informatics*, 77. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2023.102223>
8. Alaboz, P., Odabas, M. S. & Dengiz, O. (2023). Soil quality assessment based on machine learning approach for cultivated lands in semi-humid environmental condition part of Black Sea region. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 69(15), 3514–3532. <https://doi.org/10.1080/03650340.2023.2248002>
9. Wang F., Fan Z., Kuai Y., Sun N., Cheng X., Zhang J., Wang D., Su J., Xu M. (2024). Deciphering Soil Fertility of Tobacco Planting Fields with Back Propagation Artificial Neural Networks in Southwest China. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 24, 944–955. <http://dx.doi.org/10.1007/s42729-023-01598-5>
10. Pichura V., Potravka L., Stratichuk N., Drobitko A. (2023). Space-time modeling and forecasting steppe soil fertility using geo-information systems and neuro-technologies. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 29(1), 182–197. <https://dspace.ksaeu.kherson.ua/handle/123456789/8728>
11. Verburg Peter. (2024). «CLUE Full Version». *DataverseNL*, V1. <https://doi.org/10.34894/CXAUYO>
12. Verburg P. H. & Overmars K. P. (2009). Combining top-down and bottom-up dynamics in land use modeling: exploring the future of abandoned farmlands in Europe with the Dyna-CLUE model. *Landscape Ecology*, 24(9), 1167–1181. <https://doi.org/10.1007/s10980-009-9355-7>
13. Екологічний паспорт Черкаської області (2023). Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України. <https://mepr.gov.ua/wp-content/uploads/2024/10/Ekologichnyi-pasport-2023.zip>

14. Регіональна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Черкаській області (2021). Управління екології та природних ресурсів Черкаської обласної державної адміністрації. <https://mepr.gov.ua/wp-content/uploads/2022/10/Regionalna-dopovid-CHerkaska-ODA-2021.pdf>
15. Фондові матеріали Головного управління Держгеокадастру у Черкаській області (2025). <https://cherkaska.land.gov.ua>
16. Сонько С. П., Кисельов Ю. О., Щетина М. А. (2020). Сільськогосподарське районування Черкаської області в контексті проблеми раціонального використання земельних ресурсів. Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка. Серія: географія. 48(1), 138-147. <https://doi.org/10.25128/2519-4577.20.1.16>
17. Sopova N., Kyseliyova O., Kyselov Yu., Cherednychenko I., Sopov D. (2024). Mapping the erosion damage of agricultural landscapes in Cherkasy region. International Conference of Young Professionals «GeoTerrace–2024». Lviv, Ukraine. 1–5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2024510082>
18. Парахненко В. Г., Ляховська Н. О., Благополучна А. Г. (2021). Екологічна оцінка стану ґрунту в Черкаській області. Вісник Уманського національного університету садівництва. 2. 91-95. <https://doi.org/10.31395/2310-0478-2021-2-91-95>
19. Sonko S. P. (2018). Express assessment of environmental impact of agriculture technologies on the soils of Cherkasy Oblast. Ukrainian Journal of Ecology. 8(1). 451–459. <https://www.ujecology.com/articles/express-assessment-of-environmental-impact-of-agriculture-technologies-on-the-soils-of-cherkasy-oblast.pdf>
20. Чорний С. Г. (2018). Оцінка якості ґрунтів: навчальний посібник. Миколаїв: МНАУ. 233.
21. Третяк А. М., Третяк В. М., Прядка Т. М., Капінос Н. О., Третяк Р. А., Третяк Н. А. (2024). Економіка землекористування та землевпорядкування (II-е доповнене видання в 2-ох частинах). Ч. 1. Економіка землекористування: навчальний посібник. Біла Церква: «ТОВ «Білоцерківдрук». 320.
22. Третяк А. М., Третяк В. М., Прядка Т. М., Третяк Н. А. (2022). Територіально-просторове планування землекористування: навчальний посібник. Біла Церква: «ТОВ «Білоцерківдрук». 168.
23. Сопов Д. С., Хайнус Д. Д., Бузіна І. М., Макеева Л. М. (2023). Сучасні механізми управлінського впливу на процес землекористування. «Наукові інновації та передові технології» (Серія «Державне управління», Серія «Право», Серія «Економіка», Серія «Психологія», Серія «Педагогіка»): журнал. 3(17). 59–71. [https://doi.org/10.52058/2786-5274-2023-3\(17\)-59-71](https://doi.org/10.52058/2786-5274-2023-3(17)-59-71)
24. Trokhymenko G., Litvak S., Litvak O., Andreeva A., Rabich O., Chumak L., Nalysko M., Troshyn M., Komarysta B., Sopov D. (2023). Assessment of iron and heavy metals accumulation in the soils of the combat zone. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 5. 10 (125). 6–16. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.289289>
25. Аріон О. В., Купач Т. Г., Дем'яненко С. О. (2021). Основи ґрунтознавства: навчально-методичний посібник. Київ: ВПЦ Київський університет, 327.

