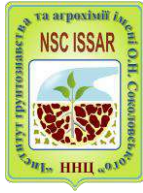




НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ АГРАРНИХ НАУК
УКРАЇНИ



НАЦІОНАЛЬНИЙ НАУКОВИЙ ЦЕНТР
ІНСТИТУТ ҐРУНТОЗНАВСТВА ТА АГРОХІМІЇ
імені О. Н. СОКОЛОВСЬКОГО

АГРОХІМІЯ і ҐРУНТОЗНАВСТВО

МІЖВІДОМЧИЙ
ТЕМАТИЧНИЙ
НАУКОВИЙ
ЗБІРНИК

92

Агрохімія і ґрунтознавство. Міжвідомчий тематичний науковий збірник.
Випуск 92. Харків: ННЦ «ІГА імені О.Н. Соколовського», 2021. 98 с.

AGROCHEMISTRY and SOIL SCIENCE. Collected papers.
No. 92. Kharkiv: NSC ISSAR, 2021. 98 p.

Збірник публікує наукові статті за результатами теоретичних, експериментальних та методичних досліджень з актуальних напрямів ґрунтознавства, агрохімії, агроекології, землеробства та інших наук, які містять оригінальну інформацію та обґрунтовані висновки.

Згідно з наказом МОН України № 1643 від 28.12.2019 збірник внесено до Переліку наукових фахових видань України в галузях сільськогосподарської та біологічної науки за спеціальностями:

201 – Агрономія і 091 – Біологія і включено до категорії «Б»

Мови видання: українська, англійська, російська

Редакційна колегія:

С.А. Балюк д.с.-г.н. (відповідальний редактор); ННЦ «ІГА імені О.Н. Соколовського»
А.Б. Ачасов д.с.-г.н.; Харківський національний аграрний ун-т ім. В.В. Докучаєва
А.Д. Балаєв д.с.-г.н.; Національний ун-т біоресурсів і природокористування України
Т.Ю. Биндич к.б.н.; ННЦ «ІГА імені О.Н. Соколовського»
В.А. Величко д.с.-г.н.; Державне видавництво «Аграрна наука» НААН
З.Г. Гамкало д.б.н.; Львівський національний ун-т імені Івана Франка
Г.М. Господаренко д.с.-г.н.; Уманський національний ун-т садівництва
Ю.М. Дмитрук д.б.н.; Чернівецький національний ун-т ім. Ю. Федьковича
В.В. Іванина д.с.-г.н.; Інститут енергетичних культур і цукрових буряків НААН
Т.М. Лактіонова к.с.-г.н. (відповідальний секретар); ННЦ «ІГА імені О.Н. Соколовського»
М.В. Лісовий д.с.-г.н.; ННЦ «ІГА імені О.Н. Соколовського»
М.М. Мірошниченко д.б.н. (заст. відп. редактора); ННЦ «ІГА імені О.Н. Соколовського»
І.Д. Пачев д.с.-г.н.; Інститут виноградарства та виноробства (Болгарія)
Є.В. Скрильник д.с.-г.н.; ННЦ «ІГА імені О.Н. Соколовського»
О.І. Старченко к.б.н.; ННЦ «ІГА імені О.Н. Соколовського»
Т.Г. Лях д.с.-г.н.; Ін-т педології, агрохімії та захисту ґрунтів "Н. Дімо"(Молдова)
Р.С. Трускавецький д.с.-г.н.; ННЦ «ІГА імені О.Н. Соколовського»
А.І. Фатєєв д.с.-г.н.; ННЦ «ІГА імені О.Н. Соколовського»
Ю.Л. Цапко д.б.н.; ННЦ «ІГА імені О.Н. Соколовського»
В.Р. Черлінка д.б.н.; Чернівецький національний ун-т ім. Ю. Федьковича
С.Г. Чорний д.с.-г.н.; Миколаївський національний аграрний університет

Склад редакційної колегії затверджено Вченою радою ННЦ
«ІГА імені О.Н. Соколовського», протокол № 7 від 05.04.2019 р.

Рік заснування: 1966

Свідоцтво про державну реєстрацію КВ № 20942-10742Пр

**Засновник: Національний науковий центр «Інститут ґрунтознавства та агрохімії
імені О.Н. Соколовського» (ННЦ ІГА) вул. Чайковська, 4, м. Харків, 61024, тел. (057) 704-16-69
e-mail: agrochemsoilsci.org@gmail.com**

www.agrochemsoilsci.org

Індексування та реферування:

- база даних CrossRef,
- CiteFactor
- Реєстр наукових фахових видань України
- портал Національної бібліотеки України ім. В.І. Вернадського,
- загальнодержавна реферативна база даних (РБД) «Україніка наукова»,
- видання УРЖ «Джерело» Інституту проблем реєстрації інформації НАН України (ІПРІ)
- пошукова система і база даних наукових цитувань «Open Ukrainian Citation Index (OUCI)»

Рекомендовано до видання Вченою радою ННЦ ІГА, протокол № 17 від 10.12.2021 р.

ISSN 0587-2596
e-ISSN 2616-6852
DOI: <https://doi.org/10.31073/acss91>

© Національний науковий центр
«Інститут ґрунтознавства та агрохімії
імені О.Н. Соколовського»

ЗМІСТ / CONTENT

ВЛАСТИВОСТІ ҐРУНТІВ / SOIL PROPERTIES

Белоліпський В.О., Лактіонова Т.М., Полулях М.М.

Спосіб педотрансферного моделювання вологозабезпеченості ґрунту на схилових землях
Belolipsky, V. O., Laktionova, T. M., & Polulyakh, M. M. Method of pedotransfer modeling of soil moisture supply on sloping lands 4

Кутова А.М., Круглов О.В., Коляда В.П.

До питання ерозійної складової розрахунку балансу гумусу
Kutova A.M., Kruglov O.V., Koliada V.P. To the question of the erosion component of calculating the balance of humus 17

СТАЛЕ УПРАВЛІННЯ І МОНІТОРИНГ / SUSTAINABLE MANAGEMENT and MONITORING

Дмитрук Ю.М., Семенчук В.Г.

Моніторинг і збереження ґрунтів як компонент системи сталого управління агроєкосистемами локального рівня...
Dmytruk Yu. M., Semenchuk V. G. Monitoring and conservation of soils as a component of a sustainable management for agroecosystems at the local level 24

Полулях М.М., Белоліпський В.О.

Багаторічна динаміка деяких метеорологічних та агрометеорологічних показників за даними метеорологічної станції Луганськ
Polulyakh M.M., Belolipskiy, V.O. Long term dynamics of some meteorological and agrometeorological indicators according to the Luhansk meteorological station..... 32

МЕТОДОЛОГІЯ І МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ / METHODOLOGY AND RESEARCH TECHNIQUE

Гамкало З.Г., Шпаківська І.М., Марискевич О.Г.

Літогенний потенціал карбонізації педосфери: теоретико-методологічні, методичні та екосистемний підходи
Hamkalo Z. G., Shpakivska I. M., Maryshevych O. G. Lithogenic potential of pedosphere carbonization: theoretical-methodological, methodical and ecosystem approaches 41

Khadka D., Amgain R., Joshi S., Shrestha S.

Evaluation of distilled water pH measurement with electrolyte methods in cultivated soils of Nepal
Хадка Д., Амгаїн Р., Джоші С., Шреста Ш. Оцінка вимірювання рН водного розчину та електролітними методами в окультурених ґрунтах Непалу 52

Cherlinka V. R., Dmytruk Y. M., Sobko V. I., Gunchak M. V., Balan T. I., Cherlinka L. V.

Challenges and opportunities of modelling carbon dioxide sequestration potential in Ukrainian soils
Черлінка В.Р., Дмитрук Ю.М., Собко В.І., Гунчак М.В., Балан Т.І., Черлінка Л.В. Проблеми та можливості моделювання потенціалу секвестрації діоксиду карбону ґрунтами України..... 62

ДОСЛІДЖЕННЯ МОЛОДИХ НАУКОВЦІВ / STUDIES of YOUNG SCIENTISTS

Коваленко С. С.

Просторова та часова варіабельність вмісту рухомого фосфору в орному шарі ґрунтів за даними різних методів
Kovalenko S. S. Spatial and temporal variability of available phosphorus content in the arable soil layer according to different methods 71

Куцова К. М.

До питання про вплив рельєфу на просторову неоднорідність ґрунтових параметрів
Kutsova K. M. To the question of the influence of relief on the spatial heterogeneity of soil parameters 80

Дмитрієвцева Н.В., Шепелюк Л.М., Пилипака С.М.

Накопичення ¹³⁷Cs лучними травами на торфово-болотних ґрунтах зони Полісся у Рівненській області
Dmitriyevtseva N.V., Shepelyuk L.N., Pilipaka S.M. Accumulation of ¹³⁷Cs by meadow grasses on peat-bog soils of the Polissia zone in the Rivne region. 92

УДК 631.421:57.087

Спосіб педотрансферного моделювання вологозабезпеченості ґрунту на схилі землях

В. О. Белоліпський*, Т. М. Лактіонова, М. М. Полулях

Національний науковий центр "Інститут ґрунтознавства та агрохімії імені О.Н. Соколовського",
Харків, Україна

ІНФОРМАЦІЯ	АНОТАЦІЯ
Отримано 27.07.2021 Отримано після доопрацювання 25.11.2021 Затверджено до видання 10.12.2021 Доступно онлайн 20.12.2021	Метою статті є оприлюднення способу розробки педотрансферних моделей для прогнозування вологозабезпеченості ґрунту у межах агроландшафту на схилі землях, еродованих землях (на території Луганської області) на різних етапах вегетаційного періоду сільськогосподарських культур. Моделі побудовано на визначення коефіцієнта дефіциту вологи в ґрунті або коефіцієнта зволоженості (для квітня) — предиктанти. Як предиктори у педотрансферних моделях використано такі фактори: кількість опадів за вегетацію; коефіцієнт зволоженості ґрунту в квітні; ГТК; коефіцієнт нормованих атмосферних опадів за холодний період; вміст гумусу в шарі 0–20 см; коефіцієнт змитості ґрунту; щільність будови ґрунту у шарі 0–20 см; гіпсометричний рівень; коефіцієнт захисної дії лісосмуг; фактор агрофону. Вихідною інформацією є систематизований набір даних, з гідрологічної характеристики агроландшафтів та властивостей ґрунтів, частково опублікованих авторами раніше в методичних рекомендаціях. Спосіб педотрансферного моделювання вологозабезпеченості ґрунтів на схилі землях включає послідовний математико-статистичний аналіз (з використанням ГІС-технологій) за такими тематичними етапами: (i) вибір факторів, що впливають на вологозабезпеченість ґрунту як предикторів педотрансферних моделей; (ii) кластерний аналіз ефективності факторів вологозабезпеченості ґрунту на водозборах агроландшафту; (iii) розробка педотрансферних моделей вологозабезпеченості ґрунту за фрагментами вегетаційного періоду культур шляхом побудови регресійних рівнянь та оцінювання адекватності моделей за статистичними критеріями. Моделі розроблено з урахуванням фаз (періодів) органогенезу сільськогосподарських культур та послідовності агротехнічних заходів у ґрунтозахисній системі землеробства. Виявлено, що найбільш впливовим, серед досліджуваних факторів, щодо прогнозування вологонасиченості ґрунту у будь-який період, є фактор агрофону, частка впливу якого становить від 46 до 89 %. Натомість, частка впливу природного фактору зволоження — ГТК обмежується діапазоном 10–17 %. Показано, що за результатами прогнозування дефіциту вологи в ґрунті територію агроландшафту можна умовно розділити на робочі ділянки для розробки диференційованої системи практичних агротехнічних заходів для корегування забезпеченості рослин продуктивною вологою.

* E-mail: belolipskiy-42@ukr.net

Форма цитування: Белоліпський В.О., Лактіонова Т.М., Полулях М.М. Спосіб педотрансферного моделювання вологозабезпеченості ґрунту на схилі землях. *Агрохімія і ґрунтознавство*. Міжвід. тем. наук. збірник. 2021. Вип. 92. Харків: ННЦ "ІГА ім. О.Н. Соколовського". С. 4-16. <https://doi.org/10.31073/acss92-01>

1. Вступ

Педотрансферні моделі дають змогу визначити одні властивості ґрунтів, використовуючи для цього інші. Інакше кажучи, — це прогнозування шляхом розрахунку параметрів важкодоступних і дорогих у вимірюванні показників за допомогою інших, параметри яких легко вимірюються і легкодоступні. Саме таку заміну називають педотрансфером, що за формулюванням J. Bouma [3], є переведенням даних, які ми маємо, у ті, які нам потрібні, а математичну формулу для розрахунку, відповідно — педотрансферною функцією (ПТФ) [1, 2].

За чотири останні десятиліття з'явилося багато ПТФ, розроблених для прогнозування гідрологічних характеристик ґрунту. Так само й багато досліджень було присвячено вивченню можливості практичного застосування розроблених функцій через їх систематизацію і порівняння їх ефективності на різних ґрунтах із різним гранулометричним складом та різними властивостями [4, 5].

З урахуванням того, що гідрологічні властивості, як здатність ґрунту проводити й утримувати вологу, значною мірою контролюють гідрологічні процеси на водозборах, розроблено методологію оцінювання чутливості моделі водного балансу водозбірної території (басейну) до вибору ПТФ для її побудови [5]. Автори цієї роботи, аналізуючи просторово-часові зміни загального стоку і компонентів стоку на виході з водозбору, виявили, що розподіл води в гідрологічній системі значно варіюється залежно від обраної ПТФ, а компоненти водного балансу дуже чутливі до просторової структури ґрунтових гідрологічних властивостей. Вони рекомендують тестувати моделі шляхом ретельного розгляду ПТФ та орієнтації параметризації ґрунту більше на предствлення правдоподібної гідрологічної поведінки, а не зосереджуючись на узгодженні даних калібрування.

Стосовно можливостей педотрансферного моделювання, порівняно з фізичним

експериментом, автори статті [6], резюмуючи висновки експерименту, попереджають дослідників про те, що застосування педотрансферних функцій для розрахунку, наприклад, швидкості руху води у профілі ґрунту, може давати набагато вищі параметри, ніж ті, що визначено за допомогою фізичного моделювання.

У статті [7], щодо оцінки можливості застосування ПТФ, дослідники припускають [8], що використання існуючих гідрологічних ПТФ часто обмежується двома причинами. По-перше, більшість ПТФ розроблено на ґрунтах, які розвивалися за певних екологічних умов. Часто ці ПТФ не можна застосовувати в інших регіонах, на ґрунтах зі значними відмінностями у фізичних та хімічних властивостях. Про це свідчать такі дослідження, як [9, 10], де показано, що ПТФ, створені для ґрунтів з помірним кліматом, є неприйнятними для тропічних ґрунтів. По-друге, застосування існуючих ПТФ ще більше обмежується необхідними вхідними даними. Як стверджують [11], гідралічні ПТФ, розроблені на мінеральних ґрунтах, часто не застосовуються до органічних ґрунтів.

Вологість ґрунту є одним із основних факторів сільськогосподарського виробництва та гідрологічних циклів, і її точне прогнозування є важливим для раціонального використання та управління ресурсами води. Однак вологість ґрунту включає складні структурні характеристики та метеорологічні фактори, і важко встановити ідеальну математичну модель для прогнозування вологості ґрунту. Існуючі педотрансферні моделі мають проблеми з точністю прогнозування, узагальненням та багатофункціональною обробкою даних, отже, як вважають [12], продуктивність прогнозування має покращитися.

Щодо вхідних відомостей для моделювання важливо розуміти, що використання різних баз даних несе певні незручності в подальшому опрацюванні цих даних, пов'язані з застосуванням різних методів вимірювання та підготовки зразків, різними розмірами вибірки, різними характеристиками ґрунтового складу та й, навіть, різними одиницями вимірювання вологості [5]. Отже, процес підготовки вхідних даних до використання є чи не найважливішим етапом моделювання.

Реалізація завдань педотрансферного моделювання й розроблення нових видів моделей дозволяють визначити перспективні напрями у ґрунтознавстві України, пов'язані з прогнозними оцінюванням в управлінні водно-фізичними властивостями ґрунту. В останні десятиліття напрацьовано вагомий обсяг матеріалів щодо системного розв'язання проблеми. Розглянемо їх особливості, не дотримуючись хронології опублікування.

Описано спосіб картографо-аналітичної характеристики агрономічно важливих ґрунтових гідрологічних констант (вологість в'янення (ВВ) і найменша (польова) вологості (НВ)) та інших водних властивостей орних ґрунтів України. Проаналізовано інформацію про зволоженість ґрунтів під час обробки та вологозабезпеченість основних сільськогосподарських культур у критичні періоди їх органогенезу [13]. Однак, недоліком цього картографічного способу оцінювання, на нашу думку, є використання дрібномасштабної картографічної основи й представлення ґрунтових характеристик без геоморфологічної прив'язки до облаштування агроландшафту за принципом "ґрунт — розріз", що знижує ефективність використання таких даних у сільськогосподарському виробництві.

Педотрансферне прогнозування вологості стійкого в'янення рослин на чорноземах типовому і звичайному проведено з використанням параметрів трьох фракцій гранулометричного складу [14]. Для калібрування моделей було використано рівняння множинної лінійної регресії з 239 наборів даних вологості в'янення і різних фракцій гранулометричного складу. Відмітимо, що це створює істотні труднощі багаторазових розрахунків (10–12 операцій) і пов'язаних у систему 59 наборів даних для верифікації створюваних моделей. Кращою визнана модель, де, як істотні незалежні змінні, було ідентифіковано параметри вмісту трьох гранулометричних фракцій (за класифікацією Н.А. Качинського) – 0,01-0,005; 0,005-0,001 і <0,001 мм (%). Але, порівняно з моделлю, де використано всі фракції ґрунтового складу, модель з трьома фракціями не набагато спрощує розрахунки. При цьому точність прогнозу ($R^2 = 0,64$ для обох моделей) є невисокою.

Найбільш близьким за технічною суттю та результатом, що досягається, є механізм діагностики та управління з використанням досвіду педотрансферного моделювання в дослідженнях фізики ґрунтів [15]. На основі інформації, зібраної в базі даних "Властивості ґрунтів України" [16], розроблено педотрансферні моделі, що описують вплив вмісту фізичної глини й гумусу (базові показники) на деякі ґрунтово-гідрологічні константи (ВВ і НВ) ґрунтів.

Слабким місцем цього способу є те, що розроблені трифакторні моделі лінійного та квадратичного типу важко застосовувати в аналізі надійності окремих факторів. Для підвищення ефективності використання педотрансферних моделей необхідно враховувати вплив комплексу таких показників як просторова неоднорідність вмісту гумусу

та водостійкості структурних агрегатів ґрунту, захищеність водозборів лісосмугами та еродованість ґрунтового покриву, що обумовлюють просторово диференційоване накопичення вологи і типи водного режиму.

Багаторічні дослідження показали, що більше 80 % орних земель України, а це понад 26,4 млн га, мають типи водного режиму (непромивний і періодично промивний), що обумовлює переважаючий або періодичний дефіцит вологи в ґрунті [17].

Ця ситуація посилюється тим, що у степовій зоні України впродовж останніх 111 років (з 1900 до 2011) середньорічна температура повітря підвищилася на 0,3–0,7° С. За даними Гідрометцентру, посухи стали більш частими — з 1960 до 2010 було 25 посушливих років [18].

Пріоритетність водного режиму, як оцінюваного фактору, є в тому, що найчастіше саме він лімітує родючість ґрунтів в умовах Степу України і цю проблемну ситуацію урегулювати можна тільки шляхом корінного удосконалення заходів, спрямованих на максимальне накопичення, збереження і раціональне використання продуктивної вологи ґрунту [13].

Забезпеченість території вологою зазвичай характеризується гідротермічним коефіцієнтом Селянінова (ГТК). Дослідженнями багаторічної динаміки вологозабезпеченості території Луганської області [19] виявлено, що за вегетаційний період ГТК підвищується з 0,75 до 0,91 (зростає на 22,3 %), але вологозабезпеченість сільськогосподарських культур у період формування врожаю залишається недостатньою. Основою розрахунку вологозабезпеченості за формулою Селянінова [20] є баланс вологи, як відношення суми опадів (ΣH) до суми температур, зменшеної в 10 разів ($0,1 \Sigma t$), яка, власне, і викликає випаровування з території. Баланс вологи пропонується виражати як різницю між сумою опадів і сумарним випаровуванням.

Але характеристика вологозабезпеченості території як за потенційною спроможністю ґрунту накопичувати й утримувати вологу, так і за ГТК має свої недоліки, тому що не враховується неоднорідність ерозійно-гідрологічних процесів (поверхневий стік) на схилових землях, які, своєю чергою, обумовлюють зміну ступеню еродованості, вмісту гумусу, щільності будови ґрунту та інших факторів, що формують його вологоємність.

Виходячи з особливостей геостатистичних показників (гіпсометричний рівень, географічні координати, фактори вологозабезпеченості), які трапляються на локальних рівнях (водозбір, робоча ділянка) [21], раніше ми рекомендували для оцінювання функції агроландшафту балкових водозборів використовувати показники накопичення вологи як у період вегетації сільськогосподарських культур, так і в осінньо-зимовий період. Такий підхід дозволить характеризувати умови формування запасів продуктивної вологи та її дефіциту, де ГТК є фактором вологозабезпеченості, а тому, основним фактором диференційованого процесу ґрунтоутворення на схилах.

Таким чином, якщо закласти в основу прогнозування потенційної вологозабезпеченості сільськогосподарських культур на території агроландшафту гідрологічні характеристики його компонентів, то одержимо інформаційну систему, придатну для адекватних розрахунків. У такому разі буде враховано як природний набір факторів ґрунтоводоохоронної здатності агроландшафтів схилових земель з визначенням їх оптимальним співвідношенням, так і природно-антропогенний механізм підвищення водоохоронної ефективності.

Мета статті — оприлюднення особливостей розробки педотрансферних моделей для прогнозування вологозабезпеченості ґрунту на водозбірній частині агроландшафту на території Луганської області як рівнянь регресії для визначення коефіцієнта дефіциту зволоженості ґрунту (предиктант) за показниками (предикторами), якими характеризуються метеорологічні умови, фізичні, хімічні, гідрологічні та морфологічні властивості ґрунту, тип агрофону та стан протиерозійної захищеності земель.

2. Матеріали і методи досліджень

Спосіб педотрансферного моделювання вологозабезпеченості ґрунтів на схилових землях включає послідовний математико-статистичний аналіз (з використанням ГІС-технологій) і розрахунки за такими тематичними етапами: (i) вибір факторів, що впливають на вологозабезпеченість ґрунту, як предикторів педотрансферних моделей; (ii) кластерний аналіз ефективності факторів вологозабезпеченості ґрунту на водозборах агроландшафту; (iii) розробка педотрансферних моделей вологозабезпеченості ґрунту за фрагментами вегетаційного періоду культур шляхом побудови регресійних рівнянь та оцінювання адекватності моделей за статистичними критеріями.

Набір предикторів (показників) для створення моделей — розрахунку коефіцієнта

дефіциту вологи в ґрунті включає такі: сума атмосферних опадів за вегетацію; коефіцієнт зволоженості ґрунту; ГТК; коефіцієнт нормованих атмосферних опадів за холодний період; вміст гумусу; коефіцієнт змитості ґрунту; щільність будови ґрунту; висота на профілі (гіпсометричний рівень); коефіцієнт захисної дії лісосмуг; коефіцієнт агрофону.

Із створеної раніше бази даних [22, 23], було взято дані, здобуті шляхом польових досліджень, з визначеними за допомогою GPS координатами точок відбирання проб ґрунту та проведення досліджень у полі на визначення параметрів тих показників, які означено як фактори формування вологонакопичення у просторі балкового водозбору.

Поставлена задача вирішується таким чином: у разі нестачі даних водно-фізичних властивостей ґрунту, їх розраховують із застосуванням педотрансферного моделювання за способами, відомими з літератури [14, 15].

Дослідним об'єктом для відпрацювання способу педотрансферного моделювання обрано агроландшафт у водозборі балки "Стукалово" басейну р. Сіверський Донець у Луганській області, де проведено дослідження в точках, координати яких зафіксовано (GPS), і таким чином, виконано оцінювання просторової неоднорідності природно-антропогенних факторів вологозабезпеченості (вміст гумусу, % в шарі ґрунту 0–20 см; щільність будови ґрунту, г/см³ у шарі 0–20 см, коефіцієнт змитості; висота на геоморфологічному профілі, м; коефіцієнт захисної дії лісосмуг; вологозапаси на дослідному водозборі протягом вегетації).

Для побудови комплексної емпіричної педотрансферної моделі математичне завдання можна сформулювати так. Потрібно знайти аналітичний вираз, що показує, як величина Y (коефіцієнт зволоженості чи коефіцієнт дефіциту вологи в ґрунті) — предиктант, залежить від величин $X_1, X_2, \dots, X_n$ (параметри факторів, що впливають на стан зволоженості ґрунту) — предикторів. Тобто, необхідно вирішити рівняння: $Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n)$ окремо для кожного з обраних періодів (квітень — посів ранніх ярих культур; травень–червень — формування врожаю; липень–серпень — післязбиральний період; вересень–жовтень — сівба озимих культур).

В роботі застосовано такі програмні засоби: для побудови регресійних рівнянь (моделей) — MS Excel; виділення асоціації факторів, які зумовлюють накопичення вологи в агроландшафтах, проведено ієрархічним методом (кластерний аналіз — програма Statistika-6.0); для створення 2Д діаграм — Golden Software Surfer 12.0.

3. Реалізація способу педотрансферного моделювання на прикладі водозбору балки "Стукалово" басейну р. Сіверський Донець

3.1. Вибір факторів, що впливають на вологозабезпеченість ґрунту — предикторів педотрансферних моделей

В таблиці 1 представлено перелік природних та природно-антропогенних факторів (предикторів), які прийнято для розробки моделей вологозабезпеченості ґрунту (чорнозему звичайного важкосуглинкового), а також інформацію про способи розрахунку їх параметрів.

3.2. Кластерний аналіз ефективності факторів вологозабезпеченості на водозборах агроландшафту

Для використання представлених у табл. 1 факторів у розробці функціональних педотрансферних моделей потрібно спочатку теоретично об'єднати фактори в кластери, тісно наближені до задачі аналізу функціонування ґрунто-водоохоронної системи водозбору. Тобто, слід виявити вплив кожного з десяти вибраних факторів на вологозабезпеченість ґрунту впродовж кожного з чотирьох обраних періодів.

Виділення асоціації факторів, які зумовлюють накопичення вологи в агроландшафтах, проведено ієрархічним методом (кластерний аналіз — програма Statistika-6.0). Для розробки моделі вологозабезпеченості в агроландшафті сформовано банк даних показників, які впливають на процес. Дані отримано в результаті спостережень за динамікою вологості ґрунту з урахуванням природних та антропогенних факторів [23].

Детальний розгляд дендрографів за фазами вегетації культур дозволяє виявити основні групи факторів та, як висновок, виділити фактори можливого керування вологозабезпеченістю ґрунту (Табл. 2).

Таблиця 1

Показники, що впливають на вологозабезпеченість ґрунту — предиктори

Показник, одиниця вимірювання		Спосіб розрахунку	Пояснення
X ₁	Кількість опадів за вегетацію, мм	—	Результати фактичного вимірювання
X ₂	K _{звг} — коефіцієнт зволоженості ґрунту (квітень)	$K_{звг} = \frac{W_{прод}}{0,7 * HB}$	W _{прод} — запаси продуктивної вологи у шарі ґрунту 0–100 см, мм; HB — найменша (польова) вологоємність ¹ , мм; 0,7HB — норматив оптимального для рослин вмісту вологи
X ₃	ГТК — гідротермічний коефіцієнт Селянінова	$ГТК = \frac{\sum H_{оп}}{0,1 \sum t}$	H _{оп} — сума опадів за певний період, мм; $\sum t$ — сума активних температур за той самий період, °C
X ₄	H _{н.оп.} — коефіцієнт нормованих опадів за холодний період	$H_{н.оп.} = \frac{\Sigma H_{ф.оп.}}{\Sigma H_{середн.оп.}}$	$\Sigma H_{ф.оп.}$ — сума фактичних опадів (листопад–березень); $\Sigma H_{оп. серед.}$ — середньобогаторічна сума опадів за той самий період.
X ₅	X _{гум.} — вміст гумусу в ґрунті в шарі 0–20 см, %	—	Результати аналітичних робіт
X ₆	K _{змг.} — коефіцієнт змитості ґрунту	$K_{змг} = 1,8988 * X_{гум}^{0,1836}$	X _{гум} — вміст гумусу в ґрунті в шарі 0–20 см, %
X ₇	Щільність будови ґрунту в шарі 0–20 см, г/см ³	—	Результати аналітичних робіт
X ₈	H _{пр.} — висота на геоморфологічному профілі, м	—	Інформація з топографічної карти
X ₉	K _{здлс} — коефіцієнт просторової захисної дії лісосмуг	$K_{здлс} = (\frac{30h_1}{l_1} + \frac{30h_2}{l_2} + \frac{30h_n}{l_n})$	h ₁ , h ₂ , h _n — висота лісосмуги, м (прийнята 10 м); l ₁ , l ₂ , l _n — відстань від точок спостережень до відповідних лісосмуг чи насаджень, м; 30 — зона лісомеліоративного впливу, м.
X ₁₀	У _{агроф.} — коефіцієнт агрофону	$У_{агроф.} = 16,535 * W_{заг}^{0,1401}$	W _{заг} — середній запас вологи у шарі ґрунту 0–100 см, мм

Примітка. Показники і способи їх розрахунку описано також в роботах [22, 24, 25]

Таблиця 2

Фактори, що впливають на накопичення вологи в ґрунті протягом обраних фрагментів вегетаційного періоду (за результатами кластерного аналізу)

№	Асоціація впливових факторів	Базові фактори
<i>I. Квітень — сімба ранніх ярих культур</i>		
1	Вміст гумусу (X ₅) + коефіцієнт захисної дії лісосмуг (X ₉)	X ₁₀ , X ₇ , X ₄ , X ₅ , X ₉ , X ₈ ,
2	Щільність будови (X ₇) + висота на профілі (X ₈)	
3	Вміст гумусу (X ₅) + коефіцієнт захисної дії лісосмуг (X ₉) + коефіцієнт нормованих опадів за холодний період (X ₄)	
4	Щільність будови (X ₇) + висота на профілі (X ₈) + коефіцієнт агрофону (X ₁₀)	
<i>II. Травень-червень — формування врожаю</i>		
1	Коефіцієнт змитості (X ₆) + щільність будови ґрунту (X ₇)	X ₁₀ , X ₇ , X ₆ , X ₂ , X ₉ , X ₃ ,
2	Коефіцієнт зволоженості ґрунту (квітень) (X ₂) + коефіцієнт захисної дії лісосмуг (X ₉)	
3	Коефіцієнт агрофону (X ₁₀) + ГТК (X ₃)	
<i>III. Липень-серпень — період після збирання зернових культур</i>		
1	Вміст гумусу (X ₅) + коефіцієнт захисної дії лісосмуг (X ₉)	X ₇ , X ₆ , X ₅ , X ₉ , X ₈
2	Коефіцієнт змитості (X ₆) + щільність будови (X ₇)	
3	Вміст гумусу (X ₅) + коефіцієнт захисної дії лісосмуг (X ₉) + висота на профілі (X ₈)	
<i>IV. Вересень-жовтень — період сівби озимих культур</i>		
1	Вміст гумусу (X ₅) + коефіцієнт захисної дії лісосмуг (X ₉)	X ₇ , X ₅ , X ₉ , X ₆ ,
2	Коефіцієнт змитості (X ₆) + щільність будови (X ₇)	
3	Вміст гумусу (X ₅) + коефіцієнт захисної дії лісосмуг (X ₉) + висота на профілі (X ₈)	
4	Коефіцієнт змитості (X ₆) + щільність будови (X ₇) + ГТК (X ₃)	

За результатами кластерного аналізу дійшли висновку, що для побудови педотрансферної моделі на визначення вологозабезпеченості чорнозему звичайного у квітні, під час посіву ранніх ярих культур, слід залучити такі фактори: коефіцієнт агрофону (X_{10}), опади за холодний період (X_4), висота на профілі (X_8), щільність будови ґрунту (X_7), вміст гумусу (X_5), коефіцієнт захисної дії лісосмуг (X_9). Так само обрано базові фактори для кожного з чотирьох обраних періодів. Очевидно, що спрямуванням зусиль на оптимізацію параметрів саме цих показників є можливим керувати вологозабезпеченістю ґрунту і тому їх названо керувальними факторами. Так у періоди сівби ярих культур (квітень), формування врожаю (травень-червень) і післязбиральний період (липень-серпень) базовими керувальними факторами вологонакопичення є агрофон (X_{10}), щільність будови ґрунту (X_7) і захисна дія лісових смуг (X_9), якими зумовлено обсяги засвоєних ґрунтом атмосферних опадів (X_4) і тип використання змитих ґрунтів (X_6).

Виявлені однорідності (асоціації) природно-антропогенних факторів забезпеченості вологою послуговували основою формалізації процедури аналізування процесу накопичення вологи з метою оцінювання функціонування агроландшафту за параметрами вологозабезпеченості та визначення шляхів їх оптимізації.

3.3. Педотрансферні (математико-статистичні) моделі вологозабезпеченості ґрунту на водозборах агроландшафтів за фрагментами вегетаційного періоду

Вологозабезпеченість ґрунту моделювали за двома критеріями — коефіцієнтом зволоженості (у квітні) та коефіцієнтом дефіциту вологи в ґрунті у три інші фрагменти вегетаційного періоду.

У процесі математично-статистичного аналізування досліджених вологозапасів у періоди формування, збирання врожаю та післязбиральному періоді, як правило, констатували зменшення запасів продуктивної вологи ($W_{\text{прод}}$) впритул до значень вологості в'янення. Тому значення коефіцієнта зволоженості ґрунту ($K_{\text{зв.г.}}$), який зазвичай варіює в межах 0,50–0,07, може наближатися до нульового значення, або навіть бути менше нуля, що призводить до появи його мінусових значень. Тому для утворення плюсового статистичного ряду характеристик предикторів у відношенні вологозапасів у період їх дефіциту застосовано інший показник — коефіцієнт дефіциту вологи ($K_{\text{д.в.}}$), який, фактично, є різницею між показником, прийнятим за одиницю (0,7 НВ) і $K_{\text{зв.г}}$ — коефіцієнтом зволоженості ґрунту в різні періоди спостережень, з додатними або від'ємними значеннями.

Це дозволяє оцінювати динаміку вологозапасів ґрунтів на схилових територіях у часі та просторі різними педотрансферними моделями, та характеризує новизну та відмінну ознаку пропонованого підходу до способу прогнозування вологозабезпеченості ґрунту.

На першому етапі розраховували значення (параметри) кожного з десяти факторів, обраних для прогнозування вологозабезпеченості чорнозему звичайного, у межах декількох років. Тобто, використовуючи потрібні для розрахунку формули (описані в табл. 1) і дані — середньобогаторічні та визначені у результаті польових досліджень у період 2011–2014 рр., знайшли раціональні діапазони параметрів для коректного використання моделей. Діапазон параметрів для кожного фактора умовно (для зручності) розбили на три рівні – від мінімального до максимального (Табл. 3).

Таблиця 3
Діапазони параметрів факторів, які впливають на вологозабезпеченість чорнозему звичайного на водозборі

Фактор, одиниці вимірювання		Рівні значень факторів		
		1	2	3
X_1	Сума опадів за вегетацію, мм	145	250	280
X_2	Коефіцієнт зволоженості ґрунту (квітень)	0,1	0,4	0,7
X_3	ГТК	0,2-0,6	0,7-1,1	1,2-1,6
X_4	Коефіцієнт нормованих опадів за холодний період	0,9	1,0	1,2
X_5	Вміст гумусу в шарі 0-20 см, % (з урахуванням X_6)	2,0-3,0	3,1-4,0	4,1-5,0
X_6	Коефіцієнт змитості ґрунту	1,00	1,08	1,22
X_7	Щільність будови ґрунту в шарі 0-20 см, г/см ³	0,94	1,10	1,30
X_8	Висота на профілі (висота над рівнем моря), м	112	138	154
X_9	Коефіцієнт захисної дії лісосмуг	2	20	300
X_{10}	Коефіцієнт агрофону (з урахуванням X_9)	1,00	1,18	1,36

Такий поділ — спосіб формалізації даних, згідно з правилами раціонального планування експерименту, дозволяє скоротити число спостережень з 625 до 54 на імовірнісному рівні.

З таблиці 3 витікає, що наприклад, ГТК, розрахований з багаторічних метеорологічних даних по Луганській області для території дослідного водозбору, може коливатися від 0,2 до 1,6. Значення ГТК саме з цього діапазону (а не ширше) можуть бути використані для моделювання вологозабезпеченості ґрунту за тим чи іншим сценарієм. Так само й для всіх інших факторів — діапазони значень, представлені в табл. 3, слід вважати придатними для коректного моделювання вологозабезпеченості чорнозему звичайного.

З даних таблиці 3 видно, що параметри факторів зволоженості ґрунту мають певний розкид. Це пояснюється тим, що процес вологонакопичення є результатом різної сукупної дії факторів за їх різних асоціацій.