Внесок авторів: всі автори зробили рівний внесок у цю роботу

Конфлікт інтересів: автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів

Comprehensive forecasting of geospatial changes in soil fertility in Cherkasy region using CLUE-S and ANN models

Nadiia Sopova¹

Senior Lecturer, Department of Land Management, Geodesy and Cadastre,

¹ State Biotechnological University, Kharkiv, Ukraine;

Roman Olepir²

PhD (Agronomy), Associate Professor, Department of Agriculture and Agrochemistry named after V. I. Sazanova,

² Poltava State Agrarian University, Poltava, Ukraine;

Dmytro Sopov³

PhD (Geoscience), Associated Professor, Department of Geodesy, Land Management and Land Cadastre,

³ Odesa State Agrarian University, Odesa, Ukraine;

Iryna Kyryuchova⁴

PhD (Biology), Associated Professor, Department of Horticulture and Ecology,

⁴ Luhansk Taras Shevchenko National University, Poltava, Ukraine;

Kateryna Berezenko⁴

Senior Lecturer, Department of Horticulture and Ecology;

Iryna Cherednychenko⁴

PhD (Agronomy), Associate Professor,

Department of Chemistry, Geography and Earth Sciences;

Natalia Maslova⁵

PhD (Geography), Associated Professor,
Department of Natural Sciences and methods of their teaching,
⁵ Volodymyr Vynnychenko Central Ukrainian State University,
Kropyvnytskyi, Ukraine;

Buzina Iryna¹

PhD (Agronomy), Associate Professor,
Department of Ecology and Biotechnology in Crop Production;

Makieieva Liudmyla¹

PhD (Public administration), Associate Professor,
Department of Land Management, Geodesy and Cadastre;

Bubnikovych Alina⁶

Senior Lecturer, Department of Agronomy and Land Management,

⁶ Eastern Ukrainian National University named after Volodymyr Dahl, Kyiv, Ukraine

ABSTRACT

Introduction. This study analyzes soil fertility dynamics in Ukraine's Cherkasy region, considering natural, socio-economic and anthropogenic factors. Soil fertility underpins agricultural productivity, ecological stability and food security, yet is highly sensitive to climate variability, land-use changes, and economic decisions. The research focuses on developing a spatially explicit predictive model to forecast fertility trends, capturing interactions between land use, agrochemical properties (e.g., humus content, pH) and economic drivers of land management. By linking environmental and socio-economic processes, the study provides a tool for informed, sustainable land resource management.

Methods. To achieve this objective, an integrated modeling framework was developed, combining the CLUE-S model, which is designed for spatially dynamic analysis of land-use change, with an artificial neural network (ANN) capable of predicting agrochemical indicators based on climatic, agronomic, and socio-economic data. The CLUE-S component enabled the simulation of land-use transitions and the assessment of spatial patterns of change, while the ANN provided forecasts of humus content and pH levels using historical datasets. This approach allowed for the synthesis of geospatial modeling and data-driven prediction in a unified system. Special consideration was given to socio-economic parameters, including state agricultural policies, the availability of financial resources for the agricultural sector, and prevailing market conditions, ensuring that the modeled scenarios would be both scientifically valid and reflective of real-world constraints.

Results. The modeling revealed that humus content and soil pH are the primary determinants of long-term soil productivity. Under the business-as-usual scenario, where current land-use practices remain unchanged, humus content is projected to decrease by 8–12 % by 2050, while pH levels could fall to 5,7, resulting in a 15–20 % decline in fertility. In contrast, the sustainable land-use scenario, which incorporates optimized crop rotations and practices aimed at maintaining soil organic matter, is expected to stabilize humus content at 4 % and maintain pH levels between 6,3 and 6,5, leading to improved nutrient availability and more efficient use of resources. These results clearly demonstrate the significant potential of targeted land management strategies to mitigate future losses in soil fertility.