З урахуванням цих обставин можна визначити частку впливу кожного відібраного чинника і побудувати математико-статистичну модель вологозабезпеченості за даними ряду факторів. Для вирішення поставленого завдання було застосовано метод парних зв'язків з послідовним виключенням значущих чинників — метод Брандона, апробований в економічних, географічних та ерозійних дослідженнях, який дозволяє привести початкові дані до "інших рівних умов".

Цей метод дозволяє уникнути найістотніших недоліків класичного регресійного аналізу, а саме — відмовитись від положення, що всі чинники незалежні. У природних умовах всі чинники різною мірою пов'язані між собою, тому ефект дії кожного з них важко визначити класичними методами математичного аналізу [22].

Суть методу. Передбачається, що функція Y може виражатися добутком деяких функцій, кожна з яких залежить тільки від одного чинника.

$$y = c \cdot f_1(x_1) \cdot f_2(x_2) \dots f_{10}(x_{10}),$$

де $y, x_1, x_2, \dots, x_{10}$ — параметри, згадані вище; c — постійний коефіцієнт.

Кожна з функцій $f(x)$ може бути як лінійною, так і нелінійною. Таким чином, потрібно знайти величину й аналітичний вираз усіх функцій $f(x)$. Черговість побудови парних зв'язків ($y = f(x)$) встановлювали в порядку спадання ступенів їх впливу. Ступінь впливу окремих чинників визначали зіставляючи їх графіки. Для цього спочатку будували графіки залежності y від усіх десяти чинників. На рисунку 1 представлено графіки парних функцій для шести факторів, обраних для першої моделі — для періоду посіву ярих культур у квітні. На кореляційному полі проводили емпіричні лінії регресу, які вирівнювали теоретичною лінією регресії. Рівні значущості факторів визначено в програмі MS Excel, як співвідношення показників ступенів розрахункових функцій кожного фактора.

1. Період сіви ранніх ярих культур (квітень). Комплексна емпірична модель коефіцієнта зволоженості ґрунту ($K_{зв.г.}$) у квітні (Рис. 2) виражається таким рівнянням регресії:

$$Y(K_{зв.г.}) = A \cdot X_{10}^{1,656} \cdot X_4^{-0,623} \cdot X_8^{0,551} \cdot X_7^{-0,499} \cdot X_5^{0,185} \cdot X_9^{-0,073},$$

де A — постійний коефіцієнт, який дорівнює 0,015.

Кореляційне відношення $\eta = 0,735$; критерій Стюдента $t_{розр} = 13,76$; ($t_{розр} > t_{табл}$); $\eta = 0,735 \pm 0,03$.

Для кожного з шести факторів у моделі 1 виявлено частку його впливу на вологозабезпеченість (%): X_{10} (агрофон) — 46,2; X_4 (нормовані опади) — 17,4; X_8 (висота на профілі) — 15,4; X_7 (щільність будови ґрунту) — 13,7; X_5 (вміст гумусу) — 5,2 %; X_9 (коефіцієнт захисної дії лісосмуг) — 2,1.

Аналіз особливостей просторового розподілу вологозапасів (коефіцієнт зволоженості ґрунту) у квітні представлено на рисунку 2.

Загалом на території водозбору за параметрами коефіцієнта зволоженості можна виділити 3 ділянки: (1) 0,42–0,50 (східна частина); (2) переважно 0,36–0,42 (середня частина в напрямку захід-схід); (3) переважно <0,36 (західна частина).

Коефіцієнт зволоженості ґрунту в даний період зумовлюється взаємодією досліджуваних факторів та потребує диференційованого підходу та системи заходів зі зберігання вологи в осінньо-зимово-весняний період.

Статистичні характеристики коефіцієнта зволоженості у квітні: коефіцієнт варіації 0,29, дисперсія 0,012, відхилення 0,11, розмах коливань — 0,03.

За наведеним методичним принципом проведено розрахунки моделей і за іншими періодами вегетації рослин.

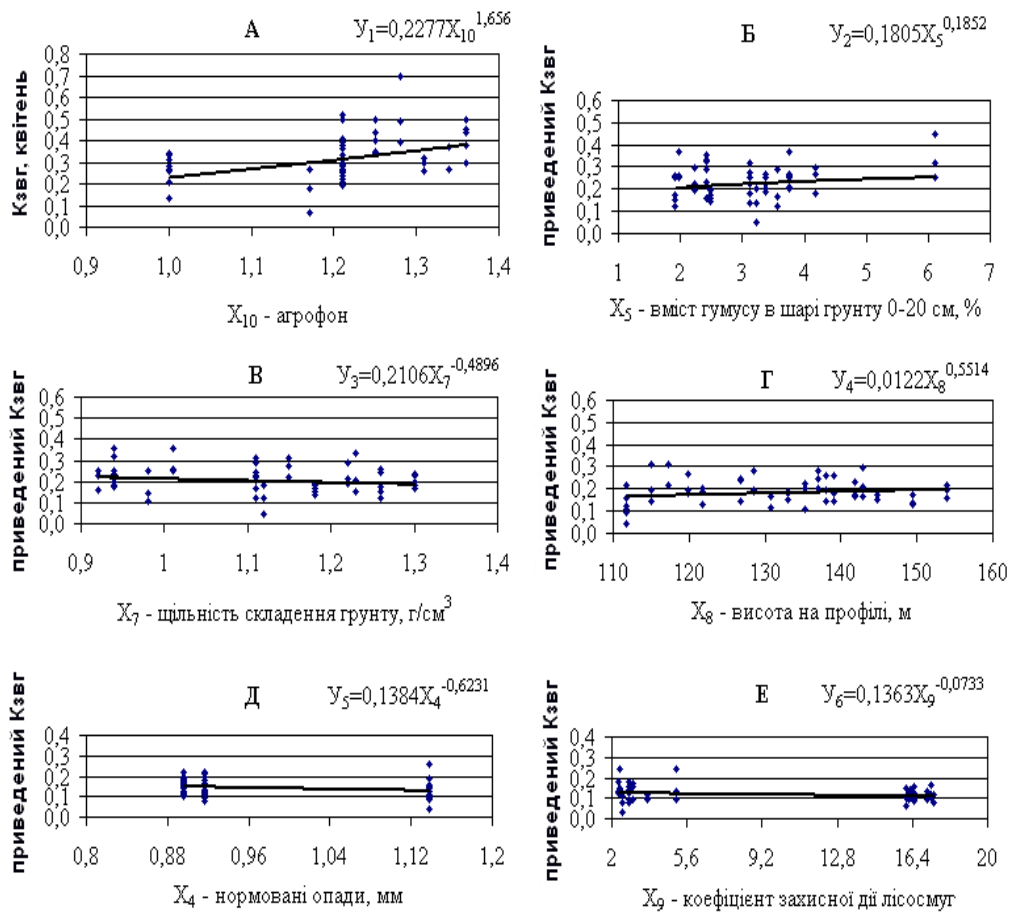


Рис. 1. Залежність коефіцієнта зволоженості ґрунту в шарі 0–100 см (квітень) від факторів X_{10} , X_5 , X_7 , X_8 , X_4 , X_9

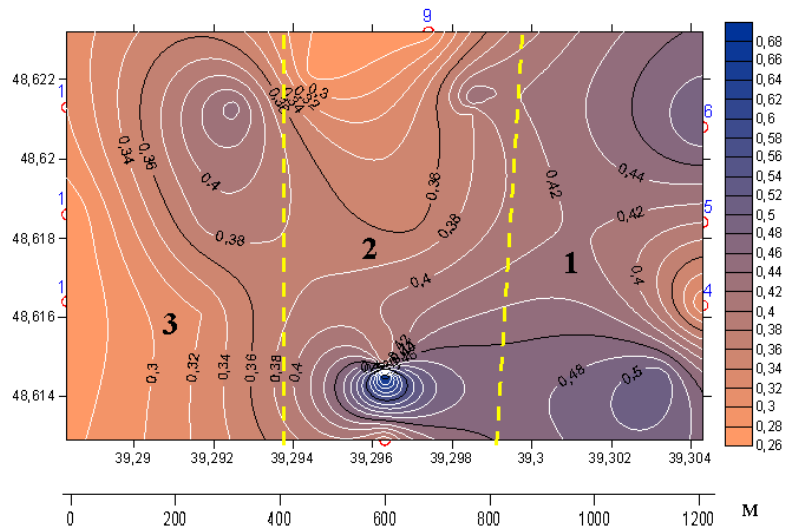


Рис. 2. 2Д діаграма коефіцієнта зволоженості ґрунту у квітні

II. Період формування врожаю (травень-червень). Для аналізу зволоженості ґрунту у цей і наступні фрагменти вегетаційного періоду було використано показники коефіцієнта дефіциту води в ґрунті.

Комплексна емпірична модель коефіцієнта дефіциту води в ґрунті ($K_{д.в.}$) в травні-червні (Рис. 3) виражається таким рівнянням регресії:

$$Y(K_{д.в.}) = A * X_{10}^{-0,3935} * X_7^{0,203} * X_3^{0,08} * X_6^{0,064} * X_2^{-0,024} * X_9^{-0,0007},$$

де A – постійний коефіцієнт, який дорівнює 1,092.

Кореляційне відношення $\eta = 0,784$; критерій Стюдента $t_{розр} = 17,98$; ($t_{розр} > t_{табл}$); $\eta = 0,784 \pm 0,03$.

У моделі II виявлено такі частки впливу факторів на вологозабезпеченість ґрунту (%): X_{10} (агрофон) — 51,3; X_7 (щільність будови ґрунту) — 26,5; X_3 (ГТК) — 10,4; X_6 (коефіцієнт змитості ґрунту) — 8,4; X_2 (коефіцієнт зволоженості ґрунту у квітні) — 3,1; X_9 (коефіцієнт захисної дії лісосмуг) — 0,3.

Аналіз особливостей просторового розподілу вологозапасів за коефіцієнтом дефіциту води в ґрунті у травні–червні представлено на рисунку 3.

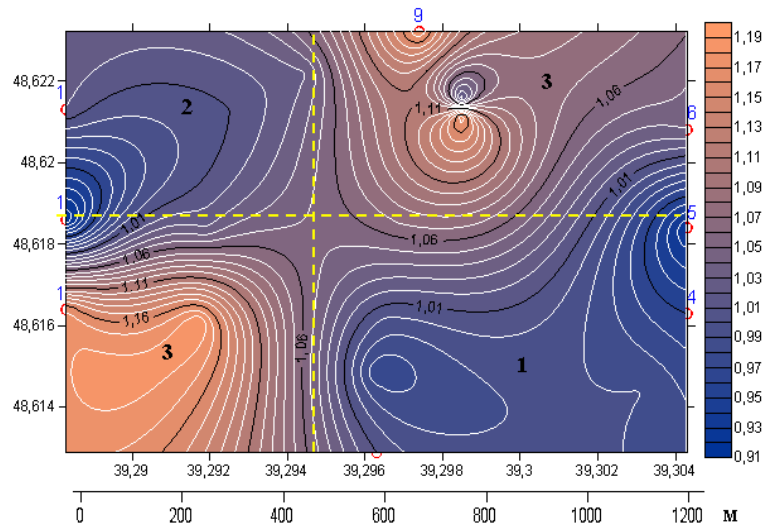


Рис. 3. 2Д діаграма коефіцієнта дефіциту води в ґрунті у травні–червні

Виходячи з параметрів моделі, зі збільшенням параметрів коефіцієнта агрофону (X_{10}), дефіцит води зменшується. Захисна дія лісових насаджень (X_9) на вологозабезпеченість у травні–червні також позитивно впливає при поперечному розташуванні лісосмуг. А негативний вплив коефіцієнта змитості (X_6) на зволоженість ґрунту проявляється через погіршення його водно-фізичних властивостей внаслідок ерозійних процесів.

Домінуючу роль агрофону та щільності ґрунту необхідно використовувати для підвищення вологозабезпеченості шляхом агротехніки з урахуванням неоднорідності коефіцієнта дефіциту води.

III. Період після збирання зернових культур (липень–серпень). Комплексна емпірична модель коефіцієнта дефіциту води в липні–серпні (Рис. 4) виражається таким рівнянням регресії:

$$Y(\text{Кд.в.}) = A \cdot X_6 0,198 \cdot X_7 0,132 \cdot X_3 -0,117 \cdot X_8 0,117 \cdot X_5 -0,039 \cdot X_9 0,001,$$

де A – постійний коефіцієнт, який дорівнює 0,563.

Кореляційне відношення $\eta = 0,723$; критерій Стюдента $t_{\text{розр}} = 18,0$; $t_{\text{розр}} > t_{\text{табл}}$; $\eta = 0,732 \pm 0,03$.

Виявлено такі частки впливу факторів (%): X_6 (коефіцієнт змитості) — 28,6; X_7 (щільність будови ґрунту) — 19,1; X_5 (вміст гумусу) — 17,0; X_3 (ГТК) — 17,0; X_8 (висота на профілі) — 16,9; X_9 (коефіцієнт захисної дії лісосмуг) — 1,4.

Ситуація, описана рівнянням і розподілом впливу факторів, вказує на необхідність, передусім, поліпшення властивостей ґрунту, збереження гумусу, зменшення щільності ґрунту та запобігання змиву поверхневого шару ґрунту.

Позитивний вплив фактора X_9 (коефіцієнт захисної дії лісосмуг) на вологозабезпеченість у липні–серпні підтверджується тільки за розташування лісосмуг поперек схилу. Для зменшення негативного впливу поздовжніх лісосмуг доцільно застосування комплексу ґрунтоохоронних заходів — зменшення ущільнення ґрунту сільськогосподарськими агрегатами, збільшення кількості заходів, спрямованих на посилення вологоутримувальної здатності ґрунту у прилеглий до лісосмуг зоні. Виявлені показники факторів вологозабезпеченості ґрунту є основою рекомендації щодо послідовної інтенсифікації вологонакопичувальних заходів на ділянках 1 → 2 → 3 (Рис. 4).

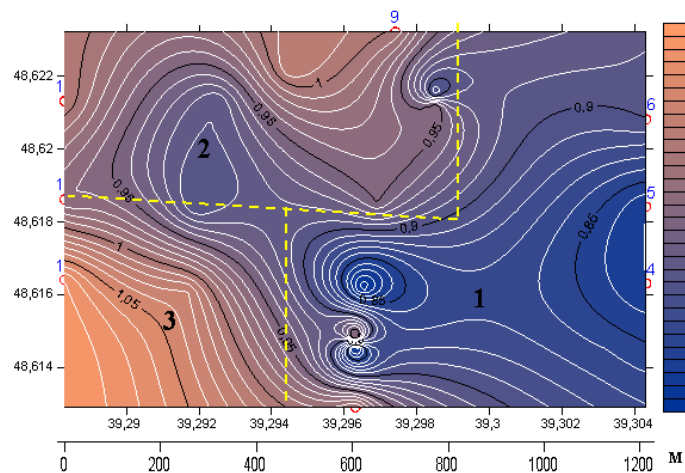


Рис. 4. 2Д діаграма коефіцієнта дефіциту води в ґрунті у липні-серпні

ІУ. Період сівби озимих (вересень-жовтень). Накопичення води в ґрунті перед сівбою озимих визначається природними умовами, а керувальним фактором цього процесу у післязбиральний період є способи обробки ґрунту залежно від його еродованості, що власне, відбувається у понятті агрофону.

Комплексна емпірична модель коефіцієнта дефіциту води в ґрунті у вересні-жовтні (Рис. 5) виражається таким рівнянням регресії:

$$Y(K_{д.в.}) = A \cdot X_{10}^{-0,887} \cdot X_3^{-0,107} \cdot X_9^{0,008},$$

де A — постійний коефіцієнт, який дорівнює 0,983.

Кореляційне відношення $\eta = 0,837$; критерій Стьюдента $t_{розр} = 35,1$; $t_{розр} > t_{табл}$; $\eta = 0,837 \pm 0,03$.

За результатами моделювання дефіциту води в ґрунті на водозборі агроландшафту у вересні-жовтні виявлено провідну роль впливу агрофону (X_{10}), частка якого становить 88,8 % та ГТК (X_3) у вересні й жовтні — 10,7 %. Частка впливу захисної дії лісосмуг (X_9) становить лише 0,5 %, де виявлено все ж більшу ефективність лісосмуг, розміщених поперек схилу.

На рисунку 5 представлено картосхему дефіциту води в ґрунті у вересні-жовтні, де умовно виділено три ділянки.

Підсумовуючи, за чотирма моделями, частку впливу кожного з природних і антропогенних факторів на вологозабезпеченість ґрунту в агроландшафті слід відмітити, що роль агрофону (X_{10}) в усіх моделях, крім моделі III для періоду липень-серпень, залишається провідною. При цьому роль природного фактору ГТК (X_3) коливається від повної відсутності впливу в період сівби ранніх ярих культур до 10,4 % — в період формування врожаю, 17 % — у післязбиральний період та 10,7 % — у період сівби озимих. Екстремальність цих періодів пом'якшується заходами з поліпшення властивостей ґрунту (щільність будови та вміст гумусу).

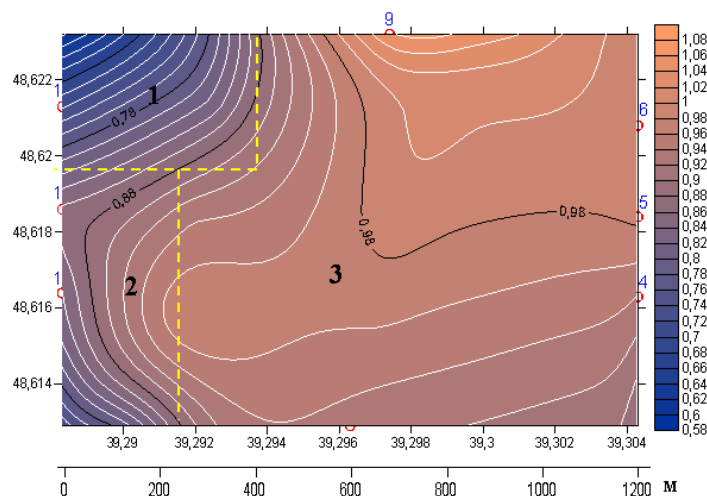


Рис. 5. 2Д діаграма коефіцієнта дефіциту води в ґрунті у вересні-жовтні

Зведені дані педотрансферного моделювання (прогнозу) вологозабезпеченості чорнозему звичайного — значення коефіцієнтів зволоженості та дефіциту води в ґрунті у межах дослідного агроландшафту у водозборі балки “Стукалово” басейну р. Сіверський Донець у Луганській області представлено в таблиці 4 разом із фактичними даними. Фактичні значення коефіцієнту зволоженості розраховано за формулою у таблиці 1, а коефіцієнту дефіциту води в ґрунті — за принципом, згаданим вище, — одиниця мінус $K_{зв.г.}$ (коефіцієнт зволоженості ґрунту) в різні періоди спостережень.

Таблиця 4

Діапазони фактичних та прогнозованих параметрів вологозабезпеченості чорнозему звичайного

Моделі вологозабезпеченості ґрунту	Статус значень	Рівні значень		
		1	2	3
Коефіцієнт зволоженості ґрунту (квітень)	фактичні	0,07-0,22	0,23-0,35	0,36-0,5
	прогнозовані	0,17-0,23	0,24-0,30	0,31-0,37
Коефіцієнт дефіциту води в ґрунті (травень-червень)	фактичні	0,92-1,04	1,05-1,17	1,18-1,33
	прогнозовані	0,99-1,08	1,09-1,18	1,19-1,28
Коефіцієнт дефіциту води в ґрунті (липень-серпень)	фактичні	0,83-1,00	1,01-1,15	1,16-1,34
	прогнозовані	1,01-1,07	1,08-1,14	1,15-1,28
Коефіцієнт дефіциту води в ґрунті (вересень-жовтень)	фактичні	0,71-0,88	0,89-1,16	1,17-1,23
	прогнозовані	0,77-0,91	0,92-1,16	1,17-1,23

Широкий діапазон параметрів зволоженості чорнозему звичайного (як фактичних, так і прогнозованих) в межах кожного періоду свідчить про просторову диференційованість як властивостей ґрунту, так і інших факторів, що є визначальними (керувальними) у процесі накопичення й утримання води. Отже, поділ території агроландшафту на умовні робочі ділянки (показаний на рисунках 2–5) дозволить так само диференційовано планувати і виконувати агротехнічні роботи, спрямовані на поліпшення умов накопичення води — підвищення протиерозійної здатності ґрунту, розпушування ґрунту, зменшення втрат атмосферної води зі стоком, підвищення ґрунтозахисного впливу лісосмуг у просторовій організації водозбору.

4. Висновки

Розроблено серію педотрансферних моделей для прогнозування вологозабезпеченості ґрунту у межах агроландшафту на схилі, еродованих землях (на території Луганської області) на різних етапах вегетаційного періоду сільськогосподарських культур. Моделі побудовано у вигляді рівняння регресії на визначення коефіцієнта дефіциту води в ґрунті або коефіцієнта зволоженості (для квітня).

Розроблено алгоритм послідовності операцій математико-статистичного аналізу для педотрансферного моделювання вологозабезпеченості ґрунту.

Обраний набір природних і антропогенних факторів, які впливають на вологозабезпеченість ґрунту, обґрунтовано шляхом аналізування їх просторової неоднорідності з побудовою 2-Д діаграм і систематизовано за допомогою кластерного аналізу. До переліку факторів включено такі: сума атмосферних опадів за вегетацію; коефіцієнт зволоженості ґрунту; ГТК; коефіцієнт нормованих атмосферних опадів за холодний період; вміст гумусу в шарі 0–20 см; коефіцієнт змитості ґрунту; щільність будови ґрунту у шарі 0–20 см; гіпсометричний рівень; коефіцієнт захисної дії лісосмуг; коефіцієнт агрофону.

Виявлено, що найбільш впливовим щодо прогнозування вологозабезпеченості ґрунту у будь-який період є фактор агрофону, частка впливу якого становить від 46 до 89 %. Натомість, частка впливу природного фактора зволоження — ГТК обмежується діапазоном 10–17 %.

Показано, що за результатами прогнозування дефіциту води в ґрунті територію агроландшафту можна умовно розділити на робочі ділянки для розробки диференційованої системи практичних агротехнічних заходів для корегування забезпеченості рослин продуктивною водою.

Список цитованих джерел

1. McBratney A.B., Minasny B., Cattle S.R. Vervoort R.W. From pedotransfer functions to soil inference systems. *Geoderma*. 2002, 109. P. 41–73.

2. Шеин Е.В., Архангельская Т.А. Педотрансферные функции: состояние, проблемы, перспективы. *Почвоведение*, 2006, № 10. С. 1205–1217.
3. Bouma J. Using soil survey data for quantitative land evaluation. *Advances in Soil Science*. 1989. № 9. P. 177–213.
4. Abdelbaki A.M. Assessing the best performing pedotransfer functions for predicting the soil-water characteristic curve according to soil texture classes and matric potentials. *Eur J Soil Sci*. 2021. 72:154–173. <https://doi.org/10.1111/ejss.12959>.
5. Mohajerani H., Teschemacher S., Casper M.C. A Comparative investigation of various pedotransfer functions and their impact on hydrological simulations. *Water*. 2021, 13, 1401. <https://doi.org/10.3390/w13101401>.
6. Espino A., Mallants D., Vanclooster M., Feyen J. Cautionary notes on the use of pedotransfer functions for estimating soil hydraulic properties. *Agricultural Water Management*. 1995. 29(3). 235–253. [https://doi.org/10.1016/0378-3774\(95\)01210-9](https://doi.org/10.1016/0378-3774(95)01210-9).
7. Gebauer A., Ellinger M., Gomez V.M.B., Leib M. Development of pedotransfer functions for water retention in tropical mountain soil landscapes: spotlight on parameter tuning in machine learning. *Soil*. 2020, 6. 215–229. <https://doi.org/10.5194/soil-6-215-2020>.
8. Patil N.G., Singh S.K. Pedotransfer functions for estimating soil hydraulic properties: a review. *Pedosphere*. 2016. 26. 417–430. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(15\)60054-6](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(15)60054-6).
9. Botula Y.D., Cornelis W.M., Baert G., Van Ranst E. Evaluation of pedotransfer functions for predicting water retention of soils in Lower Congo (D. R. Congo). *Agr. Water Manag.* 2012. 111, 1–10, <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.04.006>.
10. Moreira L.F.F., Righetto A.M., Medeiros V.M.D.A. Soil hydraulics properties estimation by using pedotransfer functions in a northeastern semiarid zone catchment, Brazil. In: International congress on environmental modelling and software, Osnabrück. 2004. 1529 p.
11. Morris P.J., Baird A.J., Eades P.A., Surridge B.W.J. Controls on near-surface hydraulic conductivity in a raised bog. *Water Resour. Res.* 2019. 1531–1543, <https://doi.org/10.1029/2018WR024566>.
12. Research on soil moisture prediction model based on deep learning / Y. Cai, W. Zheng, X. Zhang, [et al.]. *PLoS ONE*. 2019. 14(4): e0214508. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0214508>.
13. Медведєв В.В., Лактионова Т.Н., Донцова Л.В. Водные свойства почв Украины и влагообеспеченность сельскохозяйственных культур. Харьков: Апостроф, 2011. 224 с.
14. Laktionova T.M., Nakisko S.G. Particle size distribution as a basic characteristic for pedotransfer prediction of permanent wilting point. *Agricultural Science and Practice*. 2014. N 1. P. 13–19. <https://doi.org/10.15407/agrisp1.01.013>.
15. Медведєв В.В., Пліско І.В., Бігун О.М. Досвід педотрансферного моделювання в дослідженнях фізики ґрунтів. *Вісник аграрної науки*. 2015. № 1. С. 17–24.
16. База даних «Свойства почв Украины» (структура и порядок использования) / Т.Н. Лактионова, В.В. Медведєв, К.В. Савченко [и др.]. Харьков, 2012. 150 с.
17. Медведєв В.В., Пліско І.В. Бонитировка и качественная оценка пахотных земель Украины. Харьков, 2006. 385 с.
18. Черенков А.В. Урожайность. Когда засуха уже не случайность. *Зерно: всеукраинский журнал современного агропромышленника*. 2011. N 11. С. 38–45.
19. Соколов И.Д., Долгих Е.Д., Соколова Е.И. Изменение климата востока Украины и его прогнозирование. Оптимистическое руководство. Луганск: ИПЦ “Элтон-2”, 2010. 133 с.
20. Селянинов Г.Т. Методика сельскохозяйственной характеристики климата. Мировой агроклиматический справочник. Москва: Гидрометеиздат, 1937. С. 5–7.
21. Белоліпський В.А., Булыгин С.Ю. Еколого-гідрологічний аналіз ґрунтоводоохоронних агроландшафтів України. *Почвоведение*. 2009. №6. С. 733–743.
22. Белоліпський В.О., Полулях М.М. Система охорони від водної ерозії ґрунтів схилих територій степових агроландшафтів (науково-методичний посібник). За ред. В.О. Белоліпського. і Т.М. Лактионової. Харків, 2016. 169 с.
23. Белоліпський В.О., Полулях М.М. Оцінка функціонування агроландшафту за показниками вологозабезпеченості та параметри його оптимізації (методичні рекомендації). За ред. В.О. Белоліпського. Харків, 2015. 74 с.
24. Белоліпський В.А., Шелякин Н.М. Методические указания по определению потенциального стока с элементарных водосборов и проектирование почвоводоохранных мероприятий при контурно-мелиоративном земледелии. Луганск, 1990. 36 с.
25. Белоліпський В.А., Шелякин Н.М., Колесников Ю.И. Основные принципы системы почвоводоохранных мероприятий. *Земледелие*. 1990. №9. С. 22–25.

UDC 631.421:57.087

Method of pedotransfer modeling of soil moisture supply on sloping lands**Valery Belolipsky*, Tetiana Laktionova, Mykola Polulyakh****National Scientific Center “Institute for Soil Science and Agrochemistry Research named after O.N. Sokolovsky”,
Kharkiv, Ukraine*****E-mail: belolipskiy-42@ukr.net**

The purpose of the article is to describe a method for developing pedotransfer models for predicting soil moisture supply within an agricultural landscape on sloping, eroded lands (in Luhansk region) during different stages of the growing season of agricultural crops. The models are based on calculating the coefficient of moisture deficit in the soil or the coefficient of moisture content (for April) — predictors. The following factors were used as predictors in pedotransfer models: the amount of precipitation during the growing season; soil moisture coefficient in April; Hydrothermal coefficient; coefficient of normalized atmospheric precipitation for the cold period; humus content in the layer 0–20 cm; soil washout coefficient; the bulk density of

the soil in the layer 0-20 cm; height on the profile; coefficient of protective action of forest belts; coefficient of agrobackground. The initial information is a systematized set of data — hydrological characteristics of agricultural landscapes and soil properties, partially published by the authors earlier in the guidelines. The method of pedotransfer modeling of soil moisture supply on slope lands includes sequential mathematical and statistical analysis (using GIS technologies) according to the following thematic stages: (i) selection of factors affecting soil moisture supply as predictors of pedotransfer models; (ii) cluster analysis of the efficiency of soil moisture supply factors in the catchments of the agricultural landscape; (iii) development of pedotransfer models of soil moisture supply based on fragments of the growing season of crops by constructing regression equations and assessing the adequacy of the models by statistical criteria. The models are developed taking into account the phases (periods) of organogenesis of crops and the sequence of agrotechnical measures in the soil protection system of agriculture. It was found that among the studied factors, the most influential factor in predicting the soil moisture supply in any period is the agrophone factor, the share of which in different models ranges from 46 to 89 %. At the same time, the share of the influence of the natural factor of humidification — the Hydrothermal coefficient, is limited to the range of 10–17 %. It is shown that according to the results of predicting the moisture deficit in the soil, the territory of the agricultural landscape can be conditionally divided into working areas for the development of a differentiated system of practical agrotechnical measures to correct the supply of plants with productive moisture.

Keywords: agrolandscape; moisture supply; soil; moisture deficit coefficient; pedotransfer model; physical properties

Citing: Belolipsky, V. O., Laktionova, T. M., & Polulyakh, M. M. (2021). Method of pedotransfer modeling of soil moisture supply on sloping lands. *AgroChemistry and Soil Science*. 92, 4-16. [doi:10.31073/acss92-01](https://doi.org/10.31073/acss92-01) [in Ukrainian].

УДК 631.459(477.54): 631.41(477)

До питання ерозійної складової розрахунку балансу гумусу**А. М. Кутова*, О. В. Круглов, В. П. Коляда**Національний науковий центр "Інститут ґрунтознавства та агрохімії імені О.Н. Соколовського",
м. Харків, Україна

ІНФОРМАЦІЯ	АНОТАЦІЯ
Отримано 17.08.2021 Отримано після доопрацювання 24.11.2021 Затверджено до видання 10.12.2021 Доступно онлайн 20.12.2021	Метою статті є викладення результатів виявлення впливу водної та вітрової ерозії на щорічні втрати гумусу з орних ґрунтів України в зонах Полісся, Лісостепу та Степу на обласному територіальному рівні, що негативно впливають на його баланс. Відомо, що незворотні щорічні втрати ґрунту під впливом водної ерозії в середньому в зоні Полісся становлять 7,6, в зоні Лісостепу — 7,8, в зоні Степу — 3,3 т/га. Показано, що ерозійна складова в статті втрат гумусу наближається до 40 %, посилюючи від'ємну частину балансу. Для отримання найбільш коректної інформації щодо балансу гумусу в ґрунтах рекомендується диференційований підхід до балансових моделей. На обласному територіальному рівні для розрахунку прогнозних втрат гумусу в результаті ерозії використано значення середніх ухилів на орних землях адміністративної області, середні значення змиву ґрунту при конкретних ухилах та ґрунтово-кліматичні умови. Доведено, що розрахунок балансу гумусу під окремими сільськогосподарськими культурами, або за сівозміну має включати середні, по адміністративній області, втрати гумусу, зумовлені водною ерозією, які істотно відрізняються за областями в ґрунтово-кліматичних зонах України (від 154 до 1700 кг/га). За загальними втратами гумусу від водної ерозії виділено 3 групи територій: I — від 50 до 100 (Південний Степ), II — від 140 до 200 (Полісся, Лівобережний Лісостеп та Північний Степ), III — від 200 до 300 кг/га (Правобережний Лісостеп). В областях, де існує загроза дефляції, втрати гумусу, заподіяні вітровою ерозією, які у південній частині країни становлять від 293 до 1700 кг/га, суттєво впливають на гумусовий стан ґрунту і повинні також включатися у розрахунки балансу гумусу разом з даними щодо водної ерозії.

* E-mail: kutova.ang@gmail.com

Форма цитування: Кутова А.М., Круглов О.В., Коляда В.П. До питання ерозійної складової розрахунку балансу гумусу. Агрохімія і ґрунтознавство. Міжвід. тем. наук. збірник. 2021. Вип. 92. Харків: ННЦ "ІГА ім. О.Н. Соколовського". 2021. С. 17-23. <https://doi.org/10.31073/acss92-02>

1. Вступ

На сьогодні ступінь розораності сільськогосподарських угідь України, які займають 68,8 % території держави, наближається до 80 % та є однією з найвищих у світі. Високе антропогенне навантаження призводить до порушення балансу гумусу в ґрунті та визначає потребу розроблення сучасних агротехнологій його відтворення. Україна приєдналася до Конвенції ООН про боротьбу з опустелюванням, згідно з якою країна прийняла добровільне національне зобов'язання до 2030 року збільшити вміст гумусу в ґрунті як мінімум на 0,1 % [1]. Подальші заходи включають моніторинг запасів органічного вуглецю у ґрунтах, прогнозування їх динаміки та впровадження заходів на підтримку секвестрації, що вимагає удосконалення інформаційного забезпечення. Актуальним на сьогодні є вивчення і вибір розрахункових підходів для балансової оцінки запасів ґрунтового вуглецю (гумусу) як показника агроекологічної стабільності організації землекористування.

Високий рівень розораності сільськогосподарських угідь також зумовлює розвиток ерозійних процесів та їх суттєвий вплив на гумусовий стан ґрунтів. Ступені прояву таких процесів підлягають певним закономірностям просторової диференціації, що залежать від природно-кліматичних умов [2]. Для складання коректних розрахунків балансу гумусу є необхідним максимально точно їх визначення.

У використовуваних зараз моделях розрахунку балансу гумусу виділяють основні статті втрат (мінералізація гумусу під сільськогосподарськими культурами, втрати від ерозії) та надходження (гуміфікація післязбиральних решток і нетоварної частини урожаю, внесення органічних добрив). Питання врахування ерозійної складової витратної частини розрахунку балансу гумусу є наразі (як і останні тридцять років) дискусійним.

Так, у довіднику працівника агрохімслужби [3], на прикладі сівозміни на чорноземі типовому, показано щорічні втрати гумусу під впливом водної ерозії на рівні 250 кг/га, що еквівалентно змиву 4–4,5 т/га ґрунту. Більш пізні документи рекомендують ігнорувати цю проблему [4, 5], зводячи баланс гумусу до більш простої моделі «утворення гумусу – мінералізація». Згідно з методикою, запропонованою В.О. Грековим та колективом авторів [6], розмір мінералізації органічної речовини визначається на основі даних щодо вмісту

гумусу в ґрунті, глибини орного шару та щільності будови ґрунту, з урахуванням коефіцієнту мінералізації гумусу відносно типу ґрунту та групи культур. В окрему статтю у загальних втратах гумусу виділяється частка втрат через ерозію ґрунту, що у числовому вигляді виражається істотними значеннями з урахуванням крутості схилу за ґрунтово-кліматичними зонами України. Автори методики вважають що втрати гумусу від ерозії визначаються добутком маси змитого ґрунту та вмісту в ньому гумусу.

Нещодавні вітчизняні публікації також підтримують думку про відсутність втрат гумусу від ерозії. І якщо у роботі Центилю Л.В [7] описано результати польового дослідження на плакорній ділянці, де суттєві втрати ґрунту, дійсно, малоімовірні, якими справді можна знехтувати, то у роботі Хромяка В.М. із співавторами [8], мова йде про суттєвий розвиток на території Луганської області ерозійних процесів, однак у фінальному балансі гумусу витрат від ерозії не було відображено. Вплив ерозійних процесів також не враховується у деяких автоматизованих системах для розрахунку балансу гумусу та поживних речовин у ґрунті [9, 10]. Урахування впливу водної ерозії проводиться опосередковано, шляхом підвищення рекомендованих доз органічних добрив на ґрунтах різного ступеню змитості. Думка про можливість ігнорування ерозійної складової балансу гумусу для ґрунтів широких вододільних плато притаманна і деяким іноземним дослідникам [11].

Зовсім інші підходи до ролі ерозійних втрат у загальному балансі гумусу викладено у нещодавній роботі російських фахівців. В ґрунтах Курської області, з умістом гумусу 4,6 %, втрати гумусу від ерозії у період 2010-2017 рр. становили від 149 до 166 кг/га [12]. Це значно нижче запропонованих в роботі [3] даних для чорнозему типового, та відповідає змиву ґрунту 3,2–3,7 т/га.

Дослідники балансу органічної речовини ґрунту [13] та інші науковці [14–16], також підтримують ідею підрахунку втрат гумусу від ерозії. Серед втрат виділяються біохімічні (мінералізаційні) та фізичні (ерозійні, технологічні, міграційні). На свою підтримку вони приводять дані щорічних втрат гумусу від ерозії в Центральному Чорноземному районі, які становлять від 50 до 580 кг/га, з середнім значенням 116 кг/га, що еквівалентно втратам ґрунту на рівні 3,5-4,5 т/га.