Conclusions. The findings confirm the effectiveness of an integrated spatial-predictive modeling approach that combines the CLUE-S model with artificial neural networks for forecasting soil fertility under different environmental and socio-economic conditions. A distinctive feature of this study is its comprehensive inclusion of socio-economic drivers alongside biophysical variables, enabling the development of realistic and policy-relevant projections. The proposed framework has considerable practical value for agricultural landscape planning, the design of sustainable land-use strategies, and the creation of land resource management policies. By enabling the assessment of long-term impacts of land-use change, the optimization of soil resource utilization, and the prevention of degradation, the CLUE-S + ANN model provides a strategic tool for ensuring agricultural productivity and ecological stability in the face of climate change and socio-economic transformations.

Keywords: *land use, soil, soil fertility, forecasting, spatial modeling, CLUE-S, ANN, soil degradation, agrochemical indicators.*

References

1. Akın A., Erdoğan N., Berberoğlu S., Çilek A., Erdoğan A., Donmez C., Şatir O. (2022). Evaluating the efficiency of future crop pattern modelling using the CLUE-S approach in an agricultural plain. *Ecological Informatics*, 71. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2022.101806>
2. Liao G., He P., Gao X., Lin Z., Huang C., Zhou W., Deng L. (2022). Land use optimization of rural production–living–ecological space at different scales based on the BP–ANN and CLUE–S models. *Ecological Indicators*, 137. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.108710>
3. Chu H.-J., Wu C.-F., Lin Y.-P. (2013). Incorporating Spatial Autocorrelation with Neural Networks in Empirical Land-Use Change Models. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 40(3), 384-404. <https://doi.org/10.1068/b37116>
4. Yu Z., Zhao M., Gao Y., Wang T., Zhao Z. & Wang S. (2023). Multiscenario Simulation and Prediction of Land Use in Huaibei City Based on CLUE-S and PLUS Models. *Applied Sciences*, 13(12), 7142. <https://doi.org/10.3390/app13127142>