За будь-яких обставин ерозія та відкладення ґрунту вважаються суттєвим чинником перерозподілу умісту гумусу на території, хоча, на думку авторів, існуючі математичні моделі слабо враховують можливість перевідкладення ґрунтової речовини на робочій ділянці [17]. Так в Естонії саме ерозійна складова називається причиною зниження умісту гумусу в ґрунті [18]. Відомі дослідження [19], результати яких вказують не тільки на втрату гумусу зі змитим ґрунтом, але й унаслідок прискорення процесу його мінералізації на еродованих та перевідкладених ділянках. Дослідженнями українських фахівців встановлено, що втрати гумусу сягають 500-600 кг на рік [20], за середнього вмісту гумусу в ґрунті 3,16 % [21], що еквівалентно втратам ґрунту на рівні 15,8–19,0 т/га на рік.

Таким чином, принципове питання полягає саме в коректності застосування значень втрат ґрунту, а отже, і гумусу в розрахунок його балансу. Проблема полягає саме у відсутності загальноновизнаних аналітичних даних про прямі вимірювання втрат ґрунту від ерозії, більшість авторів схильні їх дещо перебільшувати. Часто у вигляді довідкових даних подаються результати математичного моделювання, що, внаслідок застосування різних моделей розрахунку втрат ґрунту, важко рекомендувати для реальної роботи з визначення їх кількості. Наприклад використання даних змиву ґрунту 10 % забезпеченості [20], є лише орієнтиром для визначення максимально можливого навантаження на протиерозійні об'єкти.

Метою досліджень було встановити ступінь впливу водної та вітрової ерозії на щорічні втрати гумусу з орних ґрунтів України в зонах Полісся, Лісостепу та Степу на обласному територіальному рівні та дати рекомендації щодо їх включення до розрахунку балансу гумусу.

2. Об'єкти і методи досліджень

Об'єктом досліджень була ерозійна складова розрахунку балансу гумусу. Цей показник стосувався ґрунтового покриття у розрізі адміністративних областей та природно-кліматичних зон України.

В основу проведених досліджень було покладено розрахунковий метод. Геоінформаційне забезпечення проведених розрахунків складалось з усереднених даних про кути нахилу орних земель у кожній з адміністративних областей та прогнозних втрат ґрунту залежно від цього.

Дані щодо вмісту гумусу в ґрунті було отримано з матеріалів періодичної доповіді «Про стан ґрунтів на землях сільськогосподарського призначення України» станом на

2017 рік [21]. За основу еродованості ріллі було взято офіційні дані Державного науково-технологічного центру охорони родючості ґрунтів щодо еродованості сільськогосподарських угідь України [6]. Методологію оцінювання, критерії і методичні підходи використано ті, що викладені в монографічній роботі [22].

Візуалізацію результатів дослідження проведено в середовищі *Quantum GIS*.

Для переведення даних для окремих найбільш дефляційно небезпечних районів у значення втрат ґрунту для Донецької, Запорізької та Херсонської областей вираховували через відповідні коефіцієнти — відсоткове відношення площ цих районів до площ кожної з указаних областей, після чого отриманні значення переводили у втрати гумусу.

3. Результати досліджень та їх обговорення

Розрахункова основа впливу ерозії на втрати гумусу з ґрунту повинна включати як вміст гумусу в ґрунтах на території досліджень так і комплекс характеристик, що визначають розвиток ерозійних процесів з урахуванням інших важливих складових, зокрема, впливу агротехнічних заходів. Протиерозійне облаштування територій базується на досягненні норми допустимого змиву, що становить 1,2–1,3 т/га щорічно, в таких господарствах втрати гумусу від ерозії становлять 30–80 кг/га, залежно від вмісту гумусу в ґрунті.

За останні два десятиліття відбулись суттєві зміни структури посівних площ сільськогосподарських культур, спричинені новими господарськими умовами та потеплінням клімату. Передусім мова йде про розширення (дуже помітного у поліських областях) посівних площ соняшнику та кукурудзи на зерно — просапних культур, вирощування яких зумовлює посилення піддатливості ґрунту до ерозії. Суттєве скорочення площ під багаторічними травами спричиняє певні зміни у розрахункових значеннях (- 2–4 %) коефіцієнту захисного впливу рослинного покриву. Врахування цього параметру (на зразок фактора *C* рівняння USLE) на територіальному рівні «країна–регіон» є необов'язковим. Суттєвої значущості він набуває на територіальному рівні «район–господарство», з огляду на особливості спеціалізації галузі землеробства та розвитку тваринництва. За основу рекомендуються значення, запропоновані у роботі Ф. Моргуна зі співавторами [23].

Щодо основного показника — втрат ґрунту, однозначної думки немає, запропонована низкою дослідників цифра 15 т/га (500 млн т) щорічного змиву, є, на наш погляд, дещо завищеною. Можна стверджувати про відсутність прямих визначень для всієї території. Одним із способів вирішення проблеми є непрямі розрахунки, що базуються на експертних оцінках інтенсивності ерозійних процесів та геоморфологічних показниках території.

Географічно за модель просторового розподілу інтенсивності ерозійних процесів було прийнято класифікацію, запропоновану П.С. Пастернаком та М.М. Приходько [24]. Згідно з нею виділяються три типи умов інтенсивності перебігу ерозії: I — слабка (Полісько-Дніпровський, Мало-Подільський, Південно-Степовий райони) площею близько 19 млн га; II — середня (Придеснянський, Лівобережно-Лісостеповий, Північно-Степовий, Мелітопольський, Дніпровсько-Причорноморський, Придунайський, Подільський, Подільсько-Буковинський, Південно-Волинський райони) — 16 млн га; III — висока (Донецький, Центральньо-Придніпровський, Придністровський, Карпатський, Кримський райони) — 25,2 млн га. Подібні класифікації дають добру уяву про розподіл еродованих площ, однак не містять цифрових еквівалентів сучасного змиву.

Основою для нашого розрахунку стали дані щорічних втрат ґрунту на схилі землях, розміщені науковцями Державного науково-технологічного центру охорони родючості ґрунтів [6]. З даних К.Л. Холуп'яка [25] було отримано інформацію про кути нахилу орних земель, з якої було розраховано середнє арифметичне значення кутів нахилу. За допомогою його інтерполяції на дані про щорічний розрахунковий змив було отримано значення прогнозного змиву ґрунту для областей України. Добуток значення змиву та вмісту гумусу у ґрунтах адміністративних областей [21] дозволив визначити (прогнозувати) його втрати через водну ерозію (Табл. 1), які необхідно враховувати в балансовій моделі регіонального рівня.

Втрати ґрунту в результаті дії водної ерозії залежать від вмісту ґрунтового органічного вуглецю, гранулометричного складу та водопроникності ґрунту. Відносна стійкість ґрунтів до ерозії (фактор *K*), яку запропоновано визначати як відношення різних фракцій гранулометричного складу ґрунту варіює від 1,0 (чорнозем типовий) до 1,8 (сірий лісовий ґрунт). Еродованість залежить від топографії (крутість схилу та його довжина *LS*) та фактора ведення землеробства (*C*), який змінюється від 0,01 (люцерна 2 року

використання) до 1,00 (без посіву, або чистий пар) [26]. У польових сівозмінах С становить 0,55–0,75, у ґрунтозахисних — 0,25–0,35, середнє по Україні — 0,62 [27].

Таблиця 1

Щорічні втрати ґрунту та гумусу від водної ерозії в ґрунтово-кліматичних зонах України (прогноз)

Область	Середній ухил, градуси	Прогнозний змив, т/га	Уміст гумусу, %	Розрахункові втрати гумусу, кг/га
<i>Полісся</i>				
Волинська	1,26	7,2	1,56	112,3
Житомирська	1,02	7,3	2,01	146,7
Закарпатська	2,44	9,0	2,56	230,4
Івано-Франківська	1,64	7,8	3,28	255,8
Львівська	2,04	8,0	2,67	213,6
Рівненська	1,03	7,0	2,27	158,9
Чернігівська	0,99	7,0	2,41	168,7
<i>Лісостеп</i>				
Вінницька	1,79	9,4	2,70	253,8
Київська	1,21	7,8	2,98	232,4
Полтавська	1,12	7,5	3,18	238,5
Сумська	1,26	7,8	3,50	273,0
Тернопільська	3,57	10,0	3,13	313,0
Харківська	1,57	3,8	4,10	155,8
Хмельницька	2,16	8,3	2,96	245,7
Черкаська	1,50	8,6	3,06	263,2
Чернівецька	2,80	7,3	2,60	189,8
<i>Степ</i>				
Луганська	1,80	4,2	3,91	164,2
Дніпропетровська	1,64	3,7	3,77	139,5
Донецька	1,63	3,7	3,80	140,6
Запорізька	1,19	2,8	3,40	95,2
Кіровоградська	1,41	3,5	4,11	143,8
Миколаївська	1,23	2,9	3,24	93,9
Одеська	1,81	4,1	3,77	154,6
Херсонська	0,92	2,4	2,45	58,8
АР Крим	0,97	2,4	3,77	90,4

Таким чином незворотні щорічні втрати ґрунту під впливом водної ерозії (Табл.1) в середньому в зоні Полісся становлять 7,6, в зоні Лісостепу — 7,8, в зоні Степу — 3,3 т/га. Втрати гумусу, що залежать від його вмісту в ґрунтах регіонів, підвищуються в центральній та північній частинах України.

На рисунку 1 викладено картосхему просторового розподілу балансу гумусу, створену нами за даними [21] та з додаванням (після rischi) розрахованих прогнозних втрат гумусу під впливом водної ерозії (Табл. 1). Аналізуючи значення втрат гумусу можна побачити що вони розділяються на 3 групи: I — втрати гумусу від 50 до 100, II — від 140 до 200 і III — від 200 до 300 кг/га. До першої групи припадає територія Південного Степу, другу групу складає територія Полісся, Лівобережного Лісостепу та Північного Степу, максимум значень спостерігається в Правобережному Лісостепу України.

Слід відзначити, що розраховані втрати гумусу від водної ерозії в Харківській та Луганській областях добре кореспондуються з географічно близькими даними російських дослідників у Курській області [12]. Значення змиву ґрунту по Харківщині близькі до розрахованих нами раніше в результаті математичного моделювання у господарствах області [28, 29]. Середні значення втрат гумусу по країні близькі до запропонованих у довіднику [3]. Очевидно, що ерозійна складова в статті втрат гумусу наближається до 40 %, збільшуючи від'ємну частину балансу.

Аналізуючи просторовий розподіл значень балансу гумусу та втрат гумусу внаслідок водної ерозії для південних областей (Донецька, Запорізька, Херсонська) можна помітити суттєву різницю між ними. Очевидно, що для цього регіону є характерним значний вплив вітрової ерозії, що є причиною виносу частинок ґрунту за межі робочих ділянок. Дефляція спостерігається на значній частині території України.

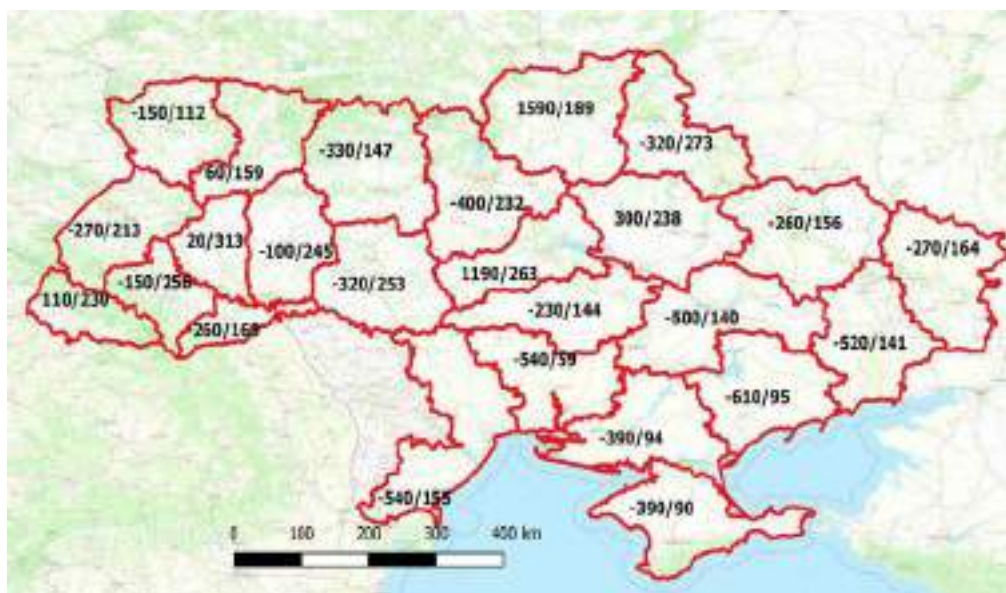


Рис.1. Просторовий розподіл балансу гумусу (кг/га) за даними [21] (перед ризикою) та розраховані втрати гумусу внаслідок водної ерозії (після ризику)

Дефляційно небезпечні райони України — це ті, в яких періодично спостерігаються пилові бурі та щорічно — локальні процеси вітрової ерозії, переважно зосереджені у південно-східній частині країни. У фізико-географічному розумінні ці території причетні до Приазовської височинної та Приазовської низовинної областей, Західноприазовської схилово-височинної області, Присивашсько-Приазовської низовинної області та Нижньодніпровської терасово-дельтової низовинної областей.

Втрати ґрунту та гумусу в результаті дії вітрової ерозії в Лівобережній частині України за існуючої системи лісосмуг у Донецькій, Запорізькій та Херсонській областях наведено в таблиці 2. В таблиці також представлено розрахунки із обробкою усереднених значень кількісних втрат ґрунту в межах найбільш ерозійно небезпечних колишніх адміністративних Приазовського та Більмацького районів Запорізької області, Каховського району Херсонської та Великоновосілківського, Володарського та Новоазовського районів Донецької області [30].

Таблиця 2

Щорічні втрати ґрунту та гумусу від вітрової ерозії в Лівобережній частині півдня України

Область	Втрати ґрунту в середньому за пилову бурю 20-процентної забезпеченості (за даними Г. Можейко та ін. [30]), т/га	Втрати ґрунту в результаті вітрової ерозії за існуючої системи лісосмуг, т/га	Уміст гумусу, %	Втрати гумусу, кг/га
Донецька	6,22	7,7	3,80	292,6
Запорізька	30,18	50,0	3,40	1700,0
Херсонська	12,04	35,0	2,45	857,5

Досліджено, що незворотні втрати ґрунту в результаті вітрової ерозії за існуючої системи лісосмуг найбільші в Запорізькій області, найменші — в Донецькій. Відповідно втрати гумусу під впливом вітрової ерозії збільшуються від 293 кг/га (Донецька область) до 1700 кг/га (Запорізька область). Автори вважають, що отримані значення втрат гумусу через вітрову ерозію ґрунту повинні застосовуватись у розрахунках балансу гумусу, разом з даними щодо водної ерозії.

4. Висновки

Для отримання найбільш коректної інформації щодо балансу гумусу в ґрунтах рекомендується диференційований підхід до балансових моделей залежно від масштабу (господарство, регіон, країна). На обласному територіальному рівні для розрахунку

прогнозних втрат гумусу в результаті ерозії використано значення середніх ухилів на орних землях адміністративної області, значення змиву ґрунту при конкретних ухилах та ґрунтово-кліматичні умови.

Розраховуючи баланс гумусу у ґрунтах на обласному територіальному рівні автори рекомендують залучати дані про середні прогнозні втрати гумусу під впливом водної та вітрової ерозії, які суттєво диференціюються залежно від регіону (ґрунтово-кліматичних умов).

Щорічні незворотні втрати ґрунту під впливом ерозійних процесів є істотним фактором від'ємного балансу гумусу. Поряд із втратами у результаті дії водної ерозії автори рекомендують враховувати і втрати від дефляції у тих областях, де вона фіксується.

Список використаних джерел

1. Конвенція ООН про боротьбу з опустелюванням у тих країнах, що потерпають від серйозної посухи та/або опустелювання. <https://knowledge.unccd.int/home/country-information/countries-having-set-voluntary-ldn-targets/ukraine>.
2. Statistical analysis of the sustainable agricultural lands use and fertile irreversible loss of soil which are washing from versants of rural area / Cojocaru O., Cerbari V., Filipov F. [et al.]. *Scientific Papers. Series A. Agronomy*. 2018. Vol. LXI. № 2. P. 22–27. URL: <http://localhost:8080/xmlui/handle/123456789/2413/>
3. Довідник працівника агрохімслужби. За ред. Б.С. Носка. Київ: Урожай, 1991. 263 с.
4. Охорона ґрунтів і відтворення їх родючості. Навчальний посібник / Забалуєв В.О., Балаєв А.Д., Тараріко О.Г., Тихоненко Д.Г. / за ред. В.О. Забалуєва та В.В. Дегтярьова. 2017. Харків: Стиліздат. 348 с.
5. Розрахунок балансу гумусу і поживних речовин у землеробстві України на різних рівнях управління / С.А. Балюк, В.О. Греков, М.В. Лісовий, А.В. Комариста. Харків: Міська друкарня, 2011. 30 с.
6. Методичні вказівки з охорони ґрунтів / В.О. Греков, Л.В. Дацько, В.А. Жилкін, М.І. Майстренко. Київ, 2011. 108 с.
7. Центило Л.В. Параметри вмісту гумусу в чорноземі типовому залежно від агровиробничого використання. *Наукові доповіді НУБіП України*. 2019. № 2 (78). URL: <http://dx.doi.org/10.31548/dopovid2019.02.017>.
8. Баланс гумусу й поживних речовин у ґрунтах Луганської області та шляхи подолання дефіциту / В.М. Хромяк, В.В. Наливайко, С.П. Будков [та ін.]. *Агрохімія і ґрунтознавство*. 2019. № 88. С. 101–105. <https://doi.org/10.31073/acss88-14>.
9. Автоматизація розрахунків балансу гумусу та поживних речовин в ґрунті / Н.Б. Пасько, А.В. Толбатов, О.Б. В'юненко [та ін.]. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. 2017. № 4 (60). С. 109–118.
10. Ткаченко В.В., Третьяков И.И., Боярко С.А. Информационная подсистема планирования и расчета дозирования органических удобрений. *Научный журнал КубГАУ*. 2012. № 80. С. 1–16.
11. Литвин Л.Ф. География эрозии почв сельскохозяйственных земель России. Москва: Академкнига, 2002. 255 с.
12. Свиридов В.И. Формирование бездефицитного баланса почвенного гумуса как необходимое условие совершенствования севооборотов в лесостепной зоне европейской части Российской Федерации. *Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии*. 2020. №5. С. 6–12. URL: <https://www.kgsha.ru/upload/iblock/038/038ac060087f7e8f56091b3ede89964.pdf>
13. Танасиенко А.А., Путилин А.Ф., Артамонова В.С. Экологические аспекты эрозийных процессов. Новосибирск, 1999. 89 с.
14. Семенов В.М., Когут Б.М. Почвенное органическое вещество. Москва: ГЕОС. 2015. 233 с.
15. Иванов В.Д., Кузнецова Е.В. Эрозия и охрана почв Центрального Черноземья России. Воронеж: ВГАУ. 2003. 360 с.
16. Schroth G., Vanlauwe B., Lemann J. Organic matter. Trees, crop and soil fertility. CAB International. 2003. P 77–91.
17. Viaud V., Angers D.A., Walter C. Toward Landscape-Scale Modeling of Soil Organic Matter Dynamics in Agroecosystems. *Soil Science Society of America Journal*. 2010. № 74. P. 1847–1860. <https://doi.org/10.2136/sssaj2009.0412>.
18. Erosion affected soils in the Estonian landscape: Humus status, patterns and classification / R. Kotildelli, O. Ellermae, K. Kauer, T. Koster. *Archives of Agronomy and Soil Science*. 2010. № 56:2. P. 149–164. <https://doi.org/10.1080/03650340903005624>.
19. Soil carbon 4 per mille / B. Minasny, B.P. Malone, A.B. Bratney [et al.]. *Geoderma*. 2017. Vol. 292. P. 59–86. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.01.002>.
20. Булигін С.Ю., Барвінський А.В., Ачасова А.О. Оцінка і прогноз якості земель. Харків: Харківський національний аграрний університет, 2006. 262 с.
21. Яцук І.П., Романова С.А., Адаменко Т.І. Про стан ґрунтів на землях сільськогосподарського призначення України / За ред. І.П. Яцука. Київ. 2017. 119 с.
22. Булыгин С.Ю., Неаринг М.А. Формирование экологически сбалансированных агроландшафтов: проблемы эрозии. Харьков: Эней, 1999. 272 с.
23. Моргунов Ф.Т., Шикун Н.К., Тараріко А.Г. Почвозащитное земледелие. Киев: Урожай, 1983. 240 с.
24. Довідник з агролісомеліорації. За ред. П.С. Пастернака. Київ: Урожай, 1988. 288 с.
25. Холупяк К.Л. Эродированные почвы и противоэрозионные мероприятия в Украинской ССР. Харьков, 1970. 362 с.
26. Wischmeier W.H., Smith D.D. Predicting rainfall erosion losses; a guide to conservation planning (Agriculture Handbook, 537). Washington: Department of Agriculture, 1978. 58 p.
27. Куценко М.В., Тімченко Д.О. Теоретичні основи організації системи охорони ґрунтів від ерозії в Україні: Монографія. Харків: КП "Міська друкарня". 2016. 240 с.

28. Захист ґрунтів від ерозії на рівні окремих землекористувань в сучасних умовах / О. Круглов, В. Коляда, П. Назарок [та ін.]. *Вісник аграрної науки*. 2018. № 10. С. 66–74. <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk201810-10>.

29. Протиерозійна оптимізація території аграрних господарств на прикладі Харківської області, Україна / О. Круглов, В. Коляда, А. Ачасова [та ін.]. *Вісник ХНУ імені В.Н. Каразіна. Серія «Екологія»*. 2019. Вип. 20. С. 134–142. <https://doi.org/10.26565/1992-4259-2019-20-13>.

30. Прогноз возможных потерь почвы от ветровой эрозии в степной зоне Украины. Методические указания. / Г.А. Можейко, В.М. Москаленко, С.Ю. Булыгин [и др.]. Харьков: РА «Перспектив», 1993. 84 с.

UDC 631.459(477.54): 631.41(477)

To the issue of the erosion component of calculating the balance of humus

Angela Kutova*, Olexander Kruglov, Valerii Koliada

National Scientific Center "Institute for Soil Science and Agrochemistry Research named after O.N. Sokolovsky",
Kharkiv, Ukraine

*E-mail: kutova.ang@gmail.com

The purpose of the article is to present the results of identifying the influence of water and wind erosion on the annual loss of humus from arable soils of Ukraine in the zones of Polissia, Forest-Steppe and Steppe at the regional territorial level, which negatively affect its balance. It is known that the irreversible annual soil loss under the influence of water erosion on average in the Polissia zone is 7.6, in the Forest-Steppe zone – 7.8, in the Steppe zone – 3.3 t / ha. It is shown that the erosion component in the part of humus losses approaches 40 %, strengthening the negative part of the balance. To obtain the most correct information on the humus balance in soils, a differentiated approach to balance models is recommended. At the regional territorial level, to calculate the predicted losses of humus because of erosion, the value of the average slopes on the arable lands of the administrative region, the average values of soil washout at specific slopes and soil and climatic conditions were used. It is proved that the calculation of the humus balance under individual agricultural crops, or in the crop rotation should include the average, in the administrative region, humus losses caused by water erosion, which differ significantly by regions in the soil and climatic zones of Ukraine (from 154 to 1700 kg/ha). According to the total losses of humus from water erosion, 3 groups of territories were identified: I – from 50 to 100 (South Steppe), II – from 140 to 200 (Polissia, Left-Bank Forest-Steppe and Northern Steppe), III – from 200 to 300 kg/ha (Right-Bank Forest-Steppe). In areas where there is a threat of deflation, the loss of humus caused by wind erosion, which in the southern part of the country ranges from 293 to 1700 kg/ha, significantly affects the humus state of the soil and should be included in the calculations of the humus balance along with the data on water erosion.

Keywords: humus balance; water erosion; wind erosion; soil washout; loss of humus.

Citing: Kutova, A. M., Kruglov, O. V. & Koliada, V. P. (2021). To the question of the erosion component of calculating the balance of humus.. *AgroChemistry and Soil Science*. 92, 17-23. [doi:10.31073/acss92-02](https://doi.org/10.31073/acss92-02) [in Ukrainian].

СТАЛЕ УПРАВЛІННЯ І МОНІТОРИНГ SUSTANABLE MANAGEMENT AND MONITORING

УДК 631.1: 631.4

Моніторинг і збереження ґрунтів як компонент системи сталого управління агроєкосистемами локального рівня

Ю. М. Дмитрук¹, В. Г. Семенчук²¹ Чернівецький національний університет ім. Ю. Федьковича² Буковинська державна сільськогосподарська дослідна станція Інституту сільського господарства Карпатського регіону НААН, Чернівці, Україна

ІНФОРМАЦІЯ	АНОТАЦІЯ
Отримано 15.11.2021 Отримано після доопрацювання 25.11.2021 Затверджено до видання 10.12.2021 Доступно онлайн 20.12.2021	Мета статті — оцінити перспективи локальних (регіональних) агроєкосистем у контексті сучасної політики поліпшення якості земель і ґрунтів. Застосовано аналіз (індукція та дедукція) керівних і нормативних документів та актуальних публікацій за означеною тематикою в тому числі до європейського простору та оцінку можливостей українського агропродовства реалізувати найближчим часом систему сталого управління ґрунтами від локального рівня. Драйверами управління ґрунтами агроєкосистем, які визначають порядок денний для всіх землекористувачів і землевласників є: 1) глобальні процеси та геополітичне значення агропродовства; 2) характеристики ґрунтів як природного об'єкта — їхня незамінність та невідновлюваність, як і біосферна функціональність ґрунтів 3) національні особливості — відсутність реального моніторингу, прогалини у законодавстві та недотримання існуючих положень і актів, ринок земель. Отож, існує необхідність чіткого законодавчого забезпечення охорони та збереження ґрунтів, а також упровадження агротехнологій, які забезпечуватимуть нейтральний рівень деградації і секвестрацію вуглецю ґрунтами. В умовах невизначеності функціонування реального моніторингу ґрунтів на державному рівні, перспективною є організація його проведення, як локальної мережі, тобто створення компонентної системи управління ґрунтами конкретним землекористувачем. Вважаємо, що дослідні станції у структурі НААН повинні підтримувати/створювати власну базу даних, на основі якої можливо ефективно забезпечувати стаке управління ґрунтами: оцінювати їхній реальний стан на поточний момент та екосистемні послуги від ґрунтів, прогнозувати динаміку показників ґрунту, моделювати різні варіанти їхніх змін тощо. Витрати на таку локальну ГІС компенсуються здобутками, у т.ч. й прибутком від діяльності на роки вперед. Зважаючи на підвищену увагу до запасів органічного вуглецю ґрунтів (введення вуглецевих податків, обмеження щодо викидів парникових газів), гостро необхідними є оцінювання та прогнози щодо процесів емісії-секвестрації вуглецю та відповідних можливостей ґрунтів за конкретного виду землекористування.
Ключові слова: ґрунт; землі; землекористування; родючість; моніторинг ґрунтів; деградація	

* E-mail: y.dmytruk@chnu.edu.ua

Форма цитування: Дмитрук Ю.М., Семенчук В.Г. Моніторинг і збереження ґрунтів як компонент системи сталого управління агроєкосистемами локального рівня. Агрохімія і ґрунтознавство. Міжвід. тем. наук. збірник. 2021. Вип. 92. Харків: ННЦ "ІГА ім. О.Н. Соколовського". С. 24-31. <https://doi.org/10.31073/acss92-03>

1. Вступ

Україна, як і інші країни-члени ООН, приєдналася до глобального процесу забезпечення цілей сталого розвитку (ЦСР). У процесі адаптації ЦСР з урахуванням особливостей держави розпорядженням КМУ № 686-р було запропоновано національну систему ЦСР з відповідними індикаторами¹. Моніторинг останніх засвідчив, що є від'ємна динаміка і низька ймовірність досягнення таких п'яти цілей: 9 – інновації та інфраструктура; 10 – зменшення нерівності; 13 – боротьба зі зміною клімату; 14 – збереження морських екосистем; 15 – збереження екосистем суші². До того ж, ціль 2 – подолання голоду та розвиток сільського господарства характеризується позитивною динамікою, але потребує певного прискорення. Серед завдань цієї цілі виокремимо завдання 2.3. «Забезпечити створення стійких систем виробництва продуктів харчування, що сприяють збереженню

¹ Розпорядження КМУ «Питання збору даних для моніторингу реалізації цілей сталого розвитку». URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/686-2019-%D1%80#Text> // Order of the Cabinet Ministers of Ukraine "Issues of data collection to monitoring the implementation of sustainable development goals."

² Державна служба статистики України. URL: <http://www.ukrstat.gov.ua/> (дата звертання 05.11.2021)
State Statistics Service of Ukraine. URL: <http://www.ukrstat.gov.ua/> (access date 05.11.2021)

екосистем і поступово покращують якість земель та ґрунтів, в першу чергу за рахунок використання інноваційних технологій». Рослинництво як галузь сільського господарства та одночасно особливий вид землекористування безпосередньо і залежить, і впливає на цілі 13 та 15. Саме в останній, у завданні 15.3. «Відновити деградовані землі та ґрунти з використанням інноваційних технологій», у підрозділі 15.3.1. «Встановлення та реалізація добровільного національного завдання щодо досягнення нейтрального рівня деградації земель» національним індикатором визначено: «Підтримання вмісту органічної речовини (гумусу) у ґрунтах» (вміст органічного вуглецю (гумусу) у ґрунтах сільськогосподарських угідь, %). Для Лісостепу станом на 2020 рік вміст гумусу, який свідчить про відсутність деградації ґрунтів становить 3,21 %. Визначено і частку ріллі щодо загальної площі держави – це 51,6 %; площі земель під органічним виробництвом – 500 тис. га; площі сіножатей і пасовищ – 8389,3 тис. га, а їхня частка в загальній території країни – 13,9 % (всі орієнтири станом на 2020 рік).

Стратегія сучасного землекористування передбачає припинення деградаційних процесів, які не тільки зменшують родючість ґрунтів, але й унеможливають їхнє функціонування та надання екосистемних послуг. Перелік визначальних напрямів у стратегії моніторингу ґрунтів запропонував В.В. Медведєв [1]:

- а) бездефіцитний баланс гумусу;
- б) збагачення ґрунтів на елементи живлення;
- в) захист ґрунтів від ерозії;
- г) меліорація кислих і солонцевих ґрунтів;
- д) реконструкція зрошувальних систем;
- е) заходи з запобігання техногенній деградації ґрунтів.

Отже, перед землекористувачами постає необхідність поліпшення якості земель та ґрунтів, відновлення деградованих земель і ґрунтів та досягнення нейтрального рівня деградації земель [2]. Необхідність моніторингу постає, виходячи з аналізу й оцінки сучасного стану земель України: дефіцитний баланс поживних речовин; низький і середній рівень ефективної родючості (реалізується близько половини чи третини потенціалу урожайності); домінування деградаційних процесів (втрата гумусу і структурності, еродованість, підкислення, переущільнення та інші); низька культура землеробства і технологій; недостатня захищеність полів від несприятливих явищ природно-антропогенного характеру [3].

На думку науковців ННЦ «Інститут ґрунтознавства та агрохімії імені О.Н. Соколовського» [4], основними напрямками досягнення нейтрального рівня деградації мають бути:

- стабілізація ґрунтового органічного вуглецю;
- зменшення ерозії ґрунтів;
- подолання агрофізичної деградації ґрунтів;
- запобігання збідненню ґрунтів на поживні елементи;
- запобігання та мінімізація засолення, осолонцювання і підкислення ґрунтів;
- регулювання водного режиму в зонах недостатнього або надлишкового зволоження;
- запобігання забрудненню ґрунтів;
- інші — регіонального або локального значення (підтоплення, зсуви, карст тощо).

Зважаючи на істотні проблеми у веденні моніторингу ґрунтів, фермерське господарство чи інший локального рівня землекористувач, як, наприклад, дослідні станції НААН України, часто не володіє інформацією про реальний стан ґрунтів на землях, де він здійснює свою діяльність, відповідно до актуального стану ґрунтів — про сучасні технології збереження ґрунтів та, зрештою, про можливості щодо формування власної ГІС. Тому першочерговими діями може і повинен бути моніторинг нейтрального рівня деградації земель сільськогосподарського призначення, актуальність якого беззаперечна. В результаті такого моніторингу буде:

- а) встановлено реальний статус земель сільськогосподарського призначення;
- б) ідентифіковано проблеми, які блокують ефективне господарювання та вирішення задач глобального контексту, вказані в цілях сталого розвитку;
- в) розроблено заходи з адаптації до змін клімату;
- г) виявлено дійсну готовність до викликів, які постають у секторах, пов'язаних із використанням земель сільськогосподарського призначення.

Мета цієї статті — оцінити перспективи організації моніторингу в системі управління локальними (регіональними) агроекосистемами у контексті сучасної політики поліпшення якості земель і ґрунтів та їх охорони. Моніторинг неможливий без визначених індикаторів ґрунтів, які повинні бути чітко регламентовані законодавством. Ця стаття передуює апробації польових і лабораторних досліджень у програмі 09.01.01.06.П «Оцінка потенціалу секвестрації карбону ґрунтами агроекосистем в умовах змін клімату для досягнення

нульового рівня деградації та стійкого управління ґрунтовими ресурсами» (№ держреєстрації 0121U107455).

2. Матеріали та методи

Проведено аналіз (індукція та дедукція) керівних документів і актуальних публікацій за означеною тематикою, в тому числі, щодо європейського простору (в політиці ЄС ґрунти однозначно визнано необхідним компонентом, без якого неможлива реалізація Європейського Зеленого курсу) та оцінку можливостей українського агровиробництва реалізувати найближчим часом систему сталого управління ґрунтами на локальному рівні.

3. Огляд і аналіз провідних публікацій і документів

3.1. Проблеми моніторингу ґрунтів в Україні

В умовах відсутності реального моніторингу ґрунтів у його розумінні як такого (моніторинг ґрунтів — це просторово-часова система спостережень за властивостями ґрунтів з метою своєчасного виявлення, усунення і прогнозування їхніх негативних змін [1]. За визначенням В.В. Медведєва існують три види моніторингу: фоновий (еталонний), виробничий і науковий та додається два спеціальних види — відомчий і кризовий. В Україні склалася ситуація, коли держава не володіє інформацією про дійсний стан ґрунтів, що апріорі унеможлиблює:

а) управлінські заходи (планування, прогноз), включно з політичними рішеннями та забезпеченням міжнародних угод;

б) реальну оцінку ґрунтів в умовах ринку земель та справедливе оподаткування землекористувачів;

в) вирішення завдань за цілями сталого розвитку, а тому неможливість запобігти кризовим явищам, що впливають на національну безпеку. Результати першого й останнього широкомасштабного обстеження ґрунтів на землях с.-г. призначення України (1957–1961 рр.) вже тривалий час потребують оновлення [3, 5]. Отож, нагальною необхідною є інформація про стан земель, тренди їхніх змін (прогностичні моделі), рекомендації управлінцям різного рівня щодо негайних дій та пропозиції алгоритму цих дій для землекористувачів аграрної сфери для уникнення деградаційних явищ за збереження традиційного землеробства в сучасних умовах.

Тривале землекористування на землях с.-г. призначення та застосовувані агротехнології (традиційне землеробство) на тлі змін клімату призвели до погіршення якості ґрунту, втрати ним родючості та здатності забезпечувати інші екосистемні послуги, як біосферного об'єкта. Вказані процеси відбуваються за відсутності діяльного моніторингу стану ґрунтів, інформація про який найповніше зібрана в результаті агрохімічної паспортизації. Без реального моніторингу, неможливо об'єктивно оцінити тренди змін показників ґрунтів, а тому й не забезпечується стаке управління ґрунтовими ресурсами агроєкосистем, що становить безпосередню загрозу національній безпеці. Агрохімічна паспортизація проведена у кращому випадку для близько половини земель с.-г. призначення, але на сьогодні її масштаби зменшуються через необов'язковість паспортизації. До того ж, обстеження не завжди були повторними (кожні 5 років на тій самій території), а тому оцінка часової динаміки показників родючості залишається проблемною. Проблемою залишається і відсутність конкретних механізмів практичного впровадження більшості положень чинних ґрунтоохоронних законів [6]. Ці ж автори визначали відсутність індикаторів і нормативів оцінки деградованості ґрунтів під час агрохімічної паспортизації, як і недосконалість системи індикаторів для оцінювання стану родючості ґрунтів та недосконалість загальнонаціональної системи моніторингу родючості ґрунтів.

Необхідним, а не лише доцільним, є використання сучасних можливостей дистанційного зондування, дані якого є у вільному доступі [7]. Звісно, дані не будуть інформативними, поки їх не опрацювати з використанням відповідних програмних продуктів. Та й інші, вказані вище, показники якості ґрунтів потребують часової, а не лише просторової оцінки. Бо тільки оцінка динаміки властивостей ґрунтів може дати відповідь на питання ефективності управління ґрунтами; змін агротехнологій за виявлення деградації ґрунтів; оцінки та прогнозу для різних сценаріїв розвитку. Крім власне впливу антропогенної діяльності, корективи треба вносити і з урахуванням природних процесів, найперше — кліматичних змін.

3.2. Європейський досвід

Перелічені вище дії (моніторинг, бази даних, рекомендації та прогнози для управлінців) вже понад десятиріччя відпрацьовані, але постійно продовжують вдосконалюватися в країнах ЄС. Така система в цілому узагальнена визначенням «Стале управління ґрунтами» (Soil sustainable management). Звернімо увагу — управління ґрунтами, а не землями. В останніх (землях) часто втрачається сенс цієї політики, а саме: функціональність ґрунтів, що є властивістю ґрунтів, а не земель, та екосистемні послуги, які надаються ґрунтами (не землями).

Стратегії сталого розвитку передбачають досягнення балансу між економічним зростанням та охороною довкілля. В цьому контексті, збереження продуктивності земель є надважливою метою, особливо в нестійких, в екологічному розумінні, районах. Однією з найсерйозніших проблем, що загрожують таким районам, є деградація земель, яка визначена як зниження біологічної та економічної продуктивності або, що еквівалентно, як зменшення спроможності ґрунту надавати екосистемні послуги та забезпечити його функції [8]. Деградація земель відбувається внаслідок поєднання дії природних чинників з впливом діяльності людини та змінами клімату. Як основний компонент наземних екосистем, ґрунт відіграє вирішальну роль у зменшенні чи посиленні деградації земель. Поєднана дія клімату (засухи, екстремальні події, ерозійні можливості опадів) і антропогенного тиску (промисловість, агровиробництво, транспорт, зміни типів землекористування, туризм та інше) може призвести до деградації ґрунту та, в деяких випадках, до безповоротної втрати земель, придатних для сільськогосподарського (лісгосподарського) використання.

За даними Європейської комісії [9], шість процесів деградації ґрунтів (водна і вітрова ерозія, втрата органічного карбону та елементів живлення, ущільнення, засолення та осолонцювання, забруднення і зниження біорізноманіття) були визначені як наслідок проблем з управлінням агротехнологіями та неоптимальними сільськогосподарськими практиками (обробіток, монокультура, внесення засобів захисту рослин і добрив тощо).

Нагадаємо, що ґрунти — невідновлюваний ресурс, і для запобігання їх деградації (втрати) необхідна, перш за все, стабільна система моніторингу. Кількість показників моніторингу може бути різною, залежно від цілей, які визначено конкретним виробництвом. Проте мінімальний набір даних повинен передбачати: вміст органічного карбону, кислотність, щільність ґрунту, вміст елементів живлення (азот, фосфор, калій), гранулометричний склад (вміст фракцій фізичної глини та мулу); важливими є відомості про вміст мікроелементів, ємність обмінних катіонів, електропровідність і вологоємність ґрунту [9]. Підвищеної уваги потребують біологічні властивості (мікро-, мезо- та макрофауна, дихання ґрунту, ферментативна активність тощо) та власне біорізноманіття, які вважаються системними індикаторами здоров'я ґрунту, а тому передовий досвід у ґрунтознавстві демонструє саме цю дефініцію з відповідним спрямуванням.

Для підтримки необхідного рівня здоров'я ґрунту в країнах ЄС намічені вельми амбітні цілі, зокрема: до 2030 року скоротити використання пестицидів на 50 %; зменшити на 50 % надлишкове внесення елементів живлення, а на 20 % — добрив; органічне виробництво повинно займати не менше 25 % площ земель с.-г. призначення; розширити площі земель природоохоронного призначення до 30 %, зупинити деградацію земель. Європейський досвід (різномірнева політика сприяння збереженню ґрунтів закріплена в «Зеленому курсі» (Green Deal), основа якого — це низьковуглецева економіка, тематичній стратегії захисту ґрунтів (Soil Thematic Strategy), новій європейській ґрунтовій Стратегії «Здорові ґрунти для здорового життя» (Healthy soil for Healthy life) разом із інноваційними рішеннями в організації агровиробництва) свідчить про реальність зупинки деградації ґрунтів, забезпечення їх дієвого моніторингу, створення відповідних баз даних для моделювання і прогнозування — тобто управління сталим розвитком ґрунтів [8-11]. Європейський Зелений курс має на меті зробити Європу кліматично нейтральною до 2050 року. Для цього запропоновано європейський закон про клімат, який також встановлює нову ціль щодо скорочення чистих викидів парникових газів (щонайменше — 55 % до 2030 року, порівняно з 1990 роком). Зелений курс Європи передбачає системні дії в усіх секторах економіки та за браком можливостей ми зупинимось тільки на землекористуванні та агровиробництві, для яких загальна ціль — це секвестрація вуглецю природними поглиначами в еквіваленті 310 мільйонам тонн викидів CO₂ до 2030 року. До 2035 року ЄС прагне досягти кліматичної нейтральності в секторах землекористування, лісового господарства та сільського господарства, включаючи також викиди від використання добрив і тваринництва. В планах Комісії відновлення європейських лісів, ґрунтів, водноболотних угідь та торфовищ, що збільшить поглинання CO₂ і зробить довкілля стійкішим до зміни клімату. Серед пріоритетів Європейського Зеленого курсу захист біорізноманіття та екосистем, зменшення забруднення повітря, води та ґрунту, рух до циклічної (безвідходної)

економіки, раціонального поводження з відходами. Альтернативи такому управлінню не існує, а зволікання з прийняттям рішень тільки поглиблює деструктивні процеси.

3.3. Законодавство щодо оцінки ґрунтів

Законом «Про охорону земель» визначено і порядок проведення моніторингу ґрунтів на землях сільськогосподарського призначення, який включає: агрохімічне обстеження ґрунтів; контроль змін стану якості ґрунтів; агрохімічну паспортизацію земельних ділянок (агрохімічна паспортизація орних земель здійснюється через кожні 5 років, сіножатей, пасовищ і багаторічних насаджень — через кожні 5-10 років)³. Передбачено, але жодного разу не проводилося і суцільне ґрунтове обстеження (згідно з законом воно має проводитися через кожні 20 років). Законом «Про державний контроль використання та охорони земель» передбачено забезпечення спостереження за зміною параметрів якості ґрунтів у результаті проведення господарської діяльності на землях сільськогосподарського призначення; проведення моніторингу родючості ґрунтів та агрохімічної паспортизації земель сільськогосподарського призначення; забезпечення формування національного, регіонального та місцевих інформаційних банків даних про стан ґрунтів земель сільськогосподарського призначення⁴.

Статтею 165 Земельного Кодексу України у галузі охорони земель та відтворення родючості ґрунтів встановлено нормативи таких показників: а) оптимального співвідношення земельних угідь (визначено постановою КМУ №164 від 11.02.2010); б) стану якості ґрунтів; в) гранично допустимого забруднення ґрунтів; г) показників деградації земель та ґрунтів [12]. Інші (крім пункту а) нормативи не розроблені та не закріплені законодавчими актами, а тому оцінювання стану ґрунтів і ступеня їх деградованості залишається проблемою.

З 2016 року в Україні введено в дію національний стандарт ДСТУ 7846:2015. «Оцінювання зміни родючості ґрунтів: порядок проведення робіт»⁵. Відповідно стандарту зміну родючості ґрунтів оцінюють порівнянням початкових параметрів родючості ґрунту з поточними, одержаними за результатами моніторингу (регулярно та повсюдно не проводиться) та агрохімічної паспортизації (не обов'язкова, а тому кошти зазвичай не виділяються) поля, земельної ділянки. Інформаційною базою для такого оцінювання є матеріали великомасштабного обстеження ґрунтів 1957–1961 років і їх корегування (повсюдного охоплення не було), агрохімічного чи технічного паспорта поля (крім загальної інформації містять грошову оцінку та дані про природний і господарський стан земельної ділянки), паспорта ґрунтів, результати стаціонарних польових дослідів, матеріали детального агрохімічного, еколого-токсикологічного, радіологічного обстеження ґрунтів, проекти землеустрою, документи на право власності, тематичні кадастрові карти та атласи стану земель тощо⁶. Насправді, в більшості випадків таких матеріалів не достатньо, або вони застарілі, до того ж, в обстеженнях, які проводилися в 50–80-х роках, часто застосовувалася інша методика, ніж використовується за затвердженими стандартами в наш час.

Реальним документом, у більшості випадків, є агрохімічний паспорт поля (затверджений наказом Мінагрополітики та продовольства України № 536 від 11.10.2011 р.) або земельної ділянки, який використовується у розрахунку нормативів гранично-допустимого забруднення ґрунтів, якості ґрунтів, показників деградації земель та ґрунтів, оптимального співвідношення культур у сівозмінах у різних природно-сільськогосподарських регіонах, які встановлюються для досягнення високих і стабільних урожаїв та запобігання виснаженню і втраті родючості ґрунтів унаслідок ґрунтовтоми, а також в інших випадках, передбачених законодавством⁷.

³ Закон «Про охорону земель». URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/962-15#Text>. Law "On Land Protection". URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/962-15#Text>

⁴ Закон «Про державний контроль за використанням та охороною земель». URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/963-15#Text>. Law "On state control for the use and protection of land". URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/963-15#Text>

⁵ ДСТУ 7846:2015. Оцінювання зміни родючості ґрунтів: порядок проведення робіт. [Чинний від 01.07.2016]. Київ. 2016. ДСТУ 7846: 2015. Estimation of changes in soil fertility: the order of works. [Effective from 01.07.2016]. Kyiv. 2016

⁶ ДСТУ 4288:2004. Якість ґрунту. Паспорт ґрунтів. [Чинний від 2005-07-01]. Держспоживстандарт України. Київ. 2004. 12с. DSTU 4288: 2004. Soil quality. Soil passport. [Effective from 2005-07-01]. Derzhspozhyvstandart of Ukraine. Kyiv. 2004. 12p.

⁷ Наказ Міністерства аграрної політики та продовольства «Про затвердження Порядку ведення агрохімічного паспорта поля, земельної ділянки». URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1517-11#Text>. Order of the Ministry of Agrarian Policy and Food "On approval of the Procedure for maintaining the agrochemical passport of the field, land". URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1517-11#Text>.

3.4. Показники оцінювання стану ґрунтів

Запровадження моніторингу ґрунтів потребує одночасного визначення переліку індикаторів моніторингу — показників якості ґрунтів, які необхідно контролювати. До вже вказаних вище індикаторів для земель сільськогосподарського призначення серед обов'язкових пропонуються гранулометричний склад, потужність гумусового шару, вміст гумусу, вміст рухомих форм фосфору і калію, а також рН; а до регіональних індикаторів — крутість схилу, еродованість, засоленість, солонцюватість, переущільнення, перезволоження, техногенне забруднення [3,13]. Звернемо увагу на перехід від власне індикаторів в обов'язковій програмі до процесів у регіональній програмі. Автори виділяють показники спеціального переліку, які наводяться в ДСТУ 4362, ДСТУ 7243 (ДСТУ 7243:2011. «Якість ґрунту. Землі техногенно забруднені. Обстеження та використання») та в інших нормативних документах. До основних видів деградації⁷, які повинні контролюватися віднесено такі: ерозія, дефляція, дегуміфікація, декальцинація, виснаження на елементи живлення, забруднення, зміна рН, оглеєння, засолення та вторинне осолонцювання, переущільнення та інші види фізичної деградації, мікробіологічна, біохімічна або інші види біологічної деградації.

Отож, ДСТУ 7846:2015 на підготовчому етапі передбачає аналіз та узагальнення наявної, а виявлення змін родючості ґрунтів здійснюють шляхом порівняння початкових і поточних значень показників родючості (з використанням ДСТУ 4362:2004. «Якість ґрунту. Показники родючості ґрунтів», в якому також наведені еталонні значення цих показників ґрунтів та оптимальні їх параметри за Зонами і типами ґрунтів)⁸. Оцінювання змін родючості ґрунтів проводять окремо для кожного ґрунтового виділу з урахуванням виду с.-г. угідь або агропромислових груп ґрунтів (у відсотках). Ступінь деградованості ґрунтів визначатиметься за іншим ДСТУ, який на момент впровадження ДСТУ 4362:2004 ще не затверджено.

Упустимо розрахунковий та завершальний етапи ДСТУ 7846:2015, зосередившись на переліку показників родючості (ДСТУ 4362:2004) та можливостей організації їх моніторингу на локальному рівні (фермерські господарства, дослідні станції в системі НААН). Отож, показники родючості ґрунтів включають (пункт 5.1 ДСТУ 4362:2004):

а) загальні показники: 1) потужність гумусованого шару ґрунту; 2) потужність профілю для схилових ґрунтів; 3) гранулометричний склад;

б) агрофізичні показники: 1) щільність ґрунту; 2) агрегатний склад; 3) найменша вологоємність; 4) запаси продуктивної вологи;

в) агрохімічні показники: 1) вміст гумусу; 2) вміст поживних речовин; 3) вміст мікроелементів;

г) фізико-хімічні властивості: 1) реакція ґрунтового розчину; 2) склад увібраних катіонів;

д) показники забруднення ґрунтів важкими металами, залишками пестицидів і радіонуклідами;

ж) ступінь засолення ґрунтів за катіонно-аніонним складом водної витяжки (для солонцевих, засолених і зрошуваних земель);

з) ступінь солонцюватості ґрунтів за вмістом обмінного натрію та калію (для солонцевих і зрошуваних земель).

Детальний перелік вказаних показників родючості ґрунтів наводиться в п. 5.2 стандарту:

класифікаційна належність ґрунту (повна назва ґрунту за національною класифікацією – тип, підтип, рід, вид, різновидність, розряд);

глибина гумусованого шару, см; глибина орного шару, см;

гранулометричний склад, %; щільність ґрунту, г/см³; агрегатний склад ґрунту (в орному шарі); найменша вологоємність, %; максимальна гігроскопічна вологість, %; вологість стійкого в'янення, %; запаси продуктивної вологи, мм;

обмінна кислотність; рН сольової витяжки; гідролітична кислотність, сума обмінних основ, обмінний кальцій і магній, обмінний натрій — всі в мг-екв/100 г; органічна речовина, %;

азот (загальний вміст), %; фосфор (валовий вміст), %; калій (валовий вміст), %; вміст рухомих поживних речовин і мікроелементів (мінеральний азот, мг/кг (нітратний, амонійний), фосфор, калій, цинк, марганець, мідь, кобальт, бор, молібден);

важкі метали (рухомі форми, мг/кг): кадмій, свинець, ртуть; залишки пестицидів (ДДТ і його метаболіти, гексахлоран (сума ізомерів) 2,4 Д-амінна сіль); щільність забрудненості, Кі/км²: цезій-137 стронцій-90.

⁸ ДСТУ 4362:2004. Якість ґрунту. Показники родючості ґрунтів. [Чинний від 01.01.2006]. Київ. 2004. 33 с. DSTU 4362: 2004. Soil quality. Indicators of soil fertility. [Effective from 01.01.2006]. Kyiv. 2004. 33 p

В підсумку всіх є 39 показників, а у випадку, для солонцевих, засолених чи зрошуваних ґрунтів ще додатково 8 показників сольового складу водної витяжки. Істотною проблемою залишається відсутність у такому переліку біологічних параметрів ґрунтів, визначення яких не проводиться в жодній із вказаних програм (можливо, за винятком окремих наукових обстежень). Не до кінця узгоджено методику визначення біологічних властивостей, яка є досить складною і в контексті оцінювання динаміки як просторової, так і часової.

Очевидно, що контролювати таку кількість показників на локальному рівні (фермерство) надто складно, як і для державних дослідних станцій. Насправді, кількість показників родючості ґрунтів потрібно і можна зменшити, попередньо провівши аналіз ймовірних для даної території процесів деградації. Наприклад, якщо поле (земельна ділянка) розміщена на вирівняній формі рельєфу, то контроль процесів водної ерозії не обов'язковий. До поки відбудеться законодавче закріплення та узгодження індикаторів моніторингу, а також можливі процедури гармонізації методів і законодавства з такими у країнах ЄС вважаємо, що директивними для оцінювання, незалежно від території та виду виробництва, є такі показники: вміст органічного вуглецю та його водорозчинної і лабільної форм; реакція ґрунтового розчину; вміст елементів живлення в рухомих формах (азот, фосфор, калій); щільність будови і гранулометричний склад ґрунтів.

Охоплення моніторингом 100 % площ земель сільськогосподарського призначення — це тільки необхідний перший крок на шляху до сучасного моніторингу та охорони ґрунтів, як незамінного ресурсу. Не менш важливою є й оцінка екосистемних послуг, які надаються ґрунтами.

4. Заключення

Драйверами управління ґрунтами агроєкосистем, які визначають порядок денний для всіх землекористувачів і землевласників є: 1) глобальні процеси та геополітичне значення агровиробництва; 2) характеристики ґрунтів як природного об'єкта — їхня незамінність та невідновлюваність, як і біосферна функціональність ґрунтів; 3) національні особливості — відсутність реального моніторингу, прогалини у законодавстві та недотримання чинних положень і актів, ринок земель [6]. Отож, існує необхідність чіткого законодавчого забезпечення охорони та збереження ґрунтів, а також упровадження агротехнологій, які забезпечуватимуть нейтральний рівень деградації з особливою увагою до секвестрації вуглецю ґрунтами.

В умовах невизначеності функціонування моніторингу ґрунтів на державному рівні, перспективною є організація його проведення на локальному рівні, як компонентою системи управління конкретного землекористувача. Нагадаємо, що в законі «Про державний контроль за використанням та охороною земель» передбачено забезпечення формування і місцевих інформаційних банків даних про стан ґрунтів земель сільськогосподарського призначення⁴. Дослідні станції в структурі НААН повинні підтримувати/створювати власну базу даних, на основі якої можливо ефективно забезпечувати стаке управління ґрунтами: оцінювати реальний їхній стан на поточний момент та екосистемні послуги від ґрунтів, прогнозувати динаміку показників ґрунту, моделювати різні варіанти їх змін тощо. Витрати на таку локальну ГІС компенсуються здобутками, в т. ч. й прибутком від діяльності на роки вперед. Зважаючи на підвищену увагу до запасів органічного вуглецю ґрунтів (введення вуглецевих податків, обмеження щодо викидів парникових газів), гостро необхідними є оцінювання та прогнози щодо процесів емісії-секвестрації вуглецю та відповідних можливостей ґрунтів за конкретного виду землекористування (агротехнології, сорти рослин, урожайність тощо). Ґрунтознавці готові розробити методику збору даних і ведення локальної ГІС з урахуванням специфіки виду агровиробництва.

Список використаних джерел

1. Медведев В.В. Моніторинг ґрунтів України. (С. 419–423). Харків: Міськдрук. 2012.
2. Montanarella L., Panagos P. The relevance of sustainable soil management within the European Green Deal. *Land Use Policy*. Volume 100, January 2021, 104950. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104950>
3. Стратегія збалансованого використання, відтворення і управління ґрунтовими ресурсами України / За ред. С.А. Балюка і В.В. Медведева. Київ. *Аграрна наука*. 2012. С. 167–172.
4. Концепція досягнення нейтрального рівня деградації земель (ґрунтів) в Україні. / За ред. С.А. Балюка, В.В. Медведева, М.М. Мірошніченка. Харків: ФОП Бровін, 2018. 32 с.
5. Iatsuk I., Dmytruk Y., Cherlinka V., Dent D. Status and problems of normative monetary valuation of land in Ukraine. In: *Soils Under Stress: More Work for Soil Science in Ukraine* / Editor Y. Dmytruk, D. Dent. Cham: Springer International Publishing. 2021. P. 17–26. https://doi.org/10.1007/978-3-030-68394-8_2

6. SWOT-аналіз системи охорони ґрунтів і нормативно-правове забезпечення регулювання відтворення родючості / Балюк С. А., Мірошніченко М. М., Кучер А.В. [та ін.], // За ред. С.А. Балюка та А.В. Кучера. Харків: ФОП Бровін, 2018. 44 с.
7. Черлінка В.Р., Дмитрук Ю.М. Методи верифікації предикативних ґрунтових карт // *Науковий вісник НУБІП. Серія «Біологія, біотехнологія, екологія»*. 2018. Вип. 287. С. 159–172.
8. Healthy soils – new EU Soil strategy. URL: https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/have-your-say/initiatives/12634-Healthy-soils-new-EU-soil-strategy_en (дата звертання 05.11.2021)
9. EU Soil Observatory (EUSO) dashboard with indicators. URL: <https://ec.europa.eu/jrc/en/eu-soil-observatory/dashboard>. (дата звертання 05.11.2021).
10. The European Green Deal. URL: https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en. (дата звертання 05.11.2021).
11. The EU's biodiversity strategy for 2030. URL: https://ec.europa.eu/environment/strategy/biodiversity-strategy-2030_en. (дата звертання 05.11.2021).
12. Земельний кодекс України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2768-14#Text>.
13. Теорія і практика ґрунтоохоронного моніторингу (С. 292–295). / За ред. М.М. Мірошніченко. Харків. ФОП Бровін. 2016.

UDC 631.1: 631.4

Monitoring and conservation of soils as a component of a sustainable management for agroecosystems at the local level

Yuriy Dmytruk^{1*}, Valentyna Semenchuk²

¹ Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University, Chernivtsi, Ukraine

² Bukovyna State Agricultural Experimental Station of the Institute of Agriculture of the Carpathian Region NAAS, Chernivtsi, Ukraine

*E-mail: y.dmytruk@chnu.edu.ua

The article assesses the prospects of local and regional agroecosystems to provide modern measures to improve the quality of land and soils. The authors applied the analysis (induction and deduction) of guiding and normative documents and current publications of both Ukrainian and European on the organization of sustainable use of soils and the priority of their protection. It is important to remember, that the United Nations (U.N.) sustainable development goals (SDGs, indicator 15.3.1) have land degradation neutrality by 2030. A serious aspect of the article is the assessment of the possibilities of Ukrainian agriculture to implement a system of sustainable soil management at the local level in the near future. It is determined that drivers for soil management of agroecosystems, which determine the agenda for all land users and landowners are follows: (1) global processes and geopolitical significance of agriculture; (2) characteristics of soils as a natural object, in particular, their irreplaceability, non-renewability and performance of global biosphere functions; (3) national features, including the lack of real monitoring, gaps in legislation and non-compliance with existing regulations and acts and the land market. Therefore, there is a need for precise legislation to protect and preserve soils, as well as the implementation of agricultural technologies that will ensure a land degradation neutrality and soil sequestration of carbon. Given the uncertainty about the functioning of real soil monitoring at the state level, we consider it promising to organize soil monitoring as a local network. This means that the creation of a components of a specific soil management system should be provided by land users. The authors are convinced that experimental stations in the structure of NAAS should maintain / create their own database. Based on such a database it will be possible to effectively ensure sustainable soil management, namely: to assess soils current state at the moment, ecosystem services from soils, to predict the dynamics of soil indicators, to simulate different variants of their changes and so on. The costs of such a local GIS are offset by gains, including profits from business activities for many years to come. Due to the increased attention to soil organic carbon reserves (introduction of carbon taxes, restrictions on greenhouse gas emissions), it is urgent to assess and forecast the processes of carbon emission-sequestration and appropriate soil capabilities for a particular type of land use. Soil scientists are ready to develop a method of data collection and local GIS, taking into account the specifics of the type of agriculture.

Keywords: land; land use; fertility; soil monitoring; soil degradation.

Citing: Dmytruk, Yu. M. & Semenchuk, V. G. (2021). Monitoring and conservation of soils as a component of a sustainable management for agroecosystems at the local level.. *AgroChemistry and Soil Science*. 92, 24-31. [doi:10.31073/acss92-03](https://doi.org/10.31073/acss92-03) [in Ukrainian]

УДК 551.583 : 633

Багаторічна динаміка деяких метеорологічних та агрометеорологічних показників за даними метеорологічної станції Луганськ

М.М. Полулях, В.О. Белоліпський

Національний науковий центр "Інститут ґрунтознавства та агрохімії імені О.Н. Соколовського",
Харків, Україна

ІНФОРМАЦІЯ	АНОТАЦІЯ
Отримано 20.09.2021 Отримано після доопрацювання 04.12.2021 Затверджено до видання 10.12.2021 Доступно онлайн 20.12.2021	Висвітлено результати аналізу динаміки середньомісячних значень гідротермічних кліматичних показників на території Луганської області (Північний Степ України) в умовах довгострокових кліматичних змін — кількості опадів (1882–2020 рр.) та температури повітря (1837–2020 рр.). Розроблено статистичні моделі — рівняння регресії для визначення тенденцій часових змін досліджуваних показників. Проведено статистичний аналіз і виявлено закономірності динаміки параметрів гідротермічних показників у межах таких етапів: рік, вегетаційний період; періоди сівби ярих культур (квітень); формування врожаю (травень–червень); післязбиральний (липень–серпень); сівби озимих зернових (вересень–жовтень); холодний період (листопад–березень). Виявлено загальну тенденцію до збільшення середньорічної кількості опадів, та високу варіабельність ($C_v > 25\%$) середньомісячних значень в окремі етапи вегетаційного періоду. Імовірнісним аналізом багаторічних даних, за методом побудови емпіричних та теоретичних (аналітичних) кривих забезпеченості, виявлено, що середньомісячна температура у періоди сівби ранніх ярих та озимих 11–14 °C відповідає 10 % рівню ймовірності, а 8,0–11,5 °C — 50 %. У цьому ж періоді кількість опадів 58–60 мм відповідає 10 % рівню ймовірності, а 30–40 мм — 50 %. Шляхом аналізування кутів нахилу ліній тренду досліджено динаміку середньомісячних значень кількості опадів і температури повітря на досліджуваній території й отримано розподіл швидкості збільшення або зменшення опадів та зміни температур. Узагальнення показало, що кут нахилу ліній тренду асоціюється з етапом вегетаційного періоду. Коливання середньомісячних температур відповідають коливанням середньомісячної кількості опадів і найбільш помітні у періодах сівби ранніх ярих, формування врожаю та післязбиральному. Середньорічна температура протягом 1845–1935 рр. на території області утримується на рівні 8 °C, а з 1935 року до нашого часу відбувається її стійке підвищення до 10 °C. Виявлені особливості змін кількості опадів у часі можуть бути використані для подальших досліджень нерівномірності атмосферного зволоження ґрунту, прогнозування паводків, змін ерозійної активності тощо.
Ключові слова: Клімат; вологозабезпеченість; опаді; температура; ймовірність; коливання	
E-mail: nick_pol2015@ukr.net	
Форма цитування: Полулях М.М., Белоліпський В.О. Багаторічна динаміка деяких метеорологічних та агрометеорологічних показників за даними метеорологічної станції Луганськ. Агрохімія і ґрунтознавство. Міжвід. тем. наук. збірник. 2021. Вип. 92. Харків: ННЦ "ІГГ ім. О.Н. Соколовського". С. 32–40. https://doi.org/10.31073/acss92-04	

1. Вступ

В умовах змін клімату на передній план виходить водна безпека країн. Світове співтовариство трактує її як такий розподіл води і водомісткої продукції, за якого не виникає загрози міжнародній стабільності, водних війн, водного тероризму тощо [1].

Серед 20 європейських країн Україна, за показником забезпеченості водними ресурсами, посідає 17 місце та 124 місце серед 181 країни світу, за даними 2014 р. [2].

Ця проблема знайшла відгук на державному рівні. В Указі Президента України від 14 вересня 2020 року № 392/2020 щодо затвердження Стратегії національної безпеки України, підкреслюється, що в умовах зміни клімату та зростання техногенного навантаження на навколишнє природне середовище збільшується кількість та масштаби надзвичайних ситуацій природного і техногенного характеру, до яких належать, зокрема метеорологічні й гідрологічні посухи. Наслідком посух є катастрофічне зниження водного стоку річок, а також обмеження доступності води для економіки, соціальної сфери та екосистем [3].

У степовій зоні України впродовж останніх 111 років (з 1900 до 2011) середньорічна температура повітря підвищилася на 0,3–0,7 °C. За даними Гідрометцентру, посухи стали більш частими — з 1960 до 2010 було 25 посушливих років [4].

Ситуація зі змінами погодно-кліматичних умов у Степу України висвітлена у працях вітчизняних дослідників у 2005–2010 рр.: показано багаторічну динаміку опадів у Донбасі [5], проаналізовано кліматичні зміни та їх прогнозування [6], розглянуто ризики ведення рослинництва в регіональних умовах відносно змін клімату [7]. Для Північного Заходу України визначено тенденції зміни кількості опадів [8].

Всі ці дослідження показують, що напрямок тренду кількості опадів у часі є важливою характеристикою, що дозволяє прогнозувати розвиток несприятливих

гідрометеорологічних явищ (повені, посухи, інтенсивна ерозія ґрунту, тощо) та використовувати результати розрахунків у проектуванні різних дренажних і ґрунтозахисних споруд тощо.

Але це питання, на наш погляд, вимагає залучення додаткових погоднокліматичних даних за багаторічний період, їх аналізу за ключовими періодами вологозабезпеченості, визначеними попередніми дослідженнями [9]. Методом кластерного аналізу виявлено перспективність заходів, спрямованих на поліпшення вологозабезпеченості, в організаційній структурі водозбору. Аналіз дендрографів за періодами вегетації сільськогосподарських культур показав, що найсильніше впливають на накопичення вологи ($F_{\text{заг}}$) в ґрунті такі асоціації факторів [9]:

- травень-червень $F_{\text{заг}} = [(змитість * щільність) * (K_{\text{змитості}} * K_{\text{зах. дії лісосмуг}}) * (агрофон * ГТК)]$,
- липень-серпень $F_{\text{заг}} = [(гумус * K_{\text{зах. дії лісосмуг}}) * (K_{\text{змитості}} * щільність) * Н]$,
- вересень-жовтень $F_{\text{заг}} = [(гумус * K_{\text{зах. дії лісосмуг}}) * (K_{\text{змитості}} * щільність) * ГТК * Н]$.

Тому, введення в дослідження методу просторово-часового аналізу динаміки гідротермічних показників (опадів і температури у багаторічному розрізі) за періодами органогенезу сільськогосподарських культур є новим підходом, що розширює практичну та економічну значущість роботи.

У статті висвітлено результати аналізу динаміки середньомісячних значень кількості опадів та температури на території Луганської області (Північний Степ України) в умовах довгострокових (140–200 років) кліматичних змін. Метою було розробити статистичні моделі як рівняння регресії для визначення часових змін досліджуваних показників.

Завдання досліджень: провести статистичний аналіз і виявити закономірності динаміки середньомісячних значень гідротермічних показників — кількості опадів і температури повітря у межах таких етапів: рік, вегетаційний період, періоди сівби ярих культур (квітень), формування врожаю (травень-червень), післязбиральний (липень-серпень), сівби озимих зернових (вересень-жовтень) та холодний період (листопад-березень).

2. Матеріали та методи досліджень

Методологічною основою досліджень є математико-статистичний аналіз. Методи теоретичного аналізу, математичної статистики та моделювання широко використовуються для оцінки агрометеорологічних умов вегетації с.-г. культур, дозволяють обробляти масові матеріали спостережень і отримувати різноманітні взаємозв'язки між погодними умовами та розвитком рослин [10, 11, 12].

Статистичний аналіз гідротермічних факторів регіону досліджень виконано за середньомісячними даними Луганської метеорологічної станції — опади (135 років спостережень) за період від 1882 до 2020 [13], та температура (184 роки спостереження) за період від 1837 до 2020 рр. [14].

Розрахунки проведено в межах значущих періодів, впродовж кожного сільськогосподарського року, стосовно вологозабезпеченості сільськогосподарських культур: сівба ранніх ярих (квітень); формування врожаю (травень-червень); післязбиральний (липень-серпень); сівба озимих (вересень-жовтень); холодний осінньо-зимовий період (листопад-березень). Провідні періоди вологозабезпеченості визначено за методикою В.О. Белопіпського, 2015 [9]. Також в аналіз було включено середньомісячні дані за весь календарний рік та за вегетаційний період (квітень-жовтень).

Аналіз виконано засобами MS Exel «Аналіз даних» та програми Statistica 6.0. Для зручності аналізу для кожного гідротермічного показника було визначено (за методом І.Д. Соколова [6]) рівняння зв'язку $Y = AX + B$ (пряма лінія), де A — кутовий коефіцієнт лінії, який дорівнює тангенсу кута між прямим і позитивним напрямком осі X .

Розрахунки ймовірності прояву значень гідротермічних показників проведено побудовою кривих розподілу Пірсона III типу та обчисленням статистичних показників:

коефіцієнта варіації — $C_v = \frac{S}{\bar{X}} 100, \%$; середнього — $\bar{X} = \frac{\sum X_n}{n}$; мінімуму — $X_{\min}$; максимуму — $X_{\max}$; числа спостережень — n ;

3. Результати досліджень

3.1. Статистичний аналіз

Проведено статистичний аналіз середньомісячних значень гідротермічних показників за означеними періодами. Для кожного варіаційного ряду враховано такі статистичні показники: число спостережень n , значення середнє $\bar{X}$, мінімальне $X_{\min}$,

максимальне $X_{\max}$, та коефіцієнт варіації C_v . Число спостережень за кожним із гідротермічних показників є достатнім ($n > 30$).

Виявлено, що за такими групами гідротермічних факторів — опади за вегетацію, у періоди сівби ярих, формування врожаю, післязбиральний, сівби озимих та холодний; та температура за холодний період та період сівби ярих існує високий ступінь варіабельності значень — коефіцієнт варіації $C_v > 25\%$ (Табл. 1).

Найбільші коливання значень кількості опадів спостерігаються у періоди післязбиральний та сівби ранніх ярих культур, а коливання температури — в період сівби ранніх ярих та холодний період.

Таблиця 1

Загальний статистичний аналіз середньомісячних значень гідротермічних показників за тривалий час спостережень

№	Статистичні показники	Період у межах року						
		рік	веге- тація	сівба ранніх ярих	форму- вання врожаю	після- збираль- ний	сівба озимих	холод- ний
Опади (1882–2020 рр.)								
1	Кількість років спостережень, n	135						
2	Середнє значення, $\bar{X} = \frac{\sum X_n}{n}$, мм	38,32	43,96	36,56	51,45	47,96	36,17	30,84
3	Мінімум, $X_{\min}$, мм	24,00	18,70	0	4,00	6,00	6,50	11,60
4	Максимум, $X_{\max}$, мм	66,60	89,30	119,00	112,50	135,00	90,00	67,40
5	Коефіцієнт варіації $C_v = \frac{S}{\bar{X}} 100, \%$	21,90	27,90	60,10	39,70	50,90	49,70	32,90
Температура повітря (1837–2020 рр.)								
1	Кількість років спостережень, n	184						
2	Середнє значення, $\bar{X} = \frac{\sum X_n}{n}$, °C	8,16	15,95	8,91	17,93	21,73	11,75	-2,77
3	Мінімум, $X_{\min}$, °C	5,80	13,70	3,20	14,25	18,90	8,30	-8,20
4	Максимум, $X_{\max}$ °C	10,70	19,10	15,00	22,05	26,30	15,40	1,70
5	Коефіцієнт варіації $C_v = \frac{S}{\bar{X}} 100, \%$	13,20	6,20	26,20	8,20	6,40	12,60	-70,70

Дослідженнями (за методикою І.Д. Соколова та ін. [6]) для встановлення загальних тенденцій змін (тренду) клімату виявлено можливість та доцільність використання прямолінійної функції $Y = AX + B$ (поліном першого ступеня). В таблиці 2 подано результати регресійного аналізу за періодами. Виявлено, що кут нахилу лінії тренду залежить від періоду вегетації сільськогосподарських культур.

Таблиця 2

Результати регресійного аналізу гідротермічних показників

№	Період у межах року	Показник	Рівняння регресії	Коефіцієнт R
1	Рік	<i>опади</i>	$Y = 0,0437 X - 46,924$	0,2069
		<i>температура</i>	$Y = 0,0101 X - 11,294$	0,4994
2	Веgetація	<i>опади</i>	$Y = 0,0017 X + 40,655$	0,0055
		<i>температура</i>	$Y = 0,0042 X + 7,7682$	0,2283
3	Сівба ранніх ярих	<i>опади</i>	$Y = -0,00003 X + 36,613$	0,00004
		<i>температура</i>	$Y = 0,0157 X - 21,359$	0,3589
4	Формування врожаю	<i>опади</i>	$Y = 0,0238 X + 5,046$	0,0458
		<i>температура</i>	$Y = 0,0056 X + 7,1313$	0,2030
5	Післязбиральний	<i>опади</i>	$Y = -0,0484 X + 142,39$	0,0787
		<i>температура</i>	$Y = 0,0008 X + 20,253$	0,0283
6	Сівба озимих	<i>опади</i>	$Y = 0,0307 X - 23,861$	0,0678
		<i>температура</i>	$Y = 0,0006 X + 10,484$	0,0224
7	Холодний період	<i>опади</i>	$Y = 0,1028 X - 170,44$	0,4079
		<i>температура</i>	$Y = 0,0183 X - 38,013$	0,4987

Примітка. Коефіцієнт R — корінь квадратний із коефіцієнта детермінації.

Результати досліджень показали, що у всі періоди у межах року напрямок тренду кількості опадів є позитивним, тобто спостерігається збільшення кількості опадів у часі (Рис. 1). Однак ця тенденція до збільшення кількості опадів не однакова для різних фаз

вегетаційного періоду і середньомісячних характеристик року. Шляхом аналізу кутів нахилу ліній тренду (Рис. 1) отримано розподіл швидкості збільшення або зменшення кількості опадів та швидкості збільшення значень температури повітря (Рис. 2).