5. Pindozi S. (2017). Predicting land use change on a broad area: Dyna-CLUE model application to the Litorale Domizio-Agro Aversano (Campania, South Italy), *Journal of Agricultural Engineering*, 48(s1), 27–35. <https://doi.org/10.4081/jae.2017.657>
6. Anputhas M., Janmaat J. J. A., Nichol C. F. & Wei X. (Adam). (2016). Modelling spatial association in pattern based land use simulation models. *Journal of Environmental Management*, 181, 465–476. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.06.034>
7. Loukika K. N., Keesara V. R., Buri E. S. & Sridhar V. (2023). Future prediction of scenario based land use land cover (LU&LC) using DynaCLUE model for a river basin. *Ecological Informatics*, 77. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2023.102223>
8. Alaboz, P., Odabas, M. S. & Dengiz, O. (2023). Soil quality assessment based on machine learning approach for cultivated lands in semi-humid environmental condition part of Black Sea region. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 69(15), 3514–3532. <https://doi.org/10.1080/03650340.2023.2248002>
9. Wang F., Fan Z., Kuai Y., Sun N., Cheng X., Zhang J., Wang D., Su J., Xu M. (2024). Deciphering Soil Fertility of Tobacco Planting Fields with Back Propagation Artificial Neural Networks in Southwest China. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*. 24, 944–955. <http://dx.doi.org/10.1007/s42729-023-01598-5>
10. Pichura V., Potravka L., Stratichuk N., Drobitko A. (2023). Space-time modeling and forecasting steppe soil fertility using geo-information systems and neuro-technologies. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 29(1), 182–197. <https://dspace.ksaeu.kherson.ua/handle/123456789/8728>
11. Verburg Peter. (2024). «CLUE Full Version». *DataverseNL*, V1. <https://doi.org/10.34894/CXAUYO>
12. Verburg P. H. & Overmars K. P. (2009). Combining top-down and bottom-up dynamics in land use modeling: exploring the future of abandoned farmlands in Europe with the Dyna-CLUE model. *Landscape Ecology*, 24(9), 1167–1181. <https://doi.org/10.1007/s10980-009-9355-7>
13. *Ecological Passport of Cherkasy Region* (2023). Ministry of Environmental Protection and Natural Resources of Ukraine. <https://mepr.gov.ua/wp-content/uploads/2024/10/Ekologichnyi-pasport-2023.zip> [in Ukrainian].
14. *Regional Report on the State of the Environment in Cherkasy Region* (2021). Department of Ecology and Natural Resources of the Cherkasy Regional State Administration. <https://mepr.gov.ua/wp-content/uploads/2022/10/Regionalna-dopovid-CHerkaska-ODA-2021.pdf> [in Ukrainian].
15. *Archival Materials of the Main Department of the State Service of Ukraine for Geodesy, Cartography and Cadastre in Cherkasy Region* (2025). <https://cherkaska.land.gov.ua> [in Ukrainian].
16. Sonko S. P., Kyseliov Yu. O., Shchetyna M. A. (2020). Agricultural zoning of Cherkasy region in the context of the problem of rational use of land resources. *Scientific notes of the Volodymyr Hnatyuk Ternopil National Pedagogical University. Series: geography*. 48(1). 138–147. <https://doi.org/10.25128/2519-4577.20.1.16> [in Ukrainian].
17. Sopova N., Kyseliyova O., Kyselov Yu., Cherednychenko I., Sopov D. (2024). Mapping the erosion damage of agricultural landscapes in Cherkasy region. *International Conference of Young Professionals «GeoTerrace-2024»*. Lviv, Ukraine. 1–5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2024510082>
18. Parakhnenko V. G., Lyakhovska N. O., Blagopoluchna A. G. (2021). Ecological assessment of soil condition in Cherkasy region. *Bulletin of the Uman National University of Horticulture*. 2. 91–95. <https://doi.org/10.31395/2310-0478-2021-2-91-95> [in Ukrainian].
19. Sonko S. P. (2018). Express assessment of environmental impact of agriculture technologies on the soils of Cherkasy Oblast. *Ukrainian Journal of Ecology*. 8(1). 451–459. <https://www.ujecology.com/articles/express-assessment-of-environmental-impact-of-agriculture-technologies-on-the-soils-of-cherkasy-oblast.pdf>
20. Chorny S. H. (2018). *Soil Quality Assessment: A Textbook*. Mykolaiv: MNAU. 233. [in Ukrainian].
21. Tretiak A. M., Tretiak V. M., Priadka T. M., Kapinos N. O., Tretiak, R. A. & Tretiak N. A. (2024). *Economics of Land Use and Land Management (2nd expanded edition in 2 parts). Part 1. Economics of Land Use: A Textbook*. Bila Tserkva: «Bilotserkivdruk» LLC. 320. [in Ukrainian].
22. Tretiak A. M., Tretiak V. M., Priadka T. M. & Tretiak N. A. (2022). *Territorial and Spatial Planning of Land Use: A Textbook*. Bila Tserkva: «Bilotserkivdruk» LLC. 168. [in Ukrainian].
23. Sopov D. S., Khainus D. D., Buzina I. M. & Makieieva L. M. (2023). Modern Mechanisms of Managerial Influence on the Land Use Process. «Scientific Innovations and Advanced Technologies» (Series «Public Administration», Series «Law», Series «Economics», Series «Psychology», Series «Pedagogy»): *Journal*, 3(17), 59–71. [https://doi.org/10.52058/2786-5274-2023-3\(17\)-59-71](https://doi.org/10.52058/2786-5274-2023-3(17)-59-71) [in Ukrainian].
24. Trokhymenko G., Litvak S., Litvak O., Andreeva A., Rabich O., Chumak L., Nalysko M., Troshyn M., Komarysta B., Sopov D. (2023). Assessment of iron and heavy metals accumulation in the soils of the combat zone. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 5. 10 (125). 6–16. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.289289>
25. Arion O. V., Kupach T. H. & Demianenko S. O. (2021). *Fundamentals of Soil Science: A Teaching and Methodological Manual*. Kyiv: VPC Kyiv University. 327. [in Ukrainian].

Authors Contribution: All authors have contributed equally to this work

Conflict of Interest: The authors declare no conflict of interest

Received 12 July 2025

Accepted 7 November 2025