Згідно з рівняннями регресії (Табл. 2) відзначено такі тенденції до зміни середньомісячних значень гідротермічних показників у межах критичних внутрішньорічних періодів розвитку сільськогосподарських культур упродовж тривалого часу спостережень:

- сівба ранніх ярих — незначне зменшення кількості опадів за значного підвищення температури;
- формування врожаю — незначне збільшення кількості опадів та значне підвищення температури;
- післязбиральний період — незначне зменшення кількості опадів і підвищення температури;
- сівба озимих — незначне збільшення кількості опадів разом з підвищенням температури.

Найбільш помітних змін зазнав клімат у холодний період року, коли відбувається значне підвищення температури та збільшення кількості опадів.

Таким чином, констатовано загальне підвищення температури у всі критичні періоди в межах року, але підвищення кількості опадів помітне лише у холодний період. У зв'язку з цим доцільним є більш ранній посів ранніх ярих культур, оскільки виникають проблеми з вологозабезпеченням у період формування врожаю та посівами проміжних культур; оптимальний термін посіву озимих культур переміщується на більш пізні строки.

3.2. Особливості динаміки середньомісячної кількості опадів

Для виявлення характеру прояву у часі гідротермічних показників засобами MS EXCEL побудовано їх графіки — поліном шостого та першого ступенів за відповідні внутрішньорічні періоди. Особливо виражені коливання кількості опадів у періодах сівби ранніх ярих, формування врожаю та післязбиральному. На рисунку 1 подано значення середньомісячних опадів за внутрішньорічними періодами, їх коливання, графіки регресії (поліном шостого ступеня, поліном першого ступеня, його рівняння та коефіцієнт кореляції R).

Так, у періоді сівби ранніх ярих (середнє значення середньомісячної кількості опадів — 36,6 мм, коливання 0–119 мм) спостерігаються такі напрямки трендів: збільшення опадів з 48 до 66 мм протягом 31 року (1882–1913) потім зменшення до 41 мм протягом наступних 40 років (1913–1953), збільшення до 66 мм протягом 45 років (1953–1998) і зменшення до 48 мм зі стабілізацією упродовж 22 років (1998–2020). Таким чином, весь час поділяється на такі послідовні відрізки: збільшення опадів — 31 рік, зменшення — 40, збільшення — 45 і зменшення (зі стабілізацією) 22 роки. Перспектива на наступний час (30–35 років) — середньомісячна кількість опадів у період сівби ранніх ярих утримається на середньобогаторічному мінімумі.

У періоді формування врожаю (середнє значення — 51,5, коливання 4–112,5 мм) відмічається збільшення опадів від 45 до 56 мм упродовж 30 років (1882–1912), зменшення до 46 мм протягом 45 років (1912–1957), збільшення до 56 мм упродовж 35 років (1957–1992), зменшення до 51 мм протягом 23 років (1992–2015). В наш час, з 2015 р. спостерігається збільшення опадів до 53 мм зі збереженням тенденції. Як видно, за весь оцінюваний час, періоди підвищення кількості опадів на етапі формування врожаю чергувалися з періодами зниження у такій послідовності: збільшення — 30 років, зменшення — 45, збільшення — 35, зменшення — 23 роки.

У післязбиральному періоді (середнє значення — 48, коливання 6–135 мм), навпаки, спочатку відбулося зменшення опадів з 47 до 41 мм протягом 8 років (1882–1890) потім збільшення до 60 мм протягом 25 років (1890–1915), зменшення до 39 протягом 40 років (1915–1955), збільшення протягом 35 років до 55 мм (1955–1990 рр.), зменшення до 37 мм протягом 25 років (1990–2015) і до теперішнього часу — збільшення до 39 мм зі збереженням тенденції. Перспектива — зростання кількості опадів. За період спостережень: збільшення — 25, зменшення — 40, збільшення — 35, зменшення — 25 років з подальшою тенденцією до збільшення кількості опадів.

У період сівби озимих (середнє — 36,2, коливання 6,5–90 мм) збільшення опадів з 34 до 39 мм тривало 10 років (1882–1892), зменшення до 36 мм — 20 років (1892–1912), стабілізація 25 років на рівні 36 мм (1912–1937), зменшення до 29 мм упродовж 35 років (1937–1972), збільшення до 49 мм за 35 років (1972–2007). В останні роки, від 2007 року спостерігається різке зменшення опадів до 24 мм зі збереженням тенденції. За період спостережень: збільшення — 10, зменшення — 20, стабілізація — 25, зменшення — 35 і різке зменшення 13 років.

Показовим є аналіз надходження опадів за холодний період (середнє значення — 30,8, коливання 11,6–67,4 мм). У 1882–1897 рр. — збільшення з 22 до 33 мм за 15 років, з 1897 до 1930 (33 роки) — зменшення до 23 мм, а з 1930 року до нашого часу (91 рік) — збільшення до 39 мм з подальшим зростанням. Період спостережень характеризується лише одним мінімумом (1930 рік). Перспектива — зростання кількості опадів.

Середньомісячні опади за рік (середнє — 38,3, коливання 24,0–66,6 мм). З початку спостережень протягом 23 років відбувалося збільшення з 33 до 41 мм (1882–1905), зменшення за 40 років до 34 мм (1905–1945), збільшення до 43 мм за 50 років (1945–1995) та зменшення до 39 мм за 25 років (1995–2020). За період спостережень: зростання — 23, зменшення — 40, зростання — 50, зменшення — 25 років до нашого часу і в перспективі — зменшення.

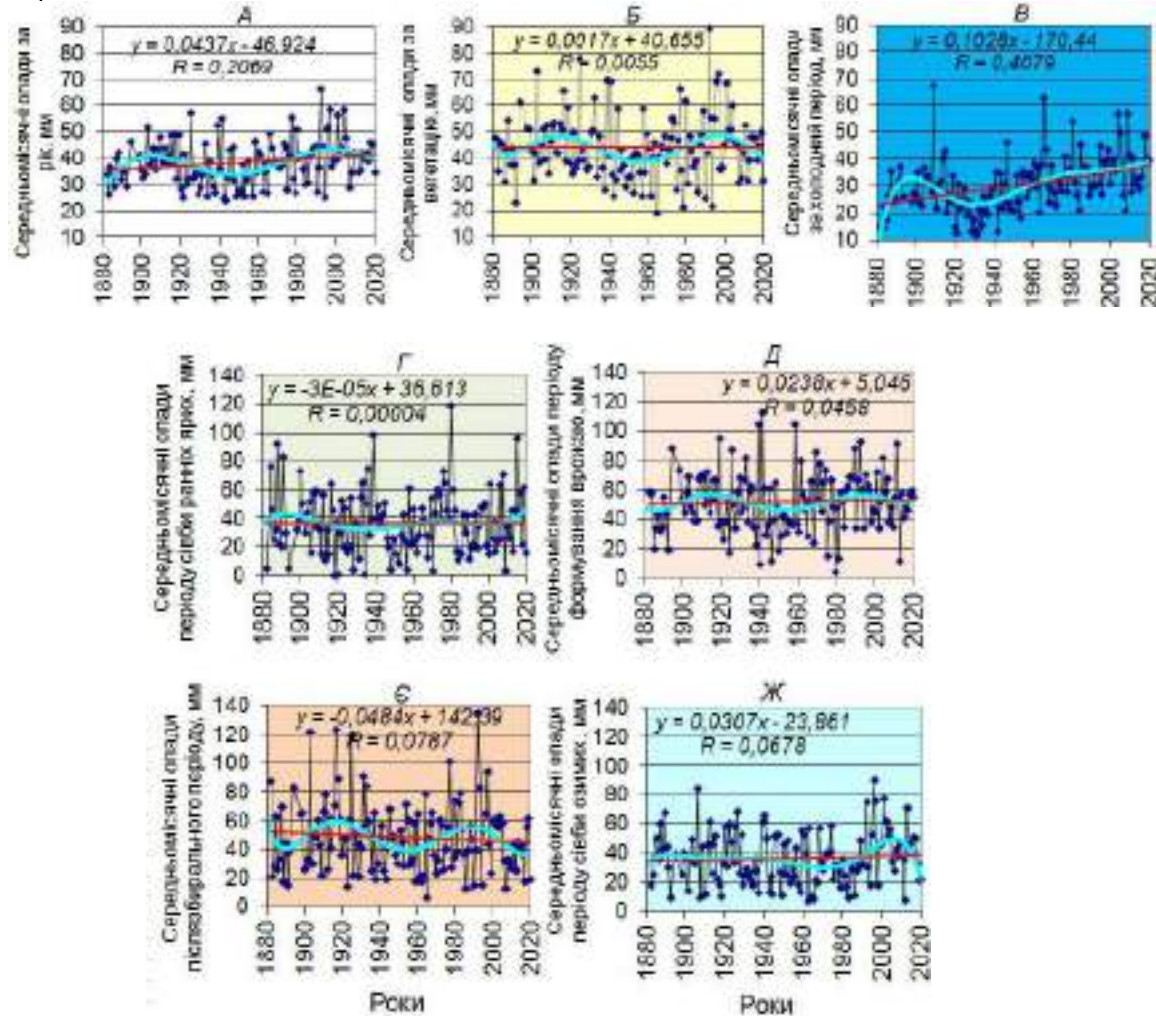


Рис. 1. Середньомісячна кількість опадів (мм)

— поліном першого ступеня, — поліном шостого ступеня.

Для узагальнення надходження опадів вибрано середньомісячну кількість опадів за вегетаційний період (середнє значення — 44, коливання 18,7–89,3 мм). Протягом перших 33 років (1882–1915) спостерігалось збільшення від 42 до 49 мм, далі — зменшення до 38 мм, яке тривало 40 років (1915–1955), збільшення до 49 мм за 40 років (1955–1995) та зменшення до 40 мм за 25 років (1995–2020). За період спостережень: збільшення — 33, зменшення — 40, збільшення — 40 і зменшення — 25 років до теперішнього часу.

3.3. Особливості динаміки середньомісячної температури повітря

Коливання температурних умов в цілому відповідають дослідженим вище тенденціям зволоження та також найбільше виявляються у періодах сівби ранніх ярих, післязбиральному та періоді формування врожаю. Значення середньомісячних температур за внутрішньорічними періодами, їх коливання, графіки регресії (поліном

шостого ступеня, поліном першого ступеня, його рівняння та коефіцієнт кореляції R) подано на рисунку 2.

У періоді сівби ранніх ярих (середнє — 8,9, коливання 3,2–15,0 °C): підвищення температури з 22,5 до 23 °C — 18 років (1837–1855), зниження до 21,8 °C — 40 років (1855–1895), підвищення до 22,3 °C — 40 років (1895–1935), зниження до 21,8 °C — 40 років (1935–1975), підвищення до 23,2 °C — 40 років (1975–2015) та з 2015 року до нашого часу — зниження до 23,1 з утриманням тенденції. За період спостережень: збільшення — 18, зниження — 40, збільшення — 40, зниження — 40, збільшення — 40 років, поточний час — зниження.

Післязбиральний період (середнє — 21,7, коливання 18,9–26,3 °C) відповідає попередній тенденції. 18 років — підвищення температури з 22 до 22,5 °C (1837–1855), 40 років — зниження до 21,2 °C (1855–1895), 40 років — підвищення до 21,7 °C (1895–1935), 40 років — зниження до 21,3 °C (1935–1975), 40 років — підвищення до 22,7 °C (1975–2015), поточний час (2015–2020) — зниження до 22,6 °C зі збереженням тенденції. За період спостережень: підвищення — 18, зниження — 40, підвищення — 40, зниження — 40, підвищення — 40 років, поточний час — зниження.

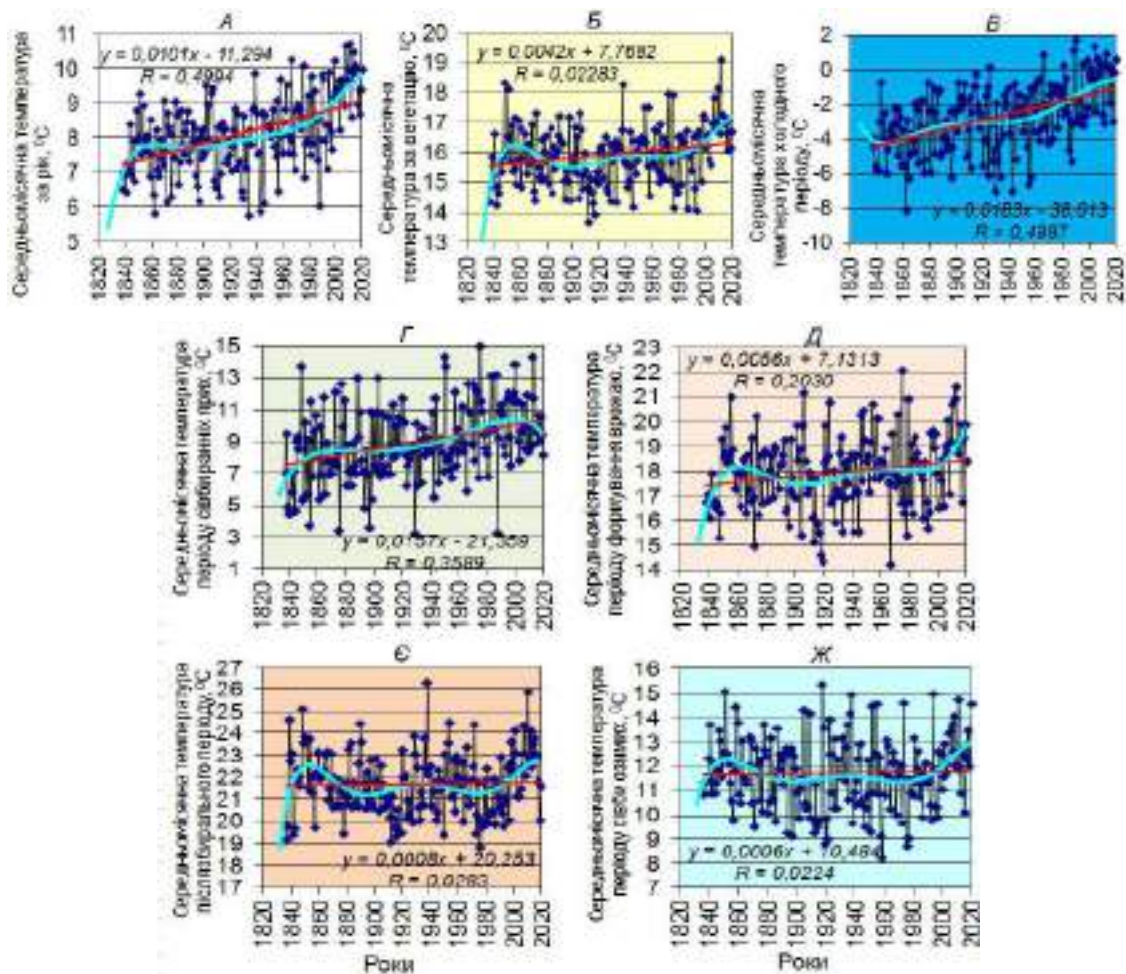


Рис. 2. Середньомісячна температура (°C)

— поліном першого ступеня, — поліном шостого ступеня.

В інші внутрішньорічні періоди коливання параметрів температури повітря менш виражені, з'являються проміжки з вирівняними значеннями. Період формування врожаю (середня температура — 17,9, коливання 14,3–22,1 °C), 23 роки (1837–1860) — підвищення температури з 17,5 до 18,2 °C, 45 років (1860–1905) — зниження до 17,5 °C, 50 років (1905–1955) — підвищення до 18 °C, 40 років (1955–1995) — стабілізація на рівні 18 °C, 25 років (1995–2020) — підвищення до 19,8 °C зі збереженням тенденції в наш час. Особливість цього періоду — наявність проміжку часу з вирівняними температурами. За період спостережень: підвищення — 23, зниження — 45, підвищення — 50, стабілізація — 40, підвищення — 25 років і в поточному часі.

Період сівби озимих (середня температура — 11,8, коливання 8,3–15,4 °C). Підвищення температури з 12 до 12,3 °C протягом 18 років (1837–1855), 40 років (1855–

1895) — зниження до 11,5 °С, 90 років (1895–1985) — стабілізація на рівні 11,5 °С, 35 років і в поточний час (1985–2020) — підвищення до 13 °С. Повні спостереження: підвищення — 23, зниження — 45, підвищення — 50, стабілізація — 40, підвищення — 25 років, і в поточному часі — підвищення.

Холодний період (середнє — -2,8, коливання від -8,2 до +1,7 °С). Характеризується загальним трендом на підвищення температури. Так, за 68 років вона підвищилася з -4,2 до -3 °С (1837–1905 рр.), 40 років (1905–1945) — утримувалася на рівні -3 °С, за останні 75 років (1945–2020) — підвищилася до -0,5 °С зі збереженням тенденції.

За вегетацію (середнє значення — 16, коливання 13,7–19,1 °С). Підвищення температури з 15,8 до 16,3 °С за 18 років (1837–1855), 40 років (1855–1895) — зниження до 15,5 °С, 50 років — підвищення до 15,9 °С (1895–1945), 40 років (1945–1985) — стабілізація на рівні 15,9 °С, 35 років — підвищення до 17,1 °С (1985 р — наш час) зі збереженням тенденції.

Температура за рік (середнє — 8,2, коливання 5,8–10,7 °С). Характеризує загальні тенденції сучасних змін температурних умов. Протягом 18 років (1837–1855) відбулося підвищення температури з 7,5 до 7,7 °С, 60 років (1855–1915) — стабілізація на рівні 7,7 °С, за 60 років (1915–1975) — підвищення до 8,7 °С та ще за 45 років — підвищення до 9,7 °С зі збереженням тенденції в наш час.

3.4. Імовірнісна оцінка гідротермічних показників

В основу ймовірнісного аналізу покладено побудову емпіричних і теоретичних (аналітичних) кривих забезпеченості. Теоретичні криві забезпеченості гідротермічних показників (Рис. 3) побудовано за табличними даними ординат А. Фостера–С.І. Рибкіна від середнього значення C_v : *опад* (середньомісячні) за рік — 0,218, за вегетацію — 0,279, за періоди сівби ярих (квітень) — 0,601, формування врожаю (травень–червень) — 0,397, післязбиральний (липень–серпень) — 0,509, сівби озимих (вересень–жовтень) — 0,497, холодний період — 0,329; *температура* (середньомісячна) за рік — 0,123; за вегетацію — 0,062; за періоди сівби ранніх ярих (квітень) — 0,261, формування врожаю (травень–червень) — 0,082, післязбиральний (липень–серпень) — 0,064, сівби озимих (вересень–жовтень) — 0,125, ймовірність (P) 1–99 %.

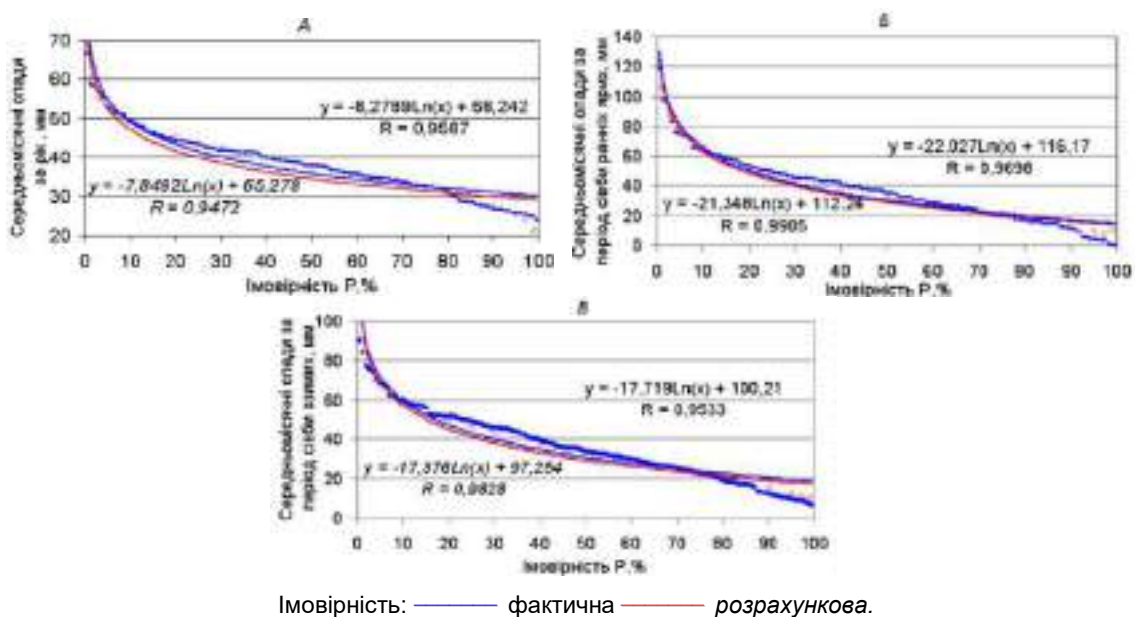


Рис. 3. Криві забезпеченості опадів за періодами: А — за рік, Б — період сівби ранніх ярих (квітень), В — період сівби озимих (вересень–жовтень).

Для визначення параметрів кривих забезпеченості проаналізовано ряди спостережень: *опад* — 135 років спостережень (1882–2020), *температура* — 184 роки спостережень (1837–2020). Рівні коефіцієнта регресії (R) для фактичних значень опадів становлять 0,9533–0,9698, для розрахункових — 0,9472–0,9905; для фактичних та розрахункових значень температури, відповідно — 0,9136–0,9220 та 0,9105–0,9239, що свідчить про високий рівень достовірності розрахунків.

Аналіз даних кількості опадів за весь вегетаційний період, а також за періоди сівби ранніх ярих та озимих свідчить про відповідність 10 % рівню ймовірності 58–60 мм, 50 %

— 30–40 (Рис. 3); для опадів за рік 10 % рівню ймовірності відповідають 48–50, 50 % — 35–38 мм; для опадів за холодний період відповідно 41–43 та 26–28 мм.

Ймовірність середньомісячної температури за рік: 10 % рівню ймовірності відповідають 9–9,5 °С, 50 % — 7,5–8 °С; для сівби ранніх ярих та озимих 10 % рівню ймовірності 11–14 °С, 50 % — 8–11,5 °С (Рис. 4); в цілому за вегетацію відповідно 15–17 та 14–14,5 °С.

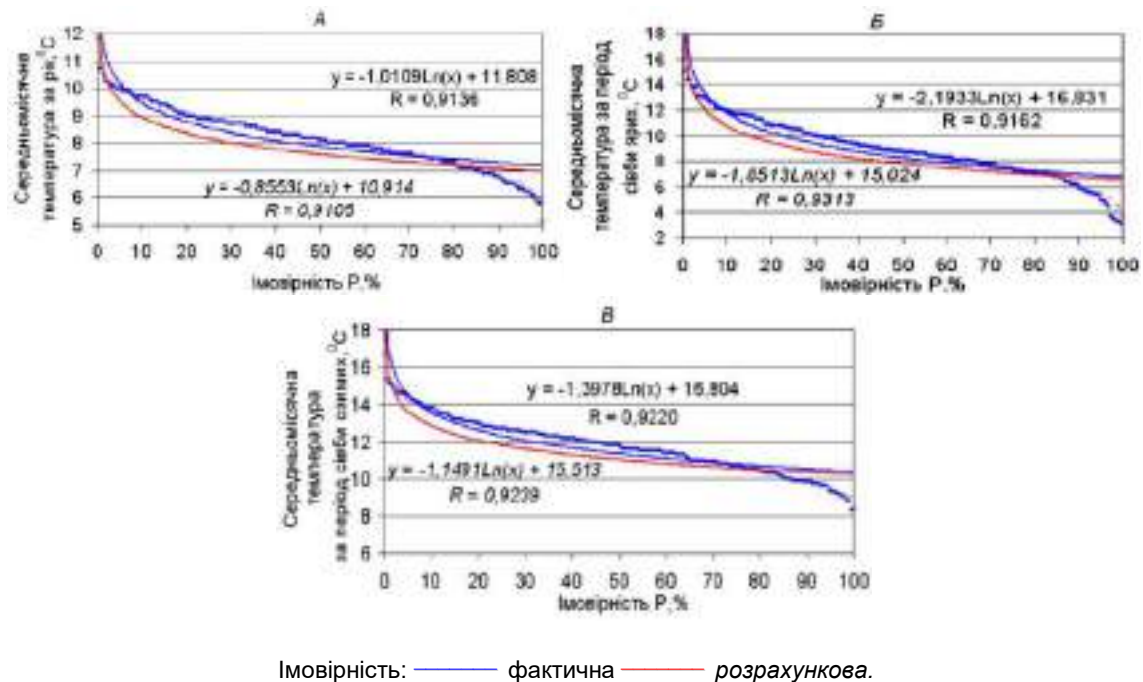


Рис. 4. Криві забезпеченості температури за періодами: А — за рік, Б — період сівби ранніх ярих (квітень), В — період сівби озимих (вересень-жовтень).

4. Висновки

1. На території Північного Степу України спостерігається загальна тенденція до збільшення опадів протягом року. Але ця тенденція не однакова для різних етапів вегетаційного періоду та середньомісячних характеристик року. Шляхом аналізування кутів нахилу ліній тренду отримано розподіл швидкості збільшення або зменшення опадів на досліджуваній території. Виявлено, що кут нахилу лінії тренду залежить від етапу вегетаційного періоду.

2. Коливання середньомісячних температур відповідають коливанням середньомісячної кількості опадів і найбільш помітні у періодах сівби ранніх ярих, формування врожаю та післязбиральному. Середньорічна температура протягом 1845–1935 рр. утримується на рівні 8 °С, а з 1935 року до нашого часу відбувається її стійке підвищення до 10 °С.

3. Імовірнісним аналізом багаторічних даних, за методом побудови емпіричних та теоретичних (аналітичних) кривих забезпеченості, виявлено:

– середньомісячна температура за рік 9–9,5 °С відповідає 10 % рівню ймовірності, а 7,5–8,0 — 50 %; у періоди сівби ранніх ярих та озимих 11–14 °С відповідає 10 %, а 8,0–11,5 °С — 50 %; в цілому за вегетацію, відповідно, 15–17 та 14,0–14,5 °С.

– середньомісячні опади в періоди сівби ранніх ярих та озимих 58–60 мм відповідають 10 % рівню ймовірності, а 30–40 мм — 50 %; середньомісячні опади за рік 48–50 мм відповідають 10 % рівню ймовірності, а 35–38 — 50 %; опади за холодний період, відповідно — 41–43 та 26–28 мм.

4. Виявлені особливості змін кількості опадів у просторі та часі можуть бути використані для подальших досліджень нерівномірності атмосферного зволоження, прогнозування паводків, змін ерозійної активності тощо.

Список цитованих джерел

1. Сніжко С., Шевченко О., Дідовець Ю. Аналіз впливу кліматичних змін на водні ресурси України (повний звіт за результатами проекту). Центр екологічних ініціатив "Екодія", 2021. 68 с. URL: <https://ecoaction.org.ua/wp-content/uploads/2021/06/analiz-vplyvu-vodni-resursy-full.pdf>.

2. United Nations, The United Nations World Water Development Report 2021: *Valuing Water*. UNESCO, Paris. Retrieved from: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000375724>
3. Указ Президента України №392/2020 Про рішення Ради національної безпеки і оборони України від 14 вересня 2020 року "Про Стратегію національної безпеки України". URL: <https://www.president.gov.ua/documents/3922020-35037> (дата звертання 01.03.2021).
4. Урожайность. Когда засуха уже не случайность / А. Черенков, С. Крамарев, С. Красненков [и др.] // *Зерно: всеукраинский журнал современного агропромышленника*. 2011. N 11. С. 38-45. URL: <https://www.zerno-ua.com/journals/2011/noyabr-2011-god/urozhaynost-kogda-zasuha-uzhe-ne-sluchaynosti/>
5. Соколов И.Д., Долгих Е.Д., Соколова Е.И. Многолетняя динамика осадков в Донбассе. *Збірник наукових праць Луганського НАУ*. 2005. 40(52). С. 98–104.
6. Соколов И.Д., Долгих Е.Д., Соколова Е.И. Изменение климата востока Украины и его прогнозирование. Оптимистическое руководство. Луганск: ИПЦ "Элтон-2", 2010. 133 с.
7. Хромьяк В.М., Наливайко В.В. Ризики ведення рослинництва в умовах Північного Степу в зв'язку зі зміною клімату. *Вісник аграрної науки*. 2016. 9. С. 17–24. <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk201609-03>
8. Budnik S.V. Spatio-temporal change of atmospheric precipitation on territory of North-West of Ukraine. *Journal of Atmospheric Science Research* 2(4). 2020. <https://doi.org/10.30564/jasr.v2i4.1564>
9. Белоліпський В.О., Полулях М.М. Оцінка функціонування агроландшафту за показниками вологозабезпеченості та параметри його оптимізації (методичні рекомендації). За ред. В.О. Белоліпського. Харків: Смуґаста типографія, 2015. 74 с.
10. Ткаченко Т.Г. Агрометеорологія: навчальний посібник. Харків: ХНАУ, 2015. 268 с.
11. Божко Л.Ю., Барсукова О.А. Конспект лекцій з дисципліни «Агрометеорологічні прогнози». Одеса: ТЕС, 2010. 228 с.
12. Польовий А.М., Божко Л.Ю., Вольвач О.В. Основи агрометеорології: підручник. Одеський ДЕУ. Одеса: ТЕС, 2012. 250 с.
13. Месячные и годовые суммы выпавших осадков в Луганске. Справочно-информационный портал. "Погода и климат" URL: http://www.pogodaiklimat.ru/history/34523_2.htm (дата звертання 01.03.2021).
14. Средние месячные и годовые температуры воздуха в Луганске. Справочно-информационный портал "Погода и климат". URL: <http://www.pogodaiklimat.ru/history/34523.htm> (дата звертання 01.03.2021).

UDC 551.583: 633

Long term dynamics of some meteorological and agrometeorological indicators according to the Luhansk meteorological station

Mykola Polulyakh*, Valerii Belolipsky

National Scientific Center "Institute for Soil Science and Agrochemistry Research named after O.N. Sokolovsky", Kharkiv, Ukraine

*E-mail: nick_pol2015@ukr.net

The results of the analysis of the dynamics of the average monthly values of hydrothermal climatic indicators on the territory of the Luhansk region (Northern Steppe of Ukraine) in the conditions of long-term climatic changes in precipitation (1882–2020) and air temperature (1837–2020) are presented. Statistical models — regression equations for determining temporary changes in the studied indicators are developed. Statistical analysis was carried out and patterns of dynamics of parameters of hydrothermal indicators were revealed within the framework of such stages: year, growing season; sowing periods of spring crops (April); harvest formation (May–June); post-harvest (July–August); sowing of winter cereals (September–October); cold period (November–March). A general trend towards an increase in the average annual precipitation and a high variability (CV > 25%) of the average monthly values in certain stages of the growing season were revealed. Probabilistic analysis of long-term data, using the method of constructing empirical and theoretical (analytical) security curves, revealed that the average monthly temperature during the sowing periods of early spring and winter crops 11–14 °C corresponds to 10% probability level, and 8.0–11.5 °C — 50 %. In the same period, precipitation of 58–60 mm corresponds to a 10 % probability level, and 30–40 mm corresponds to 50 %. By analyzing the angles of inclination of trend lines, the dynamics of the average monthly values of precipitation and air temperature in the study area was studied and the distribution of the rate of increase or decrease in precipitation and temperature change was obtained. The generalization showed that the angle of inclination of trend lines is associated with the stage of the growing season. Fluctuations in average monthly temperatures correspond to fluctuations in the average monthly precipitation and are most noticeable in the periods of early spring sowing, crop formation and post-harvest. The average annual temperature in 1845–1935 on the territory of the region it is kept at the level of 8 °C, and after 1935 to nowadays time it has been steadily increasing to 10 °C. The revealed features of changes in the amount of precipitation over time can be used for further studies of the unevenness of atmospheric soil moisture, flood forecasting, changes in erosion activity, and the like.

Keywords: climate; moisture availability; precipitation; temperature; probability; fluctuations.

Citing: Polulyakh, M.M. & Belolipskiy, V.O. (2021). Long term dynamics of some meteorological and agrometeorological indicators according to the Luhansk meteorological station. *AgroChemistry and Soil Science*. 92, 32-40. [doi:10.31073/acss92-04](https://doi.org/10.31073/acss92-04). [in Ukrainian].

МЕТОДОЛОГІЯ І МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ METHODOLOGY AND RESEARCH TECHNIQUE

УДК 631.417.2

Літогенний потенціал карбонізації педосфери: теоретико-методологічні, методичні та екосистемний підходи

З. Г. Гамкало*, І. М. Шпаківська, О. Г. Марискевич

Інститут екології Карпат НАНУ, Львів, Україна

ІНФОРМАЦІЯ	АНОТАЦІЯ
Отримано 07.06.2021 Отримано після доопрацювання 27.11.2021 Затверджено до видання 10.12.2021 Доступно онлайн 20.12.2021	В оглядовій статті автори інформують українського читача про останні здобутки світової науки з проблеми секвестрації і депонування органічного карбону ґрунту (ОКГ) за різного типу екосистем і землекористування. Проблема акумулювання і збереження органічних сполук карбону в педосфері є однією з топових у світовому дослідницькому просторі. З використанням пошукової системи «Академія Google» (<i>Google Scholar</i>), за повними текстами наукових публікацій (статей) з досліджуваної тематики за останні 5 років, на запит «carbon sequestration» отримано – 452 000 джерел, а «soil carbon sequestration» і «soil carbon sequestration potential», відповідно – 59 700 і 56 900 джерел, тоді, як на запит українською «секвестрація вуглецю» – 178 і «секвестрація вуглецю ґрунтом» – 85. В представленому огляді літератури розглянуто поетапний розвиток теоретико-методологічних і методичних основ розробки моделей стабілізації ОКГ, головню, мінеральною матрицею ґрунтів (<20 і <50 μm) з використанням рівнянь лінійної регресії найменших квадратів, аналізу граничних значень та інших методичних підходів. Також розглянуто існуючі підходи до оцінювання захисної ємності ґрунту щодо карбону (Carbon Protective Capacity), насиченості карбоном мінеральної матриці (Carbon Saturation, CS), дефіциту С-насичення ґрунту (Saturation Deficit), а також охарактеризовано функціональні особливості процесів С-секвестрації і С-депонування. Дано критичну оцінку існуючим способам визначення потенціалу стабілізації ОКГ та реальності успішної реалізації Міжнародної ініціативи "4 на 1000: ґрунти для продовольчої безпеки і клімату", прийнятої у грудні 2015 року. Враховуючи світовий досвід, розглянуто необхідність переходу в Україні на тричленну класифікацію гранулометричного складу ґрунту.

* E-mail: zenon.hamkalo@ukr.net

Форма цитування Гамкало З.Г., Шпаківська І.М., Марискевич О.Г. Літогенний потенціал карбонізації педосфери: теоретико-методологічні, методичні та екосистемний підходи. *Агрохімія і ґрунтознавство*. Міжвід. тем. наук. збірник. 2021. Вип. 92. Харків: ННЦ "ІГА ім. О.Н. Соколовського". С. 41-51. <https://doi.org/10.31073/acss92-05>

1. Актуальність проблеми

Глобальне посилення деградації земель, зокрема, декарбонізації ґрунтів є серйозною загрозою для надання ними, вже у найближчій перспективі, якісних екосистемних послуг та для перспектив подальшого економічного розвитку. Ретроспективний аналіз утрат карбону органічних сполук (C_{org}) тільки ґрунтами агроекосистем показав, що за 12 000 років їх використання втрати становлять у двометровій товщі в середньому 133 Пг (петаграм, 10^{15} г) С, причому, їхня швидкість значно зросла за останні 200 років, головню, через деградування пасовищ [1]. Для порівняння, ці втрати C_{org} , еквівалентні десятиліттю поточних промислових викидів CO_2 [2]. Зрозуміло, що такі втрати органічної речовини (ОР) педосферою, з якою прямо чи опосередковано пов'язані її біогеоценологічні та глобальні функції, в т.ч. і кліматичні зміни, зумовили невідкладну реакцію світового істеблішменту. Тому, у вересні 2015 року в рамках 70-ї сесії Генеральної Асамблеї ООН у Нью-Йорку відбувся Саміт ООН зі сталого розвитку (СР) та прийняття Порядку денного після 2015 року, на якому затверджено нові орієнтири СР. Підсумковим документом Саміту – «Перетворення нашого світу: порядок денний у сфері сталого розвитку до 2030 року» затверджено 17 Цілей Сталого Розвитку (ЦСР) та 169 завдань, зокрема, ціль 15 (ЦСР15) – «Захист та відновлення екосистем суходолу» та завдання 15.3, спрямоване на забезпечення нейтралітету деградації земель (НДЗ, Land Degradation Neutrality – LDN). Тобто, окреслено шляхи досягнення рівноваги між трьома процесами: (i) деградацією земель, (ii) реабілітацією або відновленням земель та (iii) стійким землекористуванням. НДЗ, в цілому, є новою парадигмою контролю деградації земель, покликаною запобігти втратам земель, викликаним недосконалістю способів використання та менеджменту земельних ресурсів. Україна, як і інші країни-члени ООН, теж приєдналася до глобального процесу забезпечення СР [3]. Як видно з

Національної доповіді «Цілі Сталого Розвитку: Україна», урядом розроблено національну систему ЦСР (86 завдань та 172 індикатори), яка повинна забезпечити основу для подальшого планування розвитку України та моніторингу процесу досягнення ЦСР [4]. В цілому, це відкрило "вікно можливостей" щодо посилення політики збалансованого використання наявних земельних ресурсів. Проте, в реалізації національної програми НДЗ не передбачено такий обов'язковий глобальний індикатор НДЗ, як запаси органічного карбону в ґрунтах (ОКГ) — $\text{tC}\cdot\text{га}^{-1}$ у шарі ґрунту 0–30 см (Carbon Stocks, $\text{tC}\cdot\text{ha}^{-1}$ to 30 cm, SOC), який характеризує загальну якість ґрунту. Порівняно з іншими глобальними показниками моніторингу НДЗ, як зміна земельного покриття (Land Cover Change, LCC) та чиста первинна продуктивність землі (Land Productivity, NPP), уміст $\text{C}_{\text{орг}}$ в ґрунтах є особливо інформативним індикатором ефективності управління земельними ресурсами [5].

Іншим знаковим рішенням останнього часу є Міжнародна ініціатива "4 на 1000: ґрунти для продовольчої безпеки і клімату" [6], започаткована Францією 1 грудня 2015 року і спрямована на збільшення вмісту органічної речовини в ґрунті шляхом упровадження інноваційних сільськогосподарських практик. Підраховано, що саме за темпу щорічного приросту запасів карбону в верхньому шарі ґрунту (0–30/40 см), рівному 0,4 % (4 ‰), нормалізується концентрація CO_2 в атмосфері, підвищення якої пов'язано з нераціональною діяльністю людини. Ця ініціатива, що є частиною Глобального плану дій щодо клімату (GCAA), сприятиме досягненню НДЗ. У цьому контексті вважають, що збільшення запасів органічних сполук карбону в агроґрунтах стане ефективним засобом для поліпшення якості самих ґрунтів, підвищення продуктивності рослин та сповільнення зростання вмісту CO_2 в атмосфері та темпів зміни клімату [7]. Останнє, значно посилює науковий інтерес до ОКГ, який зараз розглядається як основний компонент глобального циклу С, що забезпечує можливості для пом'якшення наслідків кліматичних змін. Беручи до уваги, що загальна кількість органічного вуглецю в ґрунтах у світовому масштабі становить близько 2400 Гт (гігатонн, 10^9 т) С, а антропогенна емісія – приблизно 9,4 Гт С на рік, дослідники підраховали, що щорічне збільшення запасу С в ґрунті на 0,4 % може теоретично компенсувати річні викиди ($2400 \cdot 0,4 = 9,6$) [8]. Вважають також [9], що протягом наступних 20 років, за впровадження кращих агропрактик, додатково може бути секвестровано від 18 до 37 Гт С, тобто, у три – шість разів менше його загальних історичних втрат, про які йшлося вище.

Варто зауважити, що останнім часом з'явилися критичні публікації, щодо успішності такої ініціативи [10, 11, 12]. Так, Kurganova et al. [12] встановили, що заростання ріллі природною рослинністю супроводжувалося нагромадженням у ґрунті органічної речовини, зокрема, у верхньому (0–20 см) шарі швидкість секвестрації $\text{C}_{\text{орг}}$ у перші 20 років (1990–2009) становила 0,96 т/га за рік (0,04 % або 0,4 ‰), а в наступні 30 років прогнозується лише 0,19 т/га за рік (0,008 % або 0,08 ‰). Отже, щоб збільшити вміст $\text{C}_{\text{орг}}$ в ґрунті на 4 проміле, навіть у верхньому його шарі, середньорічні розміри секвестрації повинні становити не як заявлено в Ініціативі, а мінімум на порядок більше [10]. Відомий німецький ґрунтознавець М. Körschens, який вивчав тривалу динаміку гумусу в польовому стаціонарі (закладений у 1902 р.) в Бад-Лаухштедті (Німеччина) та узагальнив дані за вмістом $\text{C}_{\text{орг}}$ в ґрунтах інших 79 тривалих дослідів, вважає, що ця "ініціатива" має спекулятивний характер і знаходиться за межами будь-якої реальності [11].

Мета дослідження. Враховуючи сьогодиншій глобальний тренд пошуку шляхів декарбонізації педосфери, без сумніву, увага дослідників перш за все повинна бути спрямована на механізми процесів накопичення і збереження (стабілізації) органічних сполук карбону у ґрунтах [13]. Саме педосфера належить до трьох найбільших резервуарів органічних сполук суходолу, в двометровій товщі якої депоновано до 2060 ± 215 Пг С [14], що значно більше, ніж сукупно акумульовано в атмосфері (~800 Пг С) та надземній рослинності (~500 Пг С) [15, 16, 17]. Вважають, що близько 40 % світових запасів ОР міститься в ґрунтах лісових екосистем [18], які на сьогодні є гарячою точкою (hotspot) глобального процесу С-секвестрації і С-депонування. На підставі вищенаведеного, метою публікації є інформування українського читача про останні здобутки світової науки з проблеми захисту ОКГ від біодеструкції за різного типу екосистем і землекористування.

Для уникнення полісемії термінів та уточнення існуючої термінології з досліджуваної проблеми, Б.М. Когут і В.М. Семенов [10] запропонували відрізнити поняття С-секвестрації та С-депонування. Депонування органічного карбону в ґрунті — це довгострокове його запасання переважно у формі гумусу з періодом повного розкладання (мінералізації) складових його компонентів >100 років та/або захоронення неживої органічної речовини в ґрунтовому профілі на глибині >50(100) см. Якщо секвестрація карбону обов'язково передбачає асимілювання атмосферного CO_2 завдяки отриманню додаткових кількостей біомаси, то депонування запобігає швидкому поверненню $\text{C}_{\text{орг}}$ з

ґрунту в атмосферу. В цілому, розумне поєднання процесів секвестрації та депонування органічного карбону стане ефективним вирішенням триєдиного агроекологічного завдання: підвищення або збереження гумусованості ґрунту, збільшення урожайності сільськогосподарських культур та скорочення емісії вуглекислого газу з поверхні ґрунту в атмосферу з багатьма іншими позитивними ефектами.

Необхідно врахувати й те, що глобальне потепління може спричинити посилення емісії CO₂ від 100 до 600 Гт [19], а навіть незначні зміни в запасах органічних речовин ґрунту (ОРГ) суттєво впливатимуть на глобальний цикл карбону [20]. Зрозуміло, що у разі інтенсифікації парникового ефекту, викликаного підвищенням у приземній атмосфері концентрації CO₂, CH₄ і NO_x, в т.ч. і за рахунок продуктів посиленої мінералізації органічної частини ґрунту, вкрай необхідними будуть ефективні багаторівневі способи її стабілізації: від рівня елементарних ґрунтових частинок до мікро- і макроагрегатів.

2. Основний зміст роботи

На сьогодні, одним із таких добре відомих С-протекторних механізмів є зв'язування свіжих ґрунтових органічних речовин, що постійно надходять до ґрунту у складі листового і кореневого відпадів, ризодепозитів, мортмаси мікробних тіл тощо, дрібнодисперсною мінеральною матрицею (<20 μm) та у процесі агрегатоутворення [21]. Саме, фізико-хімічний захист органічних речовин є головним механізмом їх стабілізації і включає (а) сорбційні явища, що реалізуються за допомогою мінералів фракцій пилу та глини (<50 μm), тобто, утворення органо-мінеральних комплексів, (б) фізичне ізолювання органічних субстратів від ґрунтової біоти та зменшення дифузії кисню в дрібні агрегати, необхідного для процесу окиснювальної мінералізації ОР [21, 22] та (в) власне особливості хімічного складу та будови органічних речовин, які забезпечують їхню стійкість до біодеструкції [23]. З іншого боку, відомо, що карбонізація ґрунту, за участі мінеральної матриці, має певну верхню межу або рівень С-насичення (Carbon Saturation Capacity) [24]. Отже, контроль цієї межі повинен враховувати не тільки роль окремих мінеральних структур <20(50) μm, але й наявність певних ієрархічних механізмів стабілізації ОР: органо-мінеральні комплекси — мікроагрегатоутворення — макроагрегатоутворення [22]. Показано, що висока концентрація ОКГ теж пов'язана з агрегатоутворенням [16, 25], причому ґрунти з дрібнодисперсною матрицею здатні до утворення агрегатів усіх розмірів. Відповідно до дослідження Zhang et al. [25] макроагрегати (>0,25 мм) сприяють найбільшому накопиченню ОКГ. Формування макро- або мікроагрегатів залежить від вихідного матеріалу, включно з пилом і дрібним піском, а також від кількості та якості органічної речовини, значна частина якої надходить із підстилки, мікробних залишків та корневих ексудатів [26, 27]. Враховуючи високу реакційну здатність фракцій глини (за Аттербергом <2 μm) та дрібного пилу (<2-20 μm), більшість досліджень з депонування карбону у педосфері пов'язані з його стабілізуванням саме дрібнодисперсною частиною мінералів. За останні 25 років, такі дослідження виконано у США, Нідерландах, Канаді, Австралії, Новій Зеландії, Франції, Німеччині, Аргентині, Чилі, Іспанії [28]. Розроблено концепцію С-насичення ґрунту (Carbon Saturation, CS), яка дає можливість оцінити максимальну кількість карбону органічних сполук, яку можуть стабілізувати дрібнодисперсні частинки ґрунту і, розрахувати, відповідно, дефіцит С-насичення ґрунту (Saturation Deficit, SD) як різницю між поточним вмістом C_{орг} у фракціях розміром <20 μm та прогнозованим [29]. У 1997 р. Jan Hassink, з Вагенінгенського університету (Нідерланди), опублікував статтю «Здатність ґрунтів зберігати органічні С і N шляхом їх зв'язування з частинками глини та мулу» [24] і запропонував формулу розрахунку їх максимальних умістів, які можуть зберігатися в ґрунті завдяки асоціації з мінеральними частинками <20 μm (1):

$$C_{org} (г \cdot кг^{-1}) = 4,09 + 0,37 \cdot \% < 20 \mu m; (r = 0.89) \quad (1)$$

Дещо раніше [29] цей дослідник встановив залежність між відносними умістами карбону в ґрунті (%) та мінеральних частинок <50 μm (2):

$$C_{org} (\%) = 2.25 + 0,0436 \cdot \% < 50 \mu m (r^2 = 0.62) \quad (2)$$

У цих дослідженнях він також встановив важливий факт, що за обробітку ґрунту сильніше зменшується вміст С і N у фракції >20 μm, ніж у фракції <20 μm, тобто, С і N пов'язані з фракцією <20 μm значно міцніше і, відповідно, краще захищені від розкладання ґрунтовою біотою. Раніше теж було показано, що в орних ґрунтах більша частина ОКГ міститься саме у фракціях глини та пилу, тоді як у лісових та пасовищних ґрунтах — локалізована у піщаних фракціях [30, 31]. У 1997 році J. Hassink і A. Whitmore запропонували імітаційну модель, що описує поведінку органічної речовини в ґрунті з урахуванням її стабілізації [32]. Суттєва інновація цієї моделі полягала в тому, що вона враховувала С-захист як функцію адсорбції органічних речовин на частинках глини та пилу. За цих умов,

інтенсивність розкладання органічної речовини залежала не від текстури ґрунту, а величини його С-захисної ємності, пов'язаної зі ступенем насичення (вільною поверхнею) мінеральної матриці, здатної взаємодіяти з органічною речовиною. Розрахунки (3, 4), виконані за допомогою цієї моделі, максимальної здатності ґрунтів захищати органічні речовини (Carbon Protective Capacity, CPC) показали її тісний зв'язок з умістом фракцій глини та пилу в ґрунтах:

$$CPC, \text{мгС} \cdot \text{кг}^{-1} = 20,6 + 0,232 \cdot \% < 50 \text{ мкм} \quad (3)$$

$$CPC, \text{мгС} \cdot \text{кг}^{-1} = 22,0 + (0,356 \cdot \% < 2 \text{ мкм}) + (0,142 \cdot \% (2 - 50) \text{ мкм}) \quad (4)$$

Згодом, суттєвий внесок у визначення протекторної здатності дрібнодисперсної частини мінералів ґрунту зробили дослідники J. Six et al. [21] з Лабораторії екології природних ресурсів Університету штату Колорадо (США). Вони встановили С-протекторну здатність мінеральної матриці ґрунту ($\text{г} \cdot \text{кг}^{-1}$) за різних типів екосистеми (ліс, пасовище (пас) та рілля (орн)):

$$CPC (\text{орн}) = 4,38 + 0,26 \cdot \% < 20 \text{ мкм} (r^2 = 0.41) \quad (5)$$

$$CPC (\text{пас}) = 2,21 + 0,42 \cdot \% < 20 \text{ мкм} (r^2 = 0.44) \quad (6)$$

$$CPC (\text{ліс}) = -2,51 + 0,63 \cdot \% < 20 \text{ мкм} (r^2 = 0.55) \quad (7)$$

$$CPC (\text{орн}) = 7,18 + 0,20 \cdot \% < 50 \text{ мкм} (r^2 = 0.54) \quad (8)$$

$$CPC (\text{пас}) = 16,33 + 0,32 \cdot \% < 50 \text{ мкм} (r^2 = 0.35) \quad (9)$$

$$CPC (\text{ліс}) = 16,24 + 0,24 \cdot \% < 50 \text{ мкм} (r^2 = 0.35) \quad (10)$$

а також типу вторинних мінералів та різних розмірних діапазонів фракцій пил+глина:

$$CPC (1:1) = 1,22 + 0,30 \cdot \% < 20 \text{ мкм} (r = 0.86) \quad (11)$$

$$CPC (2:1) = 3,86 + 0,41 \cdot \% < 20 \text{ мкм} (r = 0.62) \quad (12)$$

$$CPC (1:1) = 5,50 + 0,26 \cdot \% < 50 \text{ мкм} (r = 0.62) \quad (13)$$

$$CPC (2:1) = 14,76 + 0,21 \cdot \% < 50 \text{ мкм} (r = 0.26) \quad (14)$$

Примітка:

1:1 – мінерали групи каолініту (каолініт, дикіт, накрит, галуазит);

2:1 – смектити: група монтморилоніту (монтморилоніт, нонтроніт, бейделіт, сапоніт, гекторит); група глауконіту (глауконіт, сколіт, селадоніт) та гідроліти (іліт, вермикуліт); хлорит.

У зв'язку з цим, необхідно враховувати, що сорбційна здатність глин щодо органічних речовин залежить від їх питомої площі поверхні ($\text{м}^2 \text{г}^{-1}$) [33], яка змінюється від 2–4 для кварцу [34], 10–70 каолініту, хлориту та слюди [35], 50–100 іліту, до 800 смектиту і вермикуліту [36]. З іншого боку, ефект впливу мінералогічного складу (глини 2:1 та 1:1) на CPC залишається суперечливим, оскільки, зразки ґрунту, багаті високоактивною глиною (2:1, смектитами) не містять ОКГ більше, ніж за переважання низькоактивної глини (1:1, каолініту) [22]. Л. Травникова [37], порівнюючи концентрації карбону в мулі з його мінералогічним складом, виявила, що у разі переважання монтморилоніту, карбону містилося не більше 2–3 %, а іліту — до 12–13 %, тобто, мінерали з жорсткою структурою мають більшу С-зв'язувальну здатність.

F. Caravaca et al. [38] теж встановили, що вміст органічного С у фракціях $< 2 \text{ мкм}$ і 2–20 мкм не залежали від мінералогічного складу глинистих мінералів, а більше пов'язані з ефективністю управління родючістю ґрунту і типом землекористування: лісові ґрунти мали більші С і N концентрації, ніж орні. З іншого боку, як на орних, так і лісових ґрунтах фракція дрібного пилу розміром частинок 2–20 мкм була багатшою на органічний С, ніж фракція глини розміром $< 2 \text{ мкм}$. Стабільність макроагрегатів (0,2–4 мм), схоже, не залежала від частки органічної речовини у дрібнодисперсних мінеральних фракціях ($< 20 \text{ мкм}$), а краща захищеність від мікробної деструкції агрегатів у лісових ґрунтах ймовірно пов'язана з умістом у них лабільної органічної речовини.

Карбонопротекторну здатність частинок менше 53 мкм описали також канадійські дослідники Carter et al. [39] за даними Elustondo et al. [40], як просту лінійну регресію:

$$CPC = 9.04 + 0,27 \cdot (\% < 53 \text{ мкм}) \quad (15)$$

Автори зробили висновок, що ґрунти з умістом фракцій пил+глина $< 40 \%$, як правило, насичені органічними речовинами, тоді як за їх умісту понад 60 % — С переважно накопичується у фракції пилу; значна частка (близько 60 %) органічного С зберігалася також у водостійких агрегатах (WSA). Автори припускають, що як тільки фракції глини+пил наситяться карбоном, тоді у ґрунті поступово збільшуватиметься частка вільної дисперсної органічної речовини (Particulate Organic Matter, POM, C_{POM}).

Актуальний вміст карбону в лісових і тривало орних ґрунтах F. Matus et al. (2008) порівняли із їх С-захисною здатністю (очікуваним максимальним вмістом С, пов'язаним із глинистими та пиловими фракціями) [41]. Актуальний вміст органічного С лісового ґрунту був значно більшим за розраховану захисну здатність, при цьому багаті глиною ґрунти в середньому на 141 % перевищували прогнозовану межу С-насичення, а грубодисперсні — лише на 56 %. Навпаки, вміст С в орних ґрунтах був меншим за розраховану захисну

здатність у середньому на 32–60 %. Звідси видно, що (а) здатність лісових ґрунтів зберігати органічний карбон в глинистих і пилових частинках була більшою, ніж в орних ґрунтах; (б) у високонасичених карбоном ґрунтах N-мінералізація є функцією вмісту свіжої органічної речовини, яка, своєю чергою, накопичується у вигляді C_{DOM} у фракціях піску.

F. Matus et al. (2011) виявили, що асоційований з пилом карбон, на відміну від асоційованого з глиною, збільшується лінійно із загальним вмістом C_{org} . Карбон, локалізований у фракції грубого піску, найбільш чутливо реагував на агрозаходи, виявляючи таким чином високоінформативний діагностичний пул для оцінки змін ОРГ під впливом обробітку ґрунту [42].

Окремі дослідники вважають, що у разі використання для розрахунків СПС рівнянь лінійної регресії найменших квадратів (least-squares linear regression) значно занижується максимальна величина потенціалу С-стабілізації дрібнодисперсною мінеральною частиною ґрунту [43]. Тому, з метою поліпшення прогнозів максимального рівня стабілізації C_{org} , запропоновано використовувати два альтернативних підходи: механістичний (organic C loadings), заснований на органічному С-навантаженні [44] і статистичний, на основі аналізу граничних значень (boundary line analysis). Зауважимо, що у разі аналізу граничних значень, використовують лише ті дані, що досягли максимальних рівнів, тому, у разі застосування лінійної регресії найменших квадратів максимальний рівень стабілізації становив $33 \pm 1 \text{ г С кг}^{-1}$, а за використання аналізу граничних значень – $78 \pm 4 \text{ г С кг}^{-1}$. Ці результати показують, що модель лінійної регресії найменших квадратів недостатньо прогнозує величину максимальної С-стабілізації. Відомо також, що величини СПС орних ґрунтів, якщо оцінювати їх як функцію дрібнодисперсної мінеральної фракції ґрунту, як правило, більші, порівняно з лісовими екосистемами, що припускає їх С-ненасиченість [45, 46] і, відповідно, більший потенціал С-секвестрування. Встановлено також, що у лісових ґрунтах біля 60 % C_{org} не було пов'язано з пилом і фракцією глини [45], а актуальний вміст C_{org} в них значно перевищував передбачувану С-ємність мінеральної матриці [45, 47]. Ймовірно, це пов'язано з участю інших чинників стабілізації ОР (наприклад, реакційноздатні поверхні оксидів Fe та Al). За цих умов використання методу лінійної регресії найменших квадратів для оцінки СПС, за врахування тільки ролі мінеральних фракцій $<20/50 \text{ }\mu\text{m}$, буде недостатньо інформативним.

F. Matus et al. (2016) висунули гіпотезу, що та орґано-мінеральна фракція, яка відображає в динаміці лінійне С-накопичення синхронно зі збільшенням вмісту ОКГ, не є С-насиченою, тоді як фракція, що демонструє асимптотичну залежність, розглядається як С-насичена [49]. Автори продемонстрували позитивний ($P < 0,01$) зв'язок між C_{org} та вмістом С у фракції пилу ($R^2 = 0,80\text{--}0,97$, $P < 0,01$), тоді як вміст С у фракції глини залишався практично незмінним. Отже, фракція пилу, на відміну від глини, не була С-насиченою, а глина, за цих умов, накопичила максимально можливий вміст С. В середньому, фракція пилу ґрунтів помірного поясу з мінералогічним складом типу 2:1 насичувалася при $1\text{--}2 \text{ г С кг}^{-1}$, а 1:1 — при 1 г С кг^{-1} , тоді як субтропічні ґрунти — 14 г С кг^{-1} . Результати цього дослідження також підтверджують раніше зроблені висновки, що фракція глини першою (в часі) досягає максимального С-насичення, а коли цей максимум досягнуто, подальші надходження свіжої органічної речовини вже не можуть бути фізично захищені фракцією глини й органічні сполуки поступово накопичуються у фракції пилу, а також у формі незв'язаних дисперсних твердих частинок (РОМ) або вільних органічних речовин, у піщаних фракціях [41].

Оскільки, у переважній більшості досліджень головну увагу у визначенні СПС ґрунтів приділяють фракціям глини ($<2 \text{ }\mu\text{m}$) і дрібного пилу ($2\text{--}20 \text{ }\mu\text{m}$), то, за відсутності таких даних, її вміст оцінювали за даними вмісту загального пилу ($2\text{--}50 \text{ }\mu\text{m}$) з використанням рівняння регресії: $y = 0,676x^{1,01}$ ($R^2 = 0,92$) [50]. Для розрахунку СПС орних ґрунтів Аргентини під пшеницею автори запропонували відповідні рівняння з використанням методів лінійної регресії (16) та граничних значень (17):

$$\text{СПС (мг} \cdot \text{г}^{-1} \text{ ґрунту)} = 3,86 + 0,41 \cdot (\% < 20 \text{ }\mu\text{m}) \quad (16)$$

$$\text{СПС (мг} \cdot \text{г}^{-1} \text{ ґрунту)} = 0,84 \cdot (\% < 20 \text{ }\mu\text{m}) \quad (17)$$

Також було встановлено, що СПС ґрунту у шарі $0\text{--}0,25 \text{ м}$, за використання квантильної регресії для 25 % даних з максимальними значеннями, була на 10 % більшою, ніж оцінено за методом Feng et al. [43] – рівняння (17) та 77 % більше, ніж за рівняння Six et al. [21] — (16).

F. Matus [51] виконав, за вимогами стандарту (PRISMA), мета-аналіз результатів 15-ти досліджень, в яких у рівняннях СПС враховувалися вмісти мінеральних частинок $<63 \text{ }\mu\text{m}$ та 17-ти досліджень — частинок $<20 \text{ }\mu\text{m}$. Враховуючи, що вмісти пилу та глини є головними чинниками, які визначають верхній рівень СПС, автор запропонував для оцінки потенціалу С-секвестрації модель лінійної регресії (18) із нахилами прямої β_c , незалежно

від типу землекористування та клімату, рівними $0,83 \pm 0,02$ для С — (пил+глина) $<63 \mu\text{m}$ та $0,81 \pm 0,02$ для С- (пил+глина) $<20 \mu\text{m}$:

$$y = y_0 + \beta C \cdot \omega \quad (18)$$

де β_C — нахил регресії С- (пил+глина), і y_0 — величина перетину або підвищення регресії, які вважають рівними нулю, ω — вміст $C_{\text{орг}}$ у ґрунті.

В цілому, у даному дослідженні, нахили регресії (рівняння 18) коливались від $0,72 \pm 0,03$ до $0,88 \pm 0,04$, відображаючи, що 72–88 % загального вмісту С і N у ґрунтах пов'язано з пилом та глиною. Для вмісту С в глинистій фракції нахил регресії становив $0,28 \text{ г г}^{-1}$, тоді як у фракції пилу — $0,49 \text{ г г}^{-1}$. Отримані результати добре узгоджувалися з даними Angers et al. [47], які оцінили потенціал СРС для 1,5 млн зразків орних ґрунтів Франції та виявили, що 85 % загального вмісту ОКГ пов'язано з мінеральними частками $<20 \mu\text{m}$. Подібне встановлено для орних ґрунтів Східної Канади, в яких 73 % ОКГ було зв'язано у фракції $<50 \mu\text{m}$, а 27 % становила фракція POM [39]. A. Cai et al. [52] досліджували зміни відносного вмісту частки С, асоційованої з фракцією $<53 \mu\text{m}$, у загальному вмісті $C_{\text{орг}}$ під впливом клімату, типу та гранулометричного складу ґрунту, включаючи посівні площі, луки та лісові ґрунти Китаю і встановили, що вона варіювала від 27 до 80 %, на відміну від значно вужчого діапазону, показаного в інших дослідженнях, охоплених мета-аналізом [28].

Нещодавно, дослідники з Нової Зеландії для оцінки С-стабілізації запропонували квантильну модель регресії, засновану на питомій площі поверхні мінеральної матриці та вмісті алюмінію (пірофосфатна витяжка), яка забезпечила найкращий прогноз верхньої межі СРС для фракції $<50 \mu\text{m}$ [53]. В інших дослідженнях теж спостерігали сильні зв'язки між вмістом карбону та питомою поверхнею окремих мінеральних фракцій [54, 55].

Останнім часом збільшилося число досліджень, в яких рекомендують розділяти ОКГ на не зв'язані (POM) та асоційовані з мінералами (MAOM) форми, тобто, два його компоненти, які принципово відрізняються за своїм утворенням, біотичною стійкістю та функціонуванням [56, 57, 58, 59]. Автори надали докази їх дуже контрастних фізичних та хімічних властивостей, середнього часу перебування в ґрунті та реакції на агрогенні та інші впливи. Зрештою, використання денсиметричного фракціонування у дослідженнях ОКГ на POM і MAOM є найкращим шляхом до розуміння та прогнозування широкомасштабної динаміки ОКГ в контексті глобальних кліматичних викликів та надання необхідних рекомендацій щодо цього відповідним керівникам та політикам.

Як показали дослідники з Бангладеш [60], характер землекористування по-різному впливав на вміст карбону у фракціях POM і MAOM. У всіх випадках вміст POM був найбільшим у садових ґрунтах ($0,72\text{--}1,91\%$) > перелогах ($0,81\text{--}1,61\%$) > під луками ($0,60\text{--}1,84\%$) > орних ґрунтах ($0,40\text{--}1,41\%$) і, навпаки, вміст MAOM був найбільшим на перелозі ($0,81\text{--}1,91\%$) > під луками ($0,72\text{--}1,81\%$) > орними ґрунтами ($0,70\text{--}1,61\%$) > під садом ($0,53\text{--}1,51\%$), причому для всіх досліджуваних агроекологічних зон вміст MAOM був суттєво більшим за POM, крім ґрунтів під садом.

В окремих роботах, крім безпосередньої оцінки С-секвеструвальної здатності мінеральної матриці, досліджували вплив на процес акумулювання ОКГ інших біотичних і абіотичних чинників (природної рослинності, мікроорганізмів ґрунту, фауни ґрунту, типу ґрунту, текстури, агрегації, оксидів металів, катіонів Ca і Mg, землекористування та управління, топографії та клімату) [61, 62]. Так, результати поетапного множинного регресійного аналізу показали, що кислотність та гранулометричний склад найсильніше впливають на запаси С в мінеральних ґрунтах [63], причому найвищі концентрації ОКГ виявлені в сильноокислих ґрунтах (pH 2,66–3,61), що добре узгоджується з результатами інших досліджень, в яких показано роль кислотності ґрунту як одного з ключових факторів С-депонування [16]. Результати цих досліджень також показали, що пилуваті (silty) ґрунти мають більш запаси ОР.

Для отримання детальнішої інформації про зміни якості ОР та мінералогічного складу окремих фракцій також використовують інфрачервону спектроскопію з перетворенням Фур'є і дифузним відбиттям (DRIFT) [64, 65].

Раніше, в Україні М.І. Полупан із співавторами [66] на підставі співвідношення вмісту гумусу і фізичної глини у шарі ґрунту 0–30 см (віднесеної до 10 % останньої), запропонували критерій інтенсивності гумусонакопичування (КВАГ) в зональних ґрунтах для діагностування їхнього підтипового рівня та гідроморфності. Згодом, з урахуванням співвідношення між умістом гумусу і фізичної глини за профілем ґрунту, розроблено кількісну діагностику ґрунтів різного ступеню гідроморфності однолесових терас річок Лівобережного Лісостепу України [67].

Застосувавши педотрансферне моделювання [68], що дозволяє визначати одні властивості ґрунтів за іншими, які вимірюються простіше й дешевше, В. Медведєв зі співавторами [69] на основі інформації, зібраної в базі даних «Властивості ґрунтів

України», встановили сильну логнормальну залежність (19) між умістами фізичної глини <0,01 мм, % (y) та гумусу, % (x):

$$y, \% = 9,24 \ln(x) + 35,84 \quad (19)$$

Авторами також встановлена залежність вмісту гумусу від гранулометричного складу. На жаль, ця логнормальна залежність успішно реалізується лише для відносно вузького діапазону дисперсності мінеральної матриці (з умістом фізичної глини 40–70 %). Видно, з цієї причини у більшості досліджень, за використання педотрансферного моделювання С-протекторної здатності ґрунту, застосовують рівняння лінійної регресії найменших квадратів [10, 21, 24, 39].

Білоруські дослідники [70] також вважають, що вивчення взаємозв'язків гумусового стану і гранулометричного складу є актуальним і вказують на необхідність пошуку нових методів для оцінки ступеня стійкості ґрунтів.

Для кількісної оцінки процесів гумусонакопичення в ґрунтах техногенних ландшафтів Д. Соколов [71] запропонував літогенний потенціал гумусонакопичення (ЛПГ), як здатність мінеральної частини вихідного субстрату за певний проміжок часу і найсприятливіших умов, акумулювати максимально можливу кількість органічної речовини та набувати ознак ґрунтового профілю, що відповідає конкретним природно-кліматичним умовам. З такого визначення виходить, що для оцінки ЛПГ досліджуваних об'єктів важливі два критерія – вміст та якість дрібнодисперсних частинок мінерального субстрату, з якими взаємодіє органічна речовина. Виходячи з цього, ЛПГ виражають такою формулою (20):

$$\text{ЛПГ} = R(e) \cdot R(t.ф.) \cdot R(п.з.), \quad (20)$$

де ЛПГ — літогенний потенціал гумусонакопичення, %; $R(e)$ — максимальний вміст гумусу в еталонному ґрунті. $R(t.ф.)$ — коефіцієнт специфічності досліджуваних ґрунтів за вмістом дрібнодисперсних фракцій, який розраховується як відношення вмісту фізичної глини в досліджуваному ґрунті до вмісту в еталонному ґрунті і вимірюється в частках від одиниці. $R(п.з.)$ — коефіцієнт специфічності досліджуваних ґрунтів за вбирною здатністю мінеральної частини (ємність катіонного обміну, ЕКО), в частках від одиниці. Розраховується як відношення вбирної здатності ґрунтоутворювальних порід техногенних ландшафтів (техногенного елювію) до еталону (лесоподібних суглинків). У разі застосування вищепри описаного методичного підходу виникає ряд труднощів, пов'язаних із встановленням еталонного ґрунту, тобто фонового ґрунту території досліджень з максимальними вмістами органічної речовини і фізичної глини, а також визначеннями вбирної здатності цього ґрунту. Як правило, на досліджуваній території, до початку розробки кар'єрів, ґрунтовий покрив часто буває строкатим як за вмістом органічної речовини, так і дисперсності мінеральної частини.

Варто теж згадати про існуючий альтернативний погляд на механізм утворення органо-мінеральних комплексів. Припускають, що не органічні речовини покривають поверхню і пори мінералів, а, навпаки, з появою у ґрунтового середовищі свіжої мортмаси рослин і мікробіоти, її покривають дрібнодисперсні мінеральні частинки, утворюючи спочатку органоглинисті комплекси, а згодом – ультрамікро- та мікроагрегати. Ймовірно, що у цих процесах певну роль відіграють сесквіоксиди Al і Fe. Останнє, є важливим з огляду на визначення т. зв. ємності зв'язування мінеральною матрицею ОР, оскільки її поверхня є лімітованою, а значить і, відповідно, її С-протекторний потенціал. У протилежному випадку, обмежувальним чинником цього процесу буде кількість і якість (гідрофільно-гідрофобний баланс) свіжої мортмаси, її реакційна здатність. За цього випадку, важливою є теж реакційна здатність мінеральних структур, їхня поверхнева активність [72].

Ще однією проблемою, яка ускладнює використання інноваційних розробок закордонних вчених в контексті С-секвестрації є неспівставність вітчизняної і міжнародної класифікацій гранулометричного складу ґрунту. За Міжнародною трьохчленною класифікацією, запропонованою шведським вченим А. Аттербергером (1912): <0,002 мм — глина, 0,002–0,05 мм — пил, 0,05–2 мм — пісок та використовуваною у вітчизняному ґрунтознавстві класифікацією Н. А. Качинського (1957): фізична глина <0,01 мм, в т.ч. <0,001 мм — мул, 0,001–0,01 мм — пил, 0,05–1,0 мм — пісок наявні суттєві відмінності. Враховуючи, широке використання Міжнародної класифікації товариства ґрунтознавців (SSSA) і товариства агрономів (ASSA) США, у сучасному світовому ґрунтознавстві, ймовірно, настав час переходу вітчизняного ґрунтознавства на трьохчленну систему оцінки гранулометричного складу. Останнє дозволить пришвидшити інтегрування наших дослідників у світовий простір, а результати вітчизняних досліджень поповнять інформаційну базу для мета-аналізів результатів досліджень, пов'язаних з роллю мінеральної частини ґрунту у секвеструванні карбону органічних сполук. На важливість цієї проблеми ще у 2011 році звернула увагу Т. М. Лактіонова з ННЦ «Інститут ґрунтознавства та агрохімії імені О. Н. Соколовського НААН України [73]. Детально

проаналізувавши наукові публікації стосовно 15 відомих світових класифікацій гранулометричного складу ґрунтів і способів трансферу між ними та власними дослідженнями вона довела, що за наявності даних, отриманих за методикою Н.А. Качинського, цілком можливо адекватно розрахувати вміст необхідних, але не вимірюваних фракцій. В основу такого методичного підходу покладено графічний спосіб визначення фракції глини (<0,002 мм) з використанням інтегральної кривої розподілу фракцій, а для розрахунків застосували формулу Є. В. Шеїна [74], де вміст глини визначається через вміст мулу (<0,001 мм) і дрібного пику разом з мулом (<0,005) рівнянням (21):

$$\Phi < 0,002 = 0,57\Phi < 0,001 + 0,43\Phi < 0,005, \quad (21)$$

де Φ – вміст фракції певного розміру.

При цьому, Т. М. Лактіонова слушно застерігає, що такий спосіб конверсії полягає у тому, щоб, використовуючи вже напрацьований міжнародним науковим досвідом математичний апарат і наявні у вітчизняних ґрунтознавців результати аналізів гранулометричного складу за методом Н.А. Качинського (вміст 7 фракцій, %), якомога точніше визначити вміст трьох об'єднаних фракцій (пісок, пил, глина), які застосовують у міжнародній класифікації USDA/FAO і дати, таким чином, міжнародну назву гранулометричному складу ґрунту. Нещодавно російські вчені теж вказали на доцільність зміни в національній класифікації межі фракції мулу на розмір 2 мкм, оскільки це не змінить принципів визначення класу ґрунтів за гранулометричним складом, але значно полегшить зіставлення результатів, отриманих дослідниками з різних країн [75]. До того ж це скоротить час відбирання проби для визначення мулистий фракції піпет-методом приблизно в 3 рази (8 год замість 24).

3. Висновки

Розглянуто світовий досвід розробок та застосування математичних моделей для оцінки потенціалу стабілізації органічних сполук карбону, головно, мінеральною матрицею ґрунтів (<20 і <50 μm) з використанням рівнянь лінійної регресії найменших квадратів, аналізу граничних значень та інших методичних прийомів. Охарактеризовано існуючі підходи до оцінювання захисної ємності ґрунту щодо карбону (Carbon Protective Capacity), насиченості карбоном мінеральної матриці (Carbon Saturation, CS), дефіциту С-насичення ґрунту (Saturation Deficit), а також функціональні особливості процесів С-секвестрації і С-депонування. Вказано на необхідність переходу в Україні на тричленну класифікацію гранулометричного складу ґрунту як важливий крок до інтегрування сучасного вітчизняного ґрунтознавства у світовий контекст.

Список використаних джерел

1. Sanderman J., Hengl T., Fiske G.J. Soil carbon debt of 12,000 years of human land use. *PNAS*. 2017. Vol. 114 (36). P. 9575–9580. <https://doi.org/10.1073/pnas.1706103114>.
2. Amundson R., Biardeau L. Soil carbon sequestration is an elusive climate mitigation tool. *PNAS*. 2018. Vol. 115(46). P. 11652–11656. <https://doi.org/10.1073/pnas.1815901115>.
3. Управління органічним вуглецем ґрунту в контексті продовольчої безпеки й змін клімату / С.А. Балюк, В.В. Медведєв, А.В. Кучер [та ін.]. *Вісник аграрної науки*. 2017. 9. С. 11-18. <https://doi.org/10.31073/agrovysnyk201709-02>
4. Цілі сталого розвитку України. Національна доповідь. URL: <https://www.kmu.gov.ua/diyalnist/cili-stalogo-rozvitku-ta-ukrayina> (дата звернення: 11.08.2021).
5. Scientific Conceptual Framework for Land Degradation Neutrality. A report of the Science-Policy Interface. URL: <https://www.unccd.int/publications/scientific-conceptual-framework-land-degradation-neutrality-report-science-policy> (дата звернення: 11.08.2021).
6. The 4 per 1000 Initiative in a few words. URL: <https://www.4p1000.org/4-1000-initiative-few-words> (дата звернення: 11.08.2021).
7. Basile-Doelsch I., Balesdent J., Pellerin S. Reviews and syntheses: The mechanisms underlying carbon storage in soil. <https://doi.org/10.5194/bg-2020-49> Preprint. Discussion started: 19 February 2020.
8. Soil carbon 4 per mille / B. Minasny, B.P. Malone, A.B. McBratney [et al.]. *Geoderma*, Elsevier. 2017. 292. P. 59-86. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.01.002>.
9. Global Sequestration Potential of Increased Organic Carbon in Cropland Soils / R.J. Zomer, D.A. Bossio, R. Sommer [et al.]. *Sci Rep*. 2017. 7, 15554. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-15794-8>.
10. Когут Б.М., Семенов В.М. Оценка насыщенности почвы органическим углеродом. *Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева*. 2020. Вып. 102. С. 103-124. <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2020-102-103-124>
11. Körschens M. Soil – Humus – Climate. Practically relevant results of 79 long-term field experiments // Vortrag zum 2. Symposium "Wahrnehmung und Bewertung von Böden in der Gesellschaft am 12 Oktober 2018 im UFZ Leipzig". 2018. 12 p.
12. Kurganova I.N., Lopes de Gerenyu V.J., Six J., Kuzyakov Y. Carbon cost of collective farming collapse in Russia // *Glob. Change Biol*. 2014. Vol. 20(3). P. 938-947. <https://doi.org/10.1111/gcb.12379>.

13. Гамкало З.Г., Шпаківська І.М., Марискевич О.Г. Оцінка потенціалу стабілізації сполук карбону в ґрунті: теоретико-методичні підходи // Екологія, охорона навколишнього середовища та збалансоване природокористування: освіта–наука–виробництво. 36. тез доп. XXIV Міжн. наук.-практ. конф., (Харків, 29-30 квітня 2021 року). Харків: ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2021. С. 29-32.
14. Batjes N.H. Harmonized soil property values for broad-scale modelling (WISE30sec) with estimates of global soil carbon stocks. *Geoderma*. 2016. Vol. 269. P. 61-68. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.01.034>.
15. FAO and ITPS. Status of the World's Soil Resources (SWSR) – technical summary. *Food and Agriculture Organization of the United Nations and Intergovernmental Technical Panel on Soils*. Rome. 2015. ISBN 978-92-5-108960-6.
16. Ecosystem carbon stock loss after land use changing subtropical forests in China / S. Fan, F. Guan, X. Xu [et al.]. *Forests*. 2016. 7(7). P.142. <https://doi.org/10.3390/f7070142>.
17. Joseph A, Oluwakem A, Olanrewaju O. Climate change effect and adaptation measures on selected soil properties. *Journal of Soil Science and Environmental Management*. 2018. 9(10). P.154-163. <https://doi.org/10.5897/JSSSEM2018.0700>.
18. C Stocks in forest floor and mineral soil of two Mediterranean beech forests/ A. De Marco, A. Fioretto, M. Giordano [et al.]. *Forests*. 2016. 7(8). P.181. <https://doi.org/10.3390/f7080181>.
19. Soil and human security in the 21st century / R. Amundson, A.A. Berhe, J.W. Hopmans [et al.]. *Science*. 2015. Vol. 348, Issue 6235:1261071. <https://doi.org/10.1126/science.1261071>
20. Walter K, Don A, Tiemeyer B, Freibauer A. Determining soil bulk density for carbon stock calculations: a systematic method comparison. *Soil Sci Soc Am J*. 2016. Vol. 80. P. 579-591. <https://doi.org/10.2136/sssaj2015.11.0407>
21. Six J., Conant R.T., Paul E.A., Pustian K. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils. *Plant & Soil*. 2002. 241(2). P. 155-176. <https://doi.org/10.1023/A:1016125726789>.
22. Feller C., Beare M.H. Physical control of soil organic matter dynamics in the tropics. *Geoderma*. 1997. 79. P. 69-116. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(97\)00039-6](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(97)00039-6).
23. Leinweber P., Reuter G. The influence of different fertilization practices on concentrations of organic carbon and total nitrogen in particle-size fractions during 34 years of a soil formation experiment in loamy marl. *Biol. Fert. Soils*. 1992. 13. P.119-124.
24. Hassink J. The capacity of soils to preserve organic C and N by their association with clay and silt particles. *Plant Soil*. 1997. 191. P. 77-87. <https://doi.org/10.1023/A:1004213929699>.
25. Zhang X., Xin X., Zhu A., Zhang J., Yang W. Effects of tillage and residue managements on organic C accumulation and soil aggregation in a sandy loam soil of the North China Plain. *Catena*. 2017.156. P.176-183. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.04.012>.
26. Initial microaggregate formation: Association of microorganisms to montmorillonite-goethite aggregates under wetting and drying cycles / L. Krause, D. Biesgen, A. Treder [et al.]. *Geoderma*. 2019. 351. P. 250-260. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.05.001>.
27. Redmile-Gordona M., Gregory A.S., Whit R.P., Watts C.W. Soil organic carbon, extracellular polymeric substances (EPS), and soil structural stability as affected by previous and current land-use. *Geoderma*. 2020. 363. P. 114-143. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.114143>.
28. Matus F.J. Fine silt and clay content is the main factor defining maximal C and N accumulations in soils: a meta analysis. *Scientific Reports*. 2021. 11:6438 | <https://doi.org/10.1038/s41598-021-84821-6>
29. Hassink J. Effects of soil texture and grassland management on soil organic C and N and rates of C and N mineralization. *Soil Biol. Biochem*. 1994. 26. P.1221-1231.
30. Adams T.M. Macroorganic matter content of some Northern Ireland soils. *Record of Agricultural Research*. 1980. 28. P. 1-11.
31. Christensen B.T. Physical Fractionation of Soil and Organic Matter in Primary Particle Size and Density Separates. In: Stewart B.A. (eds. *Advances in Soil Science*, 1992. vol 20. Springer, New York, NY. https://doi.org/10.1007/978-1-4612-2930-8_1.
32. Hassink J., Whitmore A. A model of the physical protection of organic matter in soils. *Soil Science Society of America Journal*. 1997b. 61. P. 131–139. <https://doi.org/10.2136/sssaj1997.03615995006100010020x>
33. Tate K.R., Theng B.K.G. Organic matter and its interactions with inorganic soil constituents. In: *Soil with a variable Charge*. Ed. G K G Theng. New Zealand Soc. Soil Sci., Lower Hutt. 1980. P. 225–249.
34. Wilding L.P., Smeck N.E., Drees L.R. Silica in soils: quartz, cristobalite, tridymite, and opal. In: *Minerals in Soil Environments*. Ed. R. C. Dinauer. 1977. P. 471–552. SSSA, Madison, WI.
35. Huang P.M. Role of soil minerals in transformations of natural organics and xenobiotics in soil. Eds. J.M. Bollag and G. Stotzky. In: *Soil Biochemistry*, 1990. Vol. 6. P. 29–115. Marcel Dekker Inc.j.still.2018.11.001
36. Robert M., Chenu C. Interactions between soil minerals and microorganisms. Eds. G. Stotzky and J.M. Bollag. In: *Soil Biochemistry*, 1992. Vol. 7. P.307–404. Marcel Dekker Inc., New York.
37. Травникова Л.С. Закономерности гумусонакопления: новые данные и их интерпретация. *Почвоведение*, 2002. № 7. С. 832–843.
38. Caravaca F., Lax A., Albaladejo J. Aggregate stability and carbon characteristics of particle-size fractions in cultivated and forested soils of semiarid Spain *Soil & Tillage Research*. 2004. 78. P. 83–90. <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2004.02.010>.
39. Carter M.R., Angers D.A., Gregorich E.G., Bolinder M.A. Characterizing organic matter retention for surface soils in eastern Canada using density and particle size fractions. *Can. J. Soil Sci*. 2003. 83. P. 11–23. <https://doi.org/10.4141/S01-087>.
40. Elustondo J., Angers D.A., Laverdière M.R., N'Dayegamiye A. Étude comparative de l'agrégation et de la matière organique associée aux fractions granulométriques de sept sols sous culture de maïs ou en prairie. *Can. J. Soil Sci*. 1990. 70. P. 395–402. <https://doi.org/10.4141/cjss90-039>.
41. Matus F., Christopher C., Maire C.. Effects of soil texture, carbon input rates, and litter quality on free organic matter and nitrogen mineralization in Chilean rain forest and agricultural soils. *Commun. Soil Sci. Plant Anal*. 2008. 39:1-2. P. 187–201. <https://doi.org/10.1080/00103620701759137>.

42. Land use impacts on physical-based soil organic matter fractions on three hillside Ferrasols in Mexico / F. Matus, C. Hidalgo, C. Monreal [et al.]. *Chilean Journal of Agricultural Research*. 2011. 71. P. 283–292.
43. Feng W., Plante A., Six J. Improving estimates of maximal organic carbon stabilization by fine soil particles. *Biogeochemistry*. 2013. 112. P. 81–93. <https://doi.org/10.1007/s10533-011-9679-7>.
44. Feng W., Plante A.F., Aufdenkampe A.K., Six J. Soil organic matter stability in organo-mineral complexes as a function of increasing C loading. *Soil Biol. Biochem.* 2014. 69. P. 398–405. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2013.11.024>
45. Estimation of total organic carbon storage and its driving factors in soils of Bavaria (southeast Germany) / M. Wiesmeier, F. Barthold, P. Spörlein [et al.]. *Geoderma Reg.* 2014. 1. P. 67–78. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2014.09.001>.
46. Soil carbon stocks under different land uses and the applicability of the soil carbon saturation concept / S. Chen, D. Arrouays, D.A. Angers [et al.]. *Soil & Tillage Research* 2019. 188. P. 53–58. <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.11.001>.
47. Angers D.A., Arrouays D., Saby N.P.A., Walter C. Estimating and mapping the carbon saturation deficit of French agricultural topsoils. *Soil Use Man.* 2011. 27. P. 448–452. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2011.00366.x>.
48. Carbon saturation in the silt and clay particles in soils with contrasting mineralogy / F. Matus, E. Garrido, C. Hidalgo [et al.]. *Terra Latinoam. [online]*. 2016, vol. 34(3). P. 311–319.
49. Stewart C.E., Paustian K., Conant R.T., Plante A.F., Six J. Soil carbon saturation: Evaluation and corroboration by long term incubations. *Soil Biology & Biochemistry*. 2008. 40. P. 1741–1750. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2008.02.014>.
50. Alvarez R., Berhongaray G. Soil organic carbon sequestration potential of Pampean soils: comparing methods and estimation for surface and deep layers. *Soil Research*. 2021. <https://doi.org/10.1071/SR20257> www.publish.csiro.au/journals/sr
51. The PRISMA Statement for reporting systematic reviews and meta-analyses of studies that evaluate health care Interventions: Explanation and elaboration / A. Liberati, D.G. Altman, J. Tetzlaff [et al.]. *PLOS Med.* 2009. <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1000100>.
52. Cai A., Feng W., Zhang W., Xu M. Climate, soil texture, and soil types affect the contributions of fine fraction-stabilized carbon to total soil organic carbon in different land uses across China. *J. Environ. Manag.* 2016. 172. P. 2–9. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.02.009>.
53. A conceptual model of carbon stabilisation based on patterns observed in different soils/ M. Kirschbaum, G. Moineau, C. Hedley [et al.]. *Soil Biology and Biochemistry*. 2020. 141. P. 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2019.107683>.
54. Estimating the organic carbon stabilisation capacity and saturation deficit of soils: A New Zealand case study / M.H. Beare, S.J. McNeil, D. Curtin [et al.]. *Biogeochemistry*. 2014. 120. P. 71–87. <https://doi.org/10.1007/s10533-014-9982-1>.
55. Soil carbon sequestration potential of permanent pasture and continuous cropping soils in New Zealand / S.R. McNally, S. McNally, M.H. Beare [et al.]. *Glob. Change Biol.* 2017. 23. P. 4544–4555. <https://doi.org/10.1111/gcb.13720>.
56. Storage of soil carbon as particulate and mineral associated organic matter in irrigated woody perennial crops / A.J. Midwood, K.D. Hannam, T. Gebretsadikan [et al.]. *Geoderma*. December 2021, 403. Article 115185. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115185>.
57. Lavalée J.M., Soong J.L., Cotrufo M.F. Conceptualizing soil organic matter into particulate and mineral-associated forms to address global change in the 21st century. *Glob Change Biol.* 2020. 26. P. 261–273. <https://doi.org/10.1111/gcb.14859>.
58. Soil organic carbon. Stratification and spatial variation of different fractions in an Argiudoll under no tillage / M.P. Salazar, R. Villarreal, L.A. Lozano [et al.]. *Rev. Fac. Agron.* 2020. 119(2). P. 1–11. <https://doi.org/10.24215/16699513e053>.
59. Soil carbon storage informed by particulate and mineral-associated organic matter / M.F. Cotrufo, M.G. Ranalli, M.L. Haddix [et al.]. *Nature Geoscience* (IF 13.566) Pub Date: 2019-11-18. <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0484-6>
60. Effect of Land Use on Organic Carbon Storage Potential of Soils with Contrasting Native Organic Matter Content / S. Yeasmin, E. Jahan, Md.A. Molla [et al.]. *Hindawi International Journal of Agronomy*. 2020, Article ID 8042961, 9 pages <https://doi.org/10.1155/2020/8042961>
61. Stabilization of organic matter in temperate soils: mechanisms and their relevance under different soil conditions-a review / M. Lützow, I. Kögel-Knabner, K. Ekschmit [et al.]. *Eur. J. Soil Sci.* 2006. 57. P. 426–445. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2006.00809.x>
62. Soil organic carbon storage as a key function of soils – A review of drivers and indicators at various scales / M. Wiesmeier, L. Urbanski, E. Hobbey [et al.]. *Geoderma*. 2019. 333. P. 149–162. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.07.026>.
63. Saint-Laurent D., Berthelot J. S., Arsenault-Boucher L. Organic carbon sequestration in mineral soil layers of cold-temperate mixed forests. *J. Soil Sci. Environ. Manage.* 11(4). P. 142–152, October–December 2020. <https://doi.org/10.5897/JSSSEM2020.0845>.
64. Новітні інтегративні методи дослідження стабілізації органічного вуглецю за різного обробітку ґрунту / М.А. Попірний, О.П. Сябрук, Р.В. Акімова, М.В. Шевченко. *Агрохімія і ґрунтознавство*. Міжвід. тем. наук. збірник. Вип. 90. Харків: ННЦ "ІГА ім. О.Н. Соколовського". 2020. С. 13–28. <https://doi.org/10.31073/acss90-02>.
65. Chemical and Spectroscopic Investigation of Different Soil Fractions as Affected by Soil Management / F. De Mastro, C. Coccozza, G. Brunetti, A. Traversa. *Appl. Sci.* 2020. 10. 2571. <https://doi.org/10.3390/app10072571>.
66. Роль гранулометричного складу в параметризації ґрунтоутворення та його місце у класифікації ґрунтів / М.І. Полупан, В.Б. Соловей, В.А. Величко, В.Г. Ковальов. *Вісник аграрної науки*. 1999. №12. С. 17–22.
67. Лебедь В.В., Соловей В.Б. Кількісна діагностика ґрунтів різного ступеню гідроморфності на однолесових терасах річок Лівобережного Лісостепу України. *Агрохімія і ґрунтознавство*. Міжвід. тем. наук. збірник. Вип. 88. Харків: ННЦ "ІГА ім. О.Н. Соколовського". 2019. С. 22–30. <https://doi.org/10.31073/acss88-03>.
68. Шеин Е.В., Архангельская Т.А. Педотрансферные функции: состояние, проблемы, перспективы. *Почвоведение*. 2006. № 10. С. 1205–1217.

69. Медведєв В.В., Пліско І.В., Бігун О.М. Досвід педотрансферного моделювання у дослідженнях фізики ґрунтів. *Вісник аграрної науки*. 2015. 1. С. 17–24. URL: https://agrovisnyk.com/pdf/ua_2015_01_02.pdf
70. Дыдышко С.В., Азаренок Т.Н., Шульгина С.В. Взаимосвязь гумуса и гранулометрического состава дерново-палево-подзолистых легкосуглинистых почв разной степени агрогенной трансформации *Почвоведение и агрохимия*. 2018. 2(61). С. 20–31.
71. Соколов Д.А., Мерзляков О.Э., Доможакова Е.А. Оценка литогенного потенциала гумусонакопления в почвах отвалов каменноугольных месторождений Сибири. *Вестник Томского государственного университета*. 2015. № 399. С. 247–253. <https://doi.org/10.17223/15617793/399/40>.
72. Артемьева З.С. Органическое вещество и гранулометрическая система почвы. Москва: ГЕОС, 2010. 240 с. ISBN: 9785891185111
73. Лактіонова Т.М. Про можливість застосування в Україні класифікації гранулометричного складу ґрунтів USDA/FAO. *Агрохімія і ґрунтознавство*. Міжвід. тем. наук. збірник. 2011. Вип. 74. Харків: ННЦ "ІГА ім. О.Н. Соколовського". С. 28–36.
74. Шейн Е.В. Гранулометрический состав почв: проблемы методов исследования, интерпретации результатов и классификаций. *Почвоведение*. 2009. № 3. С. 309–317.
75. От понятия элементарной почвенной частицы к гранулометрическому и микроагрегатному анализам (Обзор) / А.В. Юдина, Д.С. Фомин, А.Д. Котельникова, Е.Ю. Милановский. *Почвоведение*, 2018. № 11. С. 1340–1362. <https://doi.org/10.1134/S0032180X18110096>.

UDC 631.417.2

Lithogenic potential of pedosphere carbonization: theoretical-methodological, methodical and ecosystem approaches

Zenon Hamkalo, Iryna Shpakivska, Oksana Maryshevych

Institute of Ecology of the Carpathians, NASU, Lviv, Ukraine

E-mail: zenon.hamkalo@gmail.com

The problem of accumulation and preservation of organic matter (OM) in the pedosphere is one of the main in the world research space. Using the search engine "Google Academy" (Google Scholar) of full texts of scientific publications (articles) on this topic over the past 5 years, showed that the query "carbon sequestration" received – 452,000 sources, and "soil carbon" sequestration " and "soil carbon sequestration potential" – 59,700 and 56,900 sources, respectively, while on request in Ukrainian "carbon sequestration" – 178 and "soil carbon sequestration" – 85. Under these conditions, it is important to inform the Ukrainian reader about the latest achievements of world science on the problem of C-sequestration and C-deposition of various types' ecosystems and land use. The presented literature review considers the gradual development of theoretical, methodological and methodical bases for the development of organic matter stabilization models, mainly by a matrix of mineral soils (<20 and <50 µm) using linear least squares regression equations, analysis of limit values and other methodical approaches. Approaches to the assessment of soil carbon capacity (Carbon Protective Capacity), carbon saturation by the mineral matrix (Carbon Saturation, CS), C-saturation of the soil (Saturation Deficit), as well as the functional features of C-sequestration and C-deposition are considered. The existing methods for assessing the stabilization potential of the OM and the reality of the successful implementation of the International Initiative "4 in 1000: Soils for Food Security and Climate", adopted in December 2015, have been critically evaluated. Taking into account the world experience, the need to move to a three-member classification of soil particle size distribution in Ukraine is considered.

Keywords: soil organic carbon; particle size distribution; C-protective capacity; C-saturation potential; C-saturation deficiency; C-sequestration; C-deposition.

Citing: Hamkalo, Z. G., Shpakivska, I. M. & Maryshevych, O. G. (2021). Lithogenic potential of pedosphere carbonization: theoretical-methodological, methodical and ecosystem approaches. *AgroChemistry and Soil Science*. 92, 41-51. [doi:10.31073/acss92-05](https://doi.org/10.31073/acss92-05) [in Ukrainian].

Evaluation of distilled water pH measurement with electrolyte methods in cultivated soils of Nepal

Dinesh Khadka^{*1}, Rita Amgain¹, Sushila Joshi¹ and Shankar Shrestha²

¹National Soil Science Research Centre, NARC, Khumaltar, Lalitpur, Nepal

²National Sugarcane Research Program, NARC, Jitpur, Bara, Nepal

ARTICLE INFO	ABSTRACT
Received 08.10.2021 Received in revised form 26.11.2021 Accepted 10.12.2021 Available online 20.12.2021 Keywords: calcium chloride; distilled water; potassium chloride; soil pH measurement	Soil pH is most routinely measured parameter among all others in soil chemistry laboratory. There are various methods developed for pH measurement, although we using only distilled water from the beginning. In Nepal, there do not have database for showing performance of the methods. The three methods namely; H₂O, KCl and CaCl₂ with their soil:solution ratios (1:1, 1:2 and 1:2.5) were used. The total 115 samples were collected randomly at a depth of 0-20 cm from the hill and terai regions of Nepal. The collected samples were analyzed following mentioned methods, separately. The various statistical tests (F-test, mean separation, correlation, and regression model) were performed for comparison. Moreover, model validation parameters were also calculated for relating H₂O with electrolyte method. The three models linear, quadratic and cubic were used for this task. The result revealed the effect of methods on pH measurement was significantly different in the entire ratio. The pH_{H₂O} was 0.57, 0.56 and 0.67 units higher than pH_{CaCl₂} in 1:1, 1:2 and 1:2.5 ratios, respectively. Whereas, 1.24, 0.99 and 0.95 units higher than pH_{KCl} in respective ratio. Moreover, regarding timing to reach stable during measurement were in the order pH_{H₂O} (89.44 sec) > pH_{CaCl₂} (54.29 sec) > pH_{KCl} (33.08 sec). Similarly, relating modeling quadratic and cubic model showed nearly equal performance (lower RMSE, MAE and higher R² and d) for predicting pH_{CaCl₂} and pH_{KCl} from the pH_{H₂O} in each soil solution ratio. The determined database can be useful for comparing used three different methods of soil pH measurement under Nepalese context.
E-mail: * dinesh.khadka92@gmail.com	

Citing: Khadka, D., Amgain, R., Joshi, S. & Shrestha, S. (2021). Evaluation of distilled water pH measurement with electrolyte methods in cultivated soils of Nepal. *AgroChemistry and Soil Science*. 92, 52-61. [doi:10.31073/acss92-06](https://doi.org/10.31073/acss92-06).

1. Introduction

Soil pH is important chemical characteristic of soil that influences many physical, chemical and biological properties [1]. The crucial information relating nutrient availability, aluminum and heavy metal equilibria, organic matter decomposition, lime and gypsum requirement, and microbial activity can be determined from the soil pH. Soil chemists believe this as a “master variable” because it plays important role for controlling ion exchange, dissolution-precipitation, reduction-oxidation, adsorption and complexation reactions [2].

Soil pH measurement is a basic for all measurement in soil chemistry lab. In other word, this parameter is most commonly measured parameter among other test parameters. Soil pH is usually measured potentiometrically in a slurry system using an electronic pH meter [3]. There are various method developed for soil pH measurement [4]. The common methods used worldwide for soil pH determination are distilled water, 1N KCl, and 0.01M CaCl₂. The uses of different methods have different aspects for the measurement. White [5] and Kissel et al. [6] suggested electrolyte solution of CaCl₂ or KCl for soil pH measurement as it is less affected by soil salt concentration and thus provides a more consistent measurement for soils whose salt content may fluctuate as a result of seasonal conditions or crop residues. Slattery and Ronnfeldt [7] reported seasonal variation in pH_{H₂O} for a particular soil from the field may be up to 0.6 unit in one year. But in the world, distilled water and 0.01 CaCl₂ is usually used for soil pH measurement [8].

In Nepal, most of the lab using distilled water as a measuring solution. Moreover, we do not thinking about other method that persist for measurement. There do not possess any study record relating relationship between different methods of pH measurement from soil. Considering this, we have done this work by relating two objectives as (i) compare and contrast soil pH methods; and (ii) develop a regression model relating the pH_{H₂O} to the pH_{CaCl₂} and pH_{KCl}.

2. Materials and Methods

2.1. Soil sampling

The total 115 samples were collected from the four sites namely; Thaha Municipality (Daman and Palung) of Makwanpur district and Shivaraj Municipality (Kharendrapur and Baraipur) of

Kapilvastu district during November, 2018 and February, 2019, respectively. The soil sampling area lies on both terai and hilly region of Nepal. The soil samples were collected at 0-20 cm depth using soil sampling auger.

2.2. Laboratory measurement

The collected samples were analyzed in the lab of National Soil Science Research Centre, Khumaltar, Lalitpur, Nepal. The three different solutions were used individually for analyzing all the samples in used methods (Tab. 1). Similarly, three different soil solution ratio namely; 1:1, 1:2 and 1:2.5 were used for study. For measurement digital bench-top pH meter was used. Each sample was replicated twice during measurement.

Table 1

Different methods and chemical used for soil pH determination in lab

SN	Method	Chemical	Standing time
1.	Distilled water	only distilled water (no use of any chemicals)	30 minutes
2.	0.01 M CaCl ₂	Calcium chloride dihydrate (1.47 g/ltr)	30 minutes
3.	1 N KCl	Potassium chloride (74.56 g/ltr)	10 minutes

2.3. Statistical analysis

Data from each method was analyzed independently. Measurement methods were considered as a factor. R statistical software was used for analysis of variance and correlation. Significant means were separated using Least Significant Difference (LSD) Test as described by Gomez and Gomez [9]. The absolute value of correlation coefficient (r) was also categorized accordingly suggested by Evans (1996) as 0–0.19 (very weak), 0.20–0.39 (weak), 0.40–0.59 (moderate), 0.60–0.79 (strong) and 0.80–1.0 (very strong).

Similarly, three model techniques (linear, quadratic and cubic) were used to predict pH_{CaCl2} and pH_{KCl} from pH_{H2O}. To evaluate the performance of the models, we used the R² value (coefficient of determination) for determining variability on dependent factor due to independent factor, the RMSE (root mean squared error) to indicate the accuracy of the model, and the MAE (mean absolute error) to indicate the bias in the model. In addition to this, index of agreement (D) also calculated to determine relationship between observed and predicted value. The statistic tool used for testing model fit is calculated as:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (ypred - yobs)^2}; \text{ where smaller value of RMSE indicated better fit the model;}$$

$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |ypred - yobs|$; where positive value of MAE indicates over-prediction, while a negative value indicates under-prediction;

$D = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (ypred - yobs)^2}{\sum_{i=1}^N [| (ypred - yav)| + |(yobs - yav)|]^2}$; where higher value indicates better relationship between observed and predicted value [10], whereas, y_{pred} = predicted value; y_{obs} = observed value;

Goodness of Prediction Statics (G) = $1 - \left\{ \frac{\sum_{i=1}^N (ypred - yobs)^2}{\sum_{i=1}^N (yobs - yav)^2} \right\}$; where higher value indicates better relationship between observed and predicted value [10].

3. Results

3.1 Soil pH Distribution

The soil pH_{H2O} ranged from 4.09 to 8.78, 3.88 to 9.07 and 3.84 to 9.08, respectively for 1:1, 1:2 and 1:2.5 ratios. Similarly, soil pH_{CaCl2} varied from 3.74 to 7.81, 3.68 to 8.19, and 3.76 to 7.90, respectively for 1:1, 1:2 and 1:2.5 ratios. Moreover, soil pH_{KCl} ranged from 2.91 to 7.61, 3.16 to 7.82, and 3.22 to 7.97, respectively for 1:1, 1:2 and 1:2.5 ratios (Table 2; Table 3; Table 4). Furthermore,

distribution of pH due to methods in three soil solution ratio (1:1, 1:2 and 1:2.5) is shown in the Figure 1 to 3.

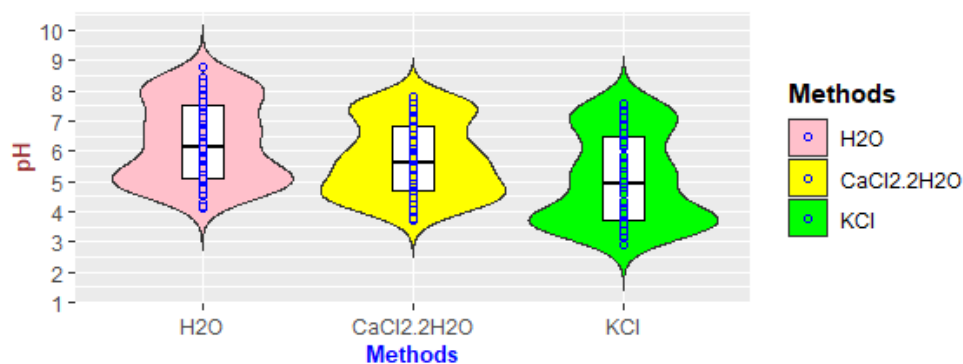


Figure 1. Distribution of soil pH on different methods in 1:1 soil solution ratio

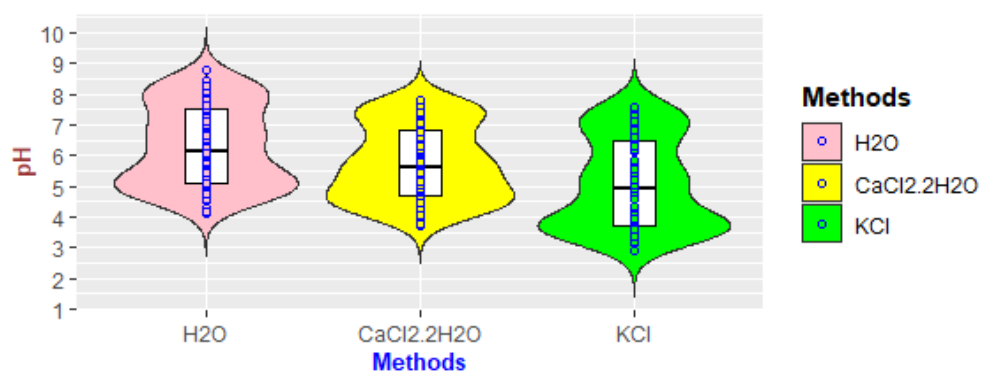


Figure 2. Distribution of soil pH on different methods in 1:2 soil solution ratio

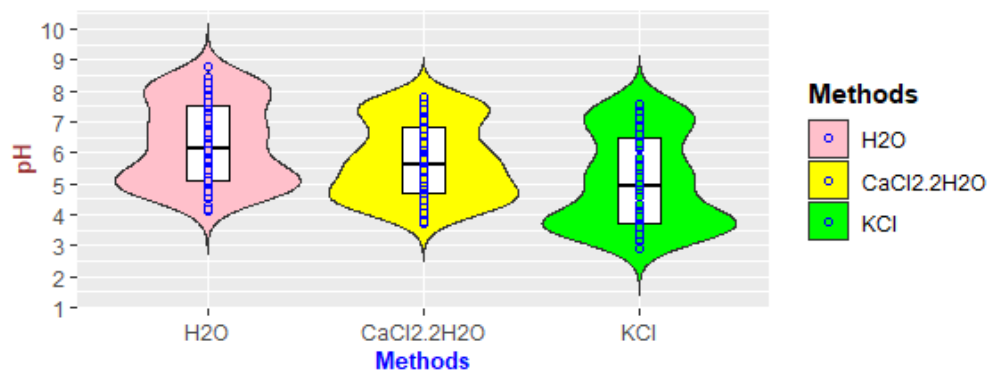


Figure 3. Distribution of soil pH on different methods in 1:2.5 soil solution ratio

3.2. Effect of methods on soil pH measurement for various pH range soils of Nepal

The data regarding effects of methods on pH measurement in three soil solution ratios (1:1, 1:2 and 1:2.5) are shown in Tab. 2 to 4. The effect of method was significantly difference for the soil pH measurement. The highest was determined by pH_{H_2O} , followed by pH_{CaCl_2} , while lowest in pH_{KCl} . The pH_{CaCl_2} (1:1) was 0.57 units lower than pH_{H_2O} (1:1), while 1.24 units lower for pH_{KCl} (1:1). Similarly, pH_{H_2O} (1:2) was 0.56 and 0.99 units higher than pH_{CaCl_2} (1:2) and pH_{KCl} (1:2) measurement, respectively. Likewise, pH_{CaCl_2} (1:2.5) and pH_{KCl} (1:2.5) was 0.67 and 0.95 units lesser than pH_{H_2O} (1:2.5), respectively. The correlation between soil pH of all the methods was significantly very strong and positive in among all the ratios (Tab. 5).

Table 2*Effect of methods (1:1) on soil pH determination for various soils of Nepal*

Methods	Soil pH	$\Delta\text{pH}_{\text{H}_2\text{O} - \text{CaCl}_2/\text{KCl}}$	Range
H ₂ O	6.31 ^a	—	4.09-8.78
CaCl ₂ .2H ₂ O	5.74 ^b	0.57	3.74-7.81
KCl	5.07 ^c	1.24	2.91-7.61
LSD	0.34**	—	—
Grand Mean	5.70	—	—
CV%	23.29	—	—

Treatment means separated by Least Significance Difference (LSD) Test and columns represented with same letter (s) are not significantly different among each other at 5% level of significance, and vice-versa; ** means significant at the 1% probability levels; H₂O= Distilled water; CaCl₂= Calcium chloride; KCl= Potassium chloride

Table 3*Effect of methods (1:2) on soil pH determination for various soils of Nepal*

Methods	Soil pH	$\Delta\text{pH}_{\text{H}_2\text{O} - \text{CaCl}_2/\text{KCl}}$	Range
H ₂ O	6.31 ^a	-	3.88-9.07
CaCl ₂ .2H ₂ O	5.75 ^b	0.56	3.68-8.19
KCl	5.32 ^c	0.99	3.16-7.82
LSD	0.37**	—	—
Grand Mean	5.79	—	—
CV%	24.31	—	—

Treatment means separated by Least Significance Difference (LSD) Test and columns represented with same letter (s) are not significantly different among each other at 5% level of significance, and vice-versa; ** means significant at the 1% probability levels; H₂O= Distilled water; CaCl₂= Calcium chloride; KCl= Potassium chloride

Table 4*Effect of methods (1:2.5) on soil pH determination for various soils of Nepal*

Methods	Soil pH	$\Delta\text{pH}_{\text{H}_2\text{O} - \text{CaCl}_2/\text{KCl}}$	Range
H ₂ O	6.30 ^a	-	3.84-9.08
CaCl ₂ .2H ₂ O	5.63 ^b	0.67	3.76-7.90
KCl	5.35 ^b	0.95	3.22-7.97
LSD	0.36**	—	—
Grand Mean	5.76	—	—
CV%	23.91	—	—

Treatment means separated by Least Significance Difference (LSD) Test and columns represented with same letter (s) are not significantly different among each other at 5% level of significance and vice-versa; ** means significant at the 1% probability levels; H₂O= Distilled water; CaCl₂= Calcium chloride; KCl= Potassium chloride

Table 5*Pearson correlation coefficient (r) between various soil pH measurement methods*

	H ₂ O (1:1)	CaCl ₂ .2H ₂ O (1:1)	KCl (1:1)	H ₂ O (1:2)	CaCl ₂ .2H ₂ O (1:2)	KCl (1:2)	H ₂ O (1:2.5)	CaCl ₂ .2H ₂ O (1:2.5)	KCl (1:2.5)
H ₂ O (1:1)	1								
CaCl ₂ .2H ₂ O (1:1)	0.98**	1							
KCl (1:1)	0.99**	0.98**	1						
H ₂ O (1:2)	1**	0.97**	0.99**	1					
CaCl ₂ .2H ₂ O (1:2)	0.98**	0.97**	0.98**	0.98**	1				
KCl (1:2)	0.98**	0.98**	0.99**	0.98**	0.97**	1			
H ₂ O (1:2.5)	0.99**	0.97**	0.99**	1**	0.98**	0.98**	1		
CaCl ₂ .2H ₂ O (1:2.5)	0.97**	0.97**	0.97**	0.97**	0.94**	0.98**	0.97**	1	
KCl (1:2.5)	0.98**	0.98**	1**	0.98**	0.98**	1**	0.98**	0.98**	1

* means correlation is significant at the 5% probability levels (2-tailed); ** means correlation is significant at the 1% probability level (2-tailed)

3.3. Effect of methods on soil pH determination (stable) timing under laboratory conditions

The data regarding effect of methods on soil pH measurement time (stable) are shown in Table 6. The effect of method was significantly difference for the soil pH measurement timing in lab. The highest time (89.44 sec) was taken by pH_{H₂O}, while lowest time (33.08 sec) by pH_{KCl} method.

Table 6

Effect of methods on soil pH determination time under laboratory conditions

Methods	Time (sec)	$\Delta\text{pH}_{\text{H}_2\text{O} - \text{CaCl}_2/\text{KCl}}$	Range (sec)
H ₂ O	89.44 ^a	-	48.82-136.89
CaCl ₂ ·2H ₂ O	54.29 ^b	35.15	31.81-76.03
KCl	33.08 ^c	56.36	25.95-45.47
LSD	15.98 ^{**}		
Grand Mean	58.94		
CV%	29.54		

Treatment means separated by Least Significance Difference (LSD) Test and columns represented with same letter (s) are not significantly different among each other at 5% level of significance and vice-versa; ** means significant at the 1% probability levels; H₂O= distilled water; CaCl₂= Calcium chloride; KCl= Potassium chloride

3.4. Effect of models for relating distilled water (H₂O) with electrolytes (CaCl₂ and KCl) methods in 1:1 soil solution ratio

The studied all the regression model of the pH_{CaCl₂} and pH_{KCl} on pH_{H₂O} showed highly significant relationship (Tab. 7; Tab. 8; Fig. 4; Fig. 6). Regarding pH_{H₂O} vs. pH_{CaCl₂}, quadratic and cubic model observed equal with highest R² (95.7) and D (0.99), but slightly lowest (by 0.01 units) RMSE (0.25) and MAE (0.19) in quadratic model. Whereas, linear regression model determined slightly lower R² (95.6) and D (0.98), while RMSE and MAE was comparatively higher. Similarly, for pH_{H₂O} vs. pH_{KCl}, cubic model observed highest R² (98.4), while quadratic model contained lowest RMSE (0.20) and MAE (0.15). But in linear model possessed slightly lower R² and D, while RMSE and MAE was comparatively higher. The index of agreement (D) was equal in quadratic and cubic model.

Based on all the measured statistical tools, quadratic model was slightly strong on power for forecasting pH_{CaCl₂} and pH_{KCl} from pH_{H₂O} (Fig. 5; Fig. 7), but cubic model also had nearly equal performance.

Table 7

Regression model pH_{H₂O} (1:1) Vs pH_{CaCl₂} (1:1)

Model	Equation	R ²	RMSE	MAE	D	P value
Linear	pH _{CaCl₂} = 0.12 + 0.89pH _{H₂O}	95.6	0.35	0.29	0.98	<0.001
Quadratic	pH _{CaCl₂} = 1.75 + 0.36pH _{H₂O} + 0.04 pH _{H₂O} ²	95.7	0.25	0.19	0.99	<0.001
Cubic	pH _{CaCl₂} = 0.83 + 0.81pH _{H₂O} - 0.03pH _{H₂O} ² + 0.004pH _{H₂O} ³	95.7	0.26	0.21	0.99	<0.001

R²= Coefficient of determination; RMSE= Root Mean Square Error; MAE= Mean Absolute Error; D= Index of Agreement

Table 8

Regression model pH_{H₂O} (1:1) Vs pH_{KCl} (1:1)

Model	Equation	R ²	RMSE	MAE	D	P value
Linear	pH _{KCl} = -1.83 + 1.10pH _{H₂O}	97.7	0.23	0.18	0.994	<0.001
Quadratic	pH _{KCl} = 1.14 + 0.132pH _{H₂O} + 0.075pH _{H₂O} ²	98.2	0.20	0.15	0.995	<0.001
Cubic	pH _{KCl} = 11.24 - 4.81pH _{H₂O} + 0.861pH _{H₂O} ² - 0.041pH _{H₂O} ³	98.4	0.21	0.16	0.995	<0.001

R²= Coefficient of determination; RMSE= Root Mean Square Error; MAE= Mean Absolute Error; D= Index of Agreement

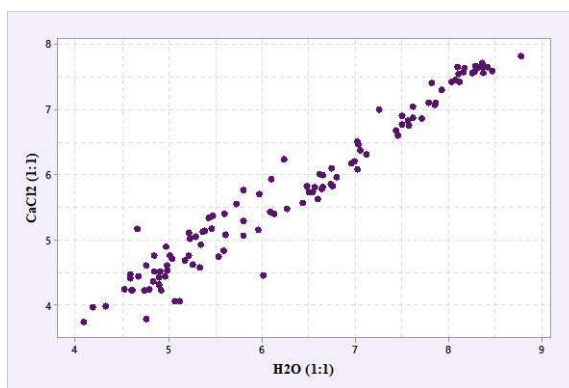


Figure 4. Relationship between CaCl_2 (1:1) and H_2O (1:1) soil pH measurement

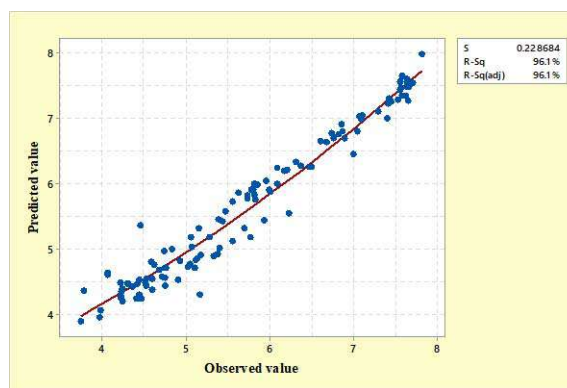


Figure 5. Comparison of observed versus predicted $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ (1:1) from quadratic model

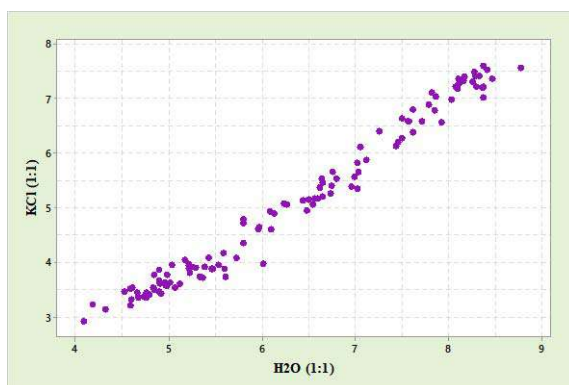


Figure 6. Relationship between KCl (1:1) and H_2O (1:1) soil pH measurement

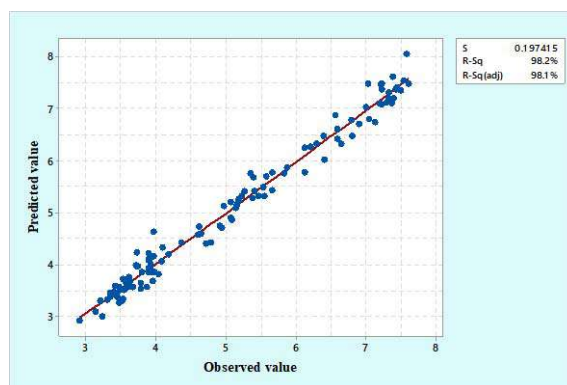


Figure 7. Comparison of observed versus predicted pH_{KCl} (1:1) from quadratic model

3.5. Effect of models for relating distilled water (H_2O) with electrolyte (CaCl_2 and KCl) methods in 1:2 soil solution ratio

The studied all the regression model of the $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ and pH_{KCl} on $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ showed highly significant relationship (Tab. 9; Tab. 10; Fig. 8; Fig. 10). Regarding $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ vs. $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$, cubic model possessed lowest RMSE (0.23) and highest R^2 (97.2) and D (0.993). On the other hand, linear and quadratic model contained similar R^2 (96.7) and RMSE (0.25). The quadratic and cubic model contained equal MAE (0.18). Similarly, for $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ vs. pH_{KCl} , cubic and quadratic model observed lowest and equal RMSE (0.25), but slightly highest (by 0.01 units) R^2 (96.7) was determined in cubic model. Whereas, lowest MAE (0.19) was determined in quadratic model. For studied all the cross-validation parameter linear model showed comparatively weak performance.

Considering the entire cross-validation factor cubic model showed consistent result for forecasting $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ and pH_{KCl} from $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ (Fig. 9; Fig. 11), but quadratic model also had nearly equal performance.

Table 9

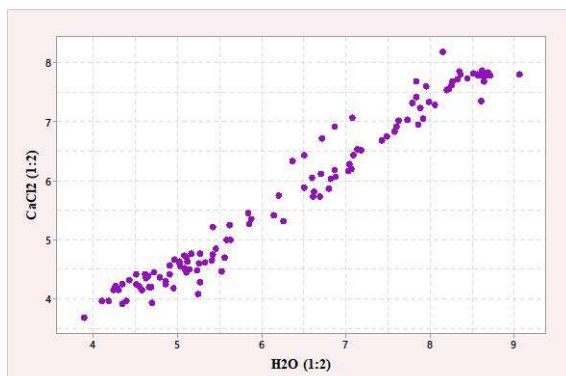
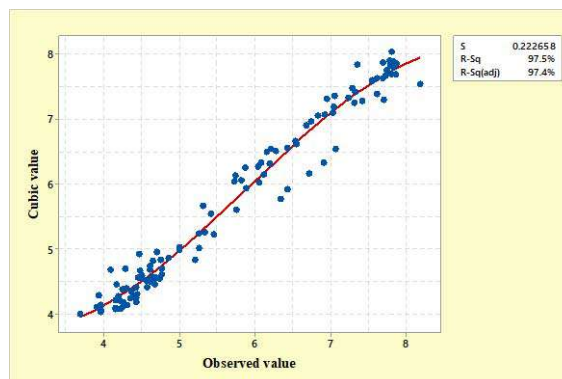
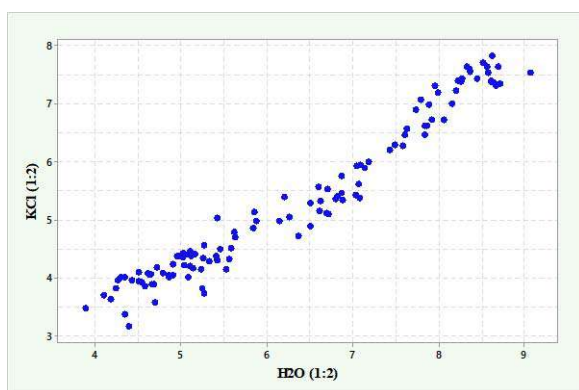
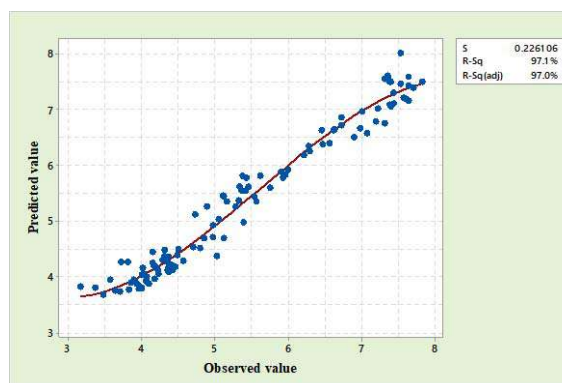
Regression model $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ (1:2) Vs $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ (1:2)

Model	Equation	R^2	RMSE	MAE	D	P value
Linear	$\text{pH}_{\text{CaCl}_2} = -0.003 + 0.912\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$	96.7	0.25	0.19	0.991	<0.001
Quadratic	$\text{pH}_{\text{CaCl}_2} = 0.702 + 0.68\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}} + 0.018\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}^2$	96.7	0.25	0.18	0.992	<0.001
Cubic	$\text{pH}_{\text{CaCl}_2} = 11.86 - 4.81\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}} + 0.892\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}^2 - 0.045\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}^3$	97.2	0.23	0.18	0.993	<0.001

R^2 = Coefficient of determination; RMSE= Root Mean Square Error; MAE= Mean Absolute Error; D= Index of Agreement

Table 10Regression model pH_{H_2O} (1:2) Vs $pH_{KCl(1:2)}$

Model	Equation	R ²	RMSE	MAE	D	P value
Linear	$pH_{KCl} = -0.271 + 0.887pH_{H_2O}$	95.2	0.29	0.24	0.988	<0.001
Quadratic	$pH_{KCl} = 3.46 - 0.335pH_{H_2O} + 0.095pH_{H_2O}^2$	96.6	0.25	0.19	0.991	<0.001
Cubic	$pH_{KCl} = 6.66 - 1.91pH_{H_2O} + 0.345pH_{H_2O}^2 - 0.013pH_{H_2O}^3$	96.7	0.25	0.20	0.991	<0.001

 R^2 = Coefficient of determination; RMSE= Root Mean Square Error; MAE= Mean Absolute Error; D= Index of Agreement**Figure 8.** Relationship between $CaCl_2$ (1:2) and H_2O (1:2) soil pH measurement**Figure 9.** Comparison of observed versus predicted pH_{CaCl_2} (1:2) from cubic model**Figure 10.** Relationship between KCl (1:2) and H_2O (1:2) soil pH measurement**Figure 11.** Comparison of observed versus predicted pH_{KCl} (1:2) from cubic model

3.6. Effect of models for relating distilled water (H_2O) with electrolyte ($CaCl_2$ and KCl) methods in 1:2.5 soil solution ratio

The studied all the regression model of the pH_{CaCl_2} and pH_{KCl} on pH_{H_2O} showed highly significant to respective model (Tab. 11; Tab. 12; Fig. 12; Fig. 14). Concerning pH_{H_2O} vs. pH_{CaCl_2} , quadratic and cubic model observed highest R^2 (94.1), but slightly lowest (by 0.01 units) RMSE (0.31) was determined in quadratic model. For studied all the cross-validation parameter linear model determined slightly weak performance ($R^2=93.2$; RMSE= 0.33). Similarly, for pH_{H_2O} vs. pH_{KCl} , cubic and quadratic model determined equal RMSE (0.18) and R^2 (98.4). But in linear model comparatively lower R^2 (96.9) and highest RMSE (0.25) observed.

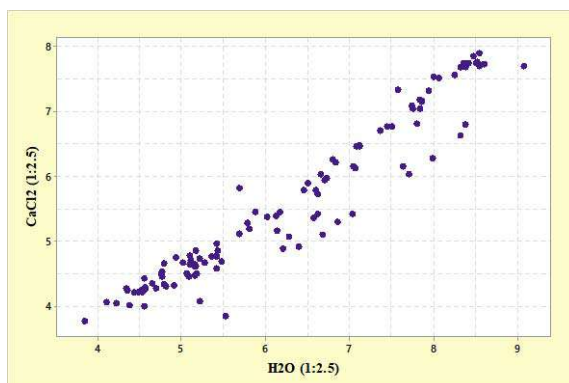
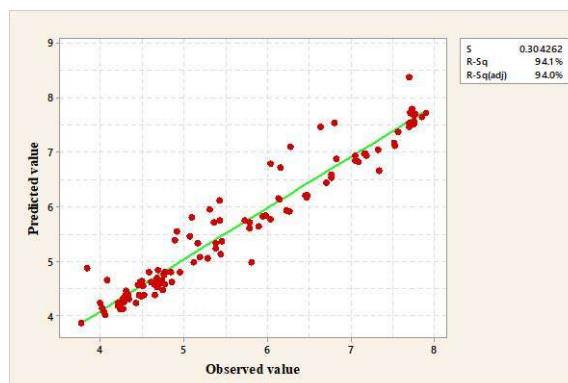
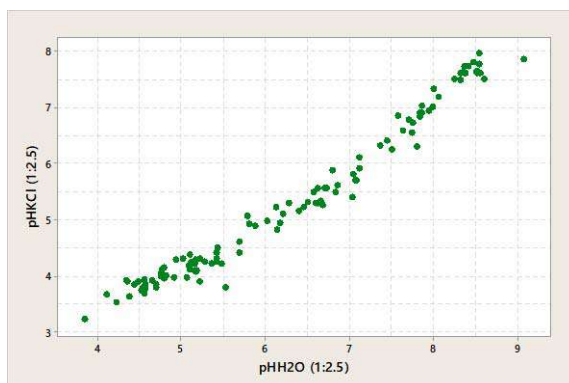
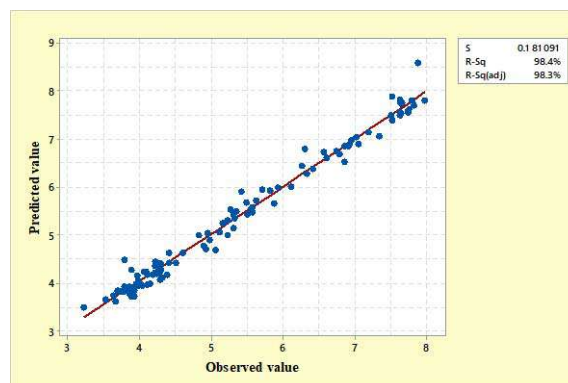
Considering the entire cross-validation parameters quadratic model showed consistent result for forecasting pH_{CaCl_2} from pH_{H_2O} (Fig. 13), but cubic model also had nearly equal performance. Moreover, quadratic and cubic model were better for forecasting pH_{KCl} from pH_{H_2O} (Fig. 15; Fig. 16).

Table 11Regression model pH_{H_2O} (1:2.5) Vs pH_{CaCl_2} (1:2.5)

Model	Equation	R ²	RMSE	MAE	D	P value
Linear	$pH_{CaCl_2}=0.212+0.859pH_{H_2O}$	93.2	0.33	0.25	0.982	<0.001
Quadratic	$pH_{CaCl_2}=3.22-0.122pH_{H_2O}+0.076pH_{H_2O}^2$	94.1	0.31	0.22	0.985	<0.001
Cubic	$pH_{CaCl_2}=6.99-1.98pH_{H_2O}+0.372pH_{H_2O}^2-0.015pH_{H_2O}^3$	94.1	0.32	0.20	0.984	<0.001

*R*²= Coefficient of determination; RMSE= Root Mean Square Error; MAE= Mean Absolute Error; D= Index of Agreement**Table 12**Regression model pH_{H_2O} (1:2.5) Vs pH_{KCl} (1:2.5)

Model	Equation	R ²	RMSE	MAE	D	P value
Linear	$pH_{KCl}=-0.754+0.968pH_{H_2O}$	96.9	0.25	0.20	0.992	<0.001
Quadratic	$pH_{KCl}=3.43-0.395pH_{H_2O}+0.106pH_{H_2O}^2$	98.4	0.18	0.13	0.996	<0.001
Cubic	$pH_{KCl}=6.39-1.85pH_{H_2O}+0.338pH_{H_2O}^2-0.012pH_{H_2O}^3$	98.4	0.18	0.13	0.996	<0.001

*R*²= Coefficient of determination; RMSE= Root Mean Square Error; MAE= Mean Absolute Error; D= Index of Agreement**Figure 12.** Relationship between $CaCl_2$ (1:2.5) and H_2O (1:2.5) soil pH measurement**Figure 13.** Comparison of observed versus predicted pH_{CaCl_2} (1:2.5) in quadratic model**Figure 14.** Relationship between KCl (1:2.5) and H_2O (1:2.5) soil pH measurement**Figure 15.** Comparison of observed versus predicted pH_{KCl} (1:2.5) in quadratic model

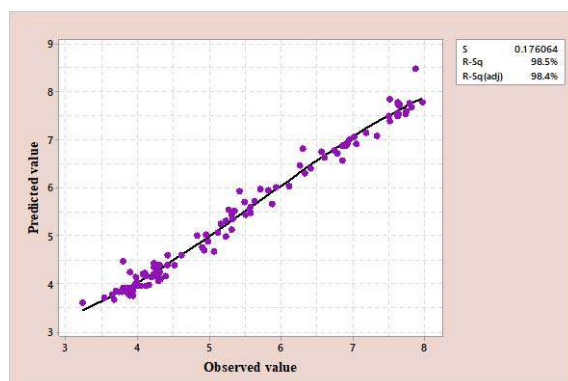


Figure 16. Comparison of observed versus predicted pH_{KCl} (1:2.5) in cubic model

4. Discussion

The soil pH determined by distilled water was higher than used electrolytes namely calcium chloride and potassium chloride. The corresponding result ($pH_{H_2O} > pH_{CaCl_2} > pH_{KCl}$) was also determined by various researchers [4, 11-14] in different sites of world. When using electrolyte solution ($CaCl_2$ or KCl), the cation becomes introduced into the diffuse layer and substitutes the protons (H^+ / Al^{3+}) strongly bonded to the soil colloids [13; 15]. The release of more amounts of low pH inhabiting ion might be the cause of lower content of pH in electrolyte extracting sample than distilled water. Correspondingly, pH in distilled water denotes only acidity of the soil solution, while pH in KCl refers summation of soil solution acidity and reserve acidity in the colloids [16] might also be the cause of low value in pH_{KCl} .

Moreover, regarding correlation among the methods, similar (significant and positive) relationship was determined by Gavriloaiei [13] in Romania. The determined data revealed with the increase in pH content by one method also increases in other method, and vice-versa. On the other study timing for stable reading, electrolyte (KCl and $CaCl_2$) method observed lowest time than sole distilled water (H_2O) might be due to instant contact between soil solution and electrode solution.

The comparison of three regression model (linear, quadratic and cubic) for relating pH_{H_2O} to pH_{CaCl_2} and pH_{KCl} determined nearly equal performance in quadratic and cubic model in studied three soils and solution ratio. Among them, linear model showed weak prediction.

5. Conclusion

Measuring pH is prerequisite for soil fertility assessment. There are various methods developed for soil pH determination in lab. The different methods possessed different behavior for measurement. Regarding soil pH, the highest date was determined in pH_{H_2O} followed by pH_{CaCl_2} and pH_{KCl} . Moreover, regarding timing for being stable during measurement were in the order pH_{H_2O} (89.44 sec) > pH_{CaCl_2} (54.29 sec) > pH_{KCl} (33.08 sec). Similarly, relating modeling quadratic and cubic model showed nearly equal performance (lower RMSE, MAE and higher R^2 and d) for predicting pH_{CaCl_2} and pH_{KCl} from the pH_{H_2O} data in each of three different ratio. The determined database can be useful for comparing three methods of soil pH measurement under Nepalese context.

Acknowledgement

The authors would like to acknowledge Nepal Agricultural Research Council for funding this research. We are very much thankful to all the farmers' of Thaha Municipality (Daman and Palung), Makwanpur and Shivaraj Municipality (Kharendrapur and Baraipur), Kapilvastu for their cooperation during soil sampling. Similarly, support of the National Soil Science Research Centre, Khumaltar, Lalitpur for providing laboratory facilities to analyze the soil samples as well as other technical support is highly acclaimed.

References

1. Das, D. K. (2015). *Introductory Soil Science*. Kalyani Publishers, India.
2. McBride, M.B. (1994). *Environmental chemistry of soils*. Oxford University Press, New York.

3. McLean, E. O. (1982). Soil pH and lime requirement. In: A. L. Page, R. H. Miller & D. R. Keeney (Eds.), *Methods of soil analysis*. Part 2 – Chemical and microbiological properties (2nd Ed.) (pp. 199-223). Agronomy 9.
4. Jones Jr, J. B. (2001). *Laboratory guide for conducting soil tests and plant analysis*. CRC press.
5. White, R.E. 1969. On the measurement of soil pH. *Journal of the Australian Institute of Agricultural Science*, 35, 3–14.
6. Kissel, D.E., Sonon, L., Vendrell, P.F. & Isaac R.A. (2009). Salt concentration and measurement of soil pH. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 40, 179–187.
7. Slattery, W.J. & Ronnfeldt G. R. (1992). Seasonal variation of pH, aluminium, and manganese in acid soils from north-eastern Victoria. *Australian Journal of Experimental Agriculture* 32, 1105-1112.
8. Minasny, B., McBratney, A. B., Brough, D. M. & Jacquier, D. (2011). Models relating soil pH measurements in water and calcium chloride that incorporate electrolyte concentration. *European Journal of Soil Science*, 62(5), 728-732.
9. Gomez, K. A. & Gomez, A.A. (1984). *Statistical procedures for agricultural research*. John Wiley & Sons.
10. Legates, D.R. & McCabe, G. J. J. (2000). Evaluating the use of "goodness-of-fit" measures in hydrologic and hydro-climatic model validation. *Water Resource Research*, 35(1), 233-241.
11. Kome, G. K., Enang, R. K., Yerima, B. P. K. & Lontsi, M.G.R. (2018). Models relating soil pH measurements in H₂O, KCl and CaCl₂ for volcanic ash soils of Cameroon. *Geoderma Regional*, 14, 1-8.
12. Rayment, G. E. & Higginson, F. R. (1992). Sampling and sample preparation Chapter 1. In: G. E. Rayment & F. R. Higginson (Eds.), *Australian laboratory handbook of soil and water chemical methods* (pp. 59–94). Inkata Press: Melbourne.
13. Gavriloaiei, T. (2012). The influence of electrolyte solutions on soil pH measurements. *Rev. Chim. (Bucharest)* 63(4), 396-400.
14. Schofield, R. K. & Taylor, A. W. (1955). The measurement of soil pH. *Soil Science Society of American Proceedings*, 19, 164-167.
15. Miller, R. O. & Kissel, D. E. (2010). Comparison of soil pH methods on soils of North America. *Soil Science Society of America Journal*, 74, 310-316.
16. Sadovski, A. N. 2018. Study on pH in water and potassium chloride for Bulgarian soils. *Eurasian Journal of Soil Science*, 8(1), 11-16.

Оцінка вимірювання рН водного розчину та електролітними методами в окультурених ґрунтах Непалу

Дінеш Хадка^{*1}, Ріта Амгейн¹, Сушила Джоші¹ і Шанкар Шреста²

¹Національний дослідницький центр ґрунтознавства, NARC, Хумальтар, Лалітпур, Непал

²Національна програма досліджень цукрової тростини, NARC, Джітпур, Бара, Непал

РН ґрунту є найбільш рутинним вимірюваним параметром серед усіх інших у ґрунтовій хімічній лабораторії. Існують різні методи, розроблені для вимірювання рН, хоча ми спочатку використовуємо лише дистильовану воду. У Непалі немає бази даних для показу ефективності різних методів. У дослідженнях використовували три методи: H₂O, KCl та CaCl₂ витяжки з їх співвідношенням ґрунт : розчин як 1:1, 1:2 та 1:2,5. Всього було відібрано 115 зразків випадковим чином у шарі ґрунту 0-20 см з різних за рельєфом регіонів Непалу. Зібрані зразки аналізували за зазначеними методами окремо. Для порівняння були проведені різні статистичні тести (F-тест, середній поділ, кореляційна та регресійна моделі). Крім того, параметри перевірки моделі були також розраховані для зв'язку методу H₂O з електролітним методом. Для цього завдання були використані три моделі: лінійна, квадратична та кубічна. Результат показав, що вплив методів на вимірювання рН істотно відрізнявся у всьому співвідношенні. рН_{H₂O} був на 0,57, 0,56 та 0,67 одиниць вище за рН_{CaCl₂} у співвідношенні 1:1, 1:2 та 1:2,5 відповідно. Тоді як на 1,24, 0,99 та 0,95 одиниць вище рН_{KCl} у відповідному співвідношенні. Більше того, щодо часу досягнення стабільності під час вимірювання порядок був таким: рН_{H₂O} (89,44 сек) > рН_{CaCl₂} (54,29 сек) > рН_{KCl} (33,08 сек). Аналогічно, співвідношення квадратичної та кубічної моделі продемонструвало майже однакову продуктивність (нижчий RMSE, MAE та вищі R² і d) для прогнозування рН_{CaCl₂} та рН_{KCl} за рН_{H₂O} у кожному співвідношенні ґрунтового розчину. База визначених даних може бути корисною для порівняння використаних трьох різних методів вимірювання рН ґрунту в Непалі.

Ключові слова: кальцію хлорид; дистильована вода; калію хлорид; вимірювання рН ґрунту.

Форма цитування: Khadka, D., Amgain, R. Joshi, S. & Shrestha, S. (2021). Evaluation of distilled water pH measurement with electrolyte methods in cultivated soils of Nepal. *AgroChemistry and Soil Science*. 92, 52-61. [doi:10.31073/acss92-06](https://doi.org/10.31073/acss92-06)

UDC 631.4:551.4:004.942

Challenges and opportunities of modelling carbon dioxide sequestration potential in Ukrainian soils

V. R. Cherlinka^{*1,2}, Y. M. Dmytruk¹, V. I. Sobko³, M. V. Gunchak³,
T. I. Balan¹, L. V. Cherlinka¹

¹Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University, Chernivtsi, Ukraine

²EOS Data Analytics inc, Menlo Park CA, USA

³Chernivtsi branch of the State Institution "Soils Protection Institute of Ukraine", Chernivtsi, Ukraine

ARTICLE INFO	ABSTRACT
Received 06.11.2021 Received in revised form 26.11.2021 Accepted 10.12.2021 Available online 20.12.2021 Keywords: GSOCseq; carbon dioxide sequestration; predicative algorithms; modelling	The article examines approaches to modelling carbon dioxide sequestration by soils at different scale levels and describes a number of problems encountered in this process. The main problems in the modelling of organic carbon reserves for the territory of Ukraine have been identified, among which: lack of high-resolution data (hard to access), including types of land use; need for harmonization of existing data; the need for predicative modelling of indicators (clay and organic carbon content) for areas where data are not available; significant amounts of machine time for actual modelling. The need for open access to archived data (technical reports) from large-scale soil surveys 1957-1990 is highlighted. Also, the need to access large-scale topographic data as in the form of scanned topographic maps M 1:10000 and vectorized isolines are substantiated. It is shown that calculations of areas based on rasters in the geographical coordinate system to ensure the same pixel size, regardless of the location within Ukraine, it is proposed to use the "Ukraine Albers conic equal area" projection based on the Datum Pulkovo 1942 for which the error in the lengths of the lines is only 0.1%. Within areas can be used as a proposed projection, as well as precise Gauss-Kruger projections (EPSG 28404-28407, 5565-5583). In this case, it is necessary to take into account the likelihood of finding individual areas in several of the listed zones. It is demonstrated that simulation allows to establish territories in which even the best practices of management do not provide neutralization of emission of organic carbon from soils. However, it is necessary to introduce a priority introduction of adaptive management of the soil resources of agro-landscapes that will contribute to carbon sequestration or minimization of its emission.

*E-mail: v.cherlinka@chnu.edu.ua

Citing: Cherlinka, V.R., Dmytruk, Y.M., Sobko, V.I., Gunchak, M.V., Balan, T. I. & Cherlinka, L.V. (2021). Challenges and opportunities of modelling carbon dioxide sequestration potential in Ukrainian soils. *AgroChemistry and Soil Science*. 92, 62-70. doi:10.31073/acss92-07.

1. Introduction

Taking into account the globality of the climate warming and all the negative consequences that it entails, there was a number of international initiatives to correct this situation. Thus, in 1992, United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) was signed, which was designed to prevent dangerous anthropogenic influence on the climatic Earth system [1]. Annual Climate Summits of the United Nations (Conference of the Parties, COP) raise topical current issues on reducing greenhouse gas emissions and prevention of possible effects of global warming. The Kyoto Protocol was signed on COP 3 [2], COP21 – Paris Climatic Agreement [3], and in Glasgow - COP26: a new climatic agreement, more efficient, compared to the Paris Agreement [4]. According to the latter, the country assumed to make steps that will reduce carbon emissions and to keep warming at 1.5°C. This is the limit for which the implementation of the scenarios of the climatic apocalypse begins. Failure to fulfill the promises of countries within the framework of the Paris Agreement will lead to heating the globe until the end of the 21st century significantly more than 1.5°C, which means an inevitable disaster [5]. This failed to full extent, although it was necessary to reduce global carbon dioxide emissions by 45% to 2030 compared to 2010, and to zero in 2050 [4]. Although at the methods and volumes of emission reductions are still discussions, the path of sequestration of carbon dioxide from the atmosphere of soils in the proceeding of progressive ways of land use is a prospective not causing doubts. It is better to fight with CO₂ emissions into the atmosphere by developing stable agricultural systems in which carbon is sequenced and stored in soils. The binding of carbon at the same time solves three problems: soil degradation, sustainable development and climate change [6]. Lal [7] says that the Carbon Sink Capacity of The World's Agricultural and Degraded Soils Is 50 to 66% of the Historic Carbon Loss (from 42 to 78 Gigatons of Carbon). The absorption of organic carbon using the recommended technologies depends on the soil structure and texture, climate (precipitation, temperature), agricultural systems. Among the strategies of increasing carbon reserves in soils - changes in land use, the very best increase in the forestry, growing energy crops on marginal lands, effective irrigation, optimal organization of pastures, but primarily – agrotechnology's that include minimal cultures, covering cultures, nutrients management, organic

fertilizers. Carbon sequestration with soils simultaneously contributes to increasing their quality, increasing their fertility, solving problems of providing food, compensate for fossil emissions by 0.4–1.2 carbon gigaton per year. Organic carbon soil is an extremely valuable natural resource. Regardless of climatic debates, its reserves should be restored.

Within the framework of the Kyoto Protocol, a carbon loan mechanism (the right to emission of one tone-equivalent of carbon dioxide) is proposed. It provides for the possibility of acquiring certain values on the right to emit greenhouse gases. And those manufacturers, primarily agrarians, which reduces emissions, can obtain carbon loans with the right to further resale. Therefore, the estimation of a potential level of carbon dioxide sequestration at the local level has not only scientific, but also quite obvious interest.

So, enormous attention to the potential of sequestration of soil organic carbon to soils of agricultural landscapes, as one of the most cost-effective in the environmental point of view decisions for mitigating the effects of climate change and adaptation to it is fully substantiated [8, 9]. However, the implementation of this potential depends on the creation of effective mechanisms for monitoring, reporting and verification (MRV) of changes in the reserves of organic carbon soils [10]. In any case, the first step is initiated under the auspices of the FAO program to create a global map of the potential of organic carbon sequestration [11] on the basis of the network of national maps [12]. Methods of sustainable soil management, which are considered within this approach, are directly transferred to three levels of carbon receipt. They are defined as a percentage increase in carbon occurring relative to the usual land use scenario. The use of predefined interest indicators with an increase in the volume of carbon receipt (Low / SSM1 – 5%, Medium / SSM2 – 10%, High / SSM3 – 20%) provides the use of the RothC model [13–15] on a global scale.

It is assumed that the model GSOCseq will serve as a starting point for creating a database for coordinating actions and strengthening international cooperation in order to mitigate the effects of climate change and food security. In this case, the approach from below to the top will be used, and member countries are proposed to prepare national maps of potential capabilities of binding of carbon dioxide by simulating its reserves for the 20-year period in agricultural land within the limited three different scenarios specified above. However, in the implementation of the process of modeling the sequestration of carbon dioxide, with soils of Ukraine, there is a number of problems that are often a non-trivial task. The purpose of this article is to provide proposals for solving these problems, as well as an analysis of possible ways to overcome barriers, which is definitely an actual and important task significantly, not only for its own soil science and land management, but also environmentalists, economists, managers of different levels, etc.

2. Materials and methods

According to the set task, we have identified stages [12], which would have a process of modeling sequestration of carbon dioxide, by soils [16, 17] and simultaneously highlighted problem issues of this process, in particular:

1. Preparing data (collection, harmonization).
2. Modelling (sub-steps Spin Up, Warm Up, Forward).
3. Generation of maps (total 28 variations for BAU, SSM1, SSM2, SSM3):
 - 3.1. Products (7 map): Final SOC stocks (tC/ha) & Uncertainties (%).
 - 3.2. SOC Absolute differences (4 map): SSM 1-3–T0 (tC/ha).
 - 3.2. Absolute sequestration rates (8 map): Abs. Diff./20 years (tC/ha/year).
 - 3.4. SOC Relative Differences (3 map): SSM1-3 – BAU (tC/ha/year).
 - 3.5. Relative sequestration rates (6 map): Rel. Diff./20 years (tC/ha/year) & Uncertainties (%).

From the listed steps, the first stage characterized by most frequent complexity and accuracy (Tab. 1), a detailed analysis of which will be conducted in the section.

The interpolation of climatic data to a higher resolution was carried out by the algorithm of regulated splines with tension [18] in GIS GRASS [19], and the modelling of carbon and clay content, map of agro-production groups of soils - in R-Statistic [20] by Random Forests algorithm [21].

The studies were conducted within the Chernivtsi region (Fig. 1a) parts of the Dniester administrative district (Fig. 1b). Output data for modeling (content of humus, Fig. 1c) obtained by the results of agrochemical certification of soils (Chernivtsi branch of the State Institution "Soils Protection Institute of Ukraine"), and agro-production groups of soils (Fig. 1d) - in accordance with the maps of the DP "Chernivtsi Research and Project Institute of Land Management". To simulate the spread of agro-production groups of soils within the range of studies, the SRTM data fragment [22] was loaded and resampled to a resolution (p) 25 m.

Table 1*Input data requirements and their source (modification on base [12])*

Data	Input data requirements				Resolution	
	Variables	Time series	Units	Type	GSOCseq map	Ukraine SOCseq map
Climatic data	Monthly air temperature	1980-2000; 2001-2020 (or until last year available)	°C	Raster	50x50 km or finer	50x50 km, 9x9 km or finer (interpolated)
	Monthly evapotranspiration (Penman-Monteith)	1980-2000; 2001-2020 (or until last year available)	mm	Raster	50x50 km or finer	50x50 km, 9x9 km or finer (interpolated)
	Monthly precipitation + irrigation	1980-2000; 2001-2020 (or until last year available)	mm	Raster	50x50 km or finer	50x50 km, 9x9 km or finer (interpolated)
Soil data	Topsoil clay content (0-30 cm)	-	%	Raster	1x1 km	1x1 km or finer
	Current Soil organic carbon stocks (0-30 cm)	Latest version of national FAO-GSOC map	tC ha-1	Raster	1x1 km	1x1 km or finer
Land use/cover	Predominant land use/cover, re-classified into 12 classes defined in the FAO Global Land Cover - SHARE (GLC-SHARE)	Minimum: representative 2000-2020 (or last year available) Optimum: annual land use 2000 to 2020	1-11	Raster	1x1 km	1x1 km or finer
	Monthly vegetation cover. Obtained from national statistics/local expert knowledge; or derived from NDVI or spectral indexes	Minimum: average 2015- 2020 (or last year available period) Optimum: monthly soil cover 2000 to 2020	0-1	Raster	1x1 km	1x1 km or finer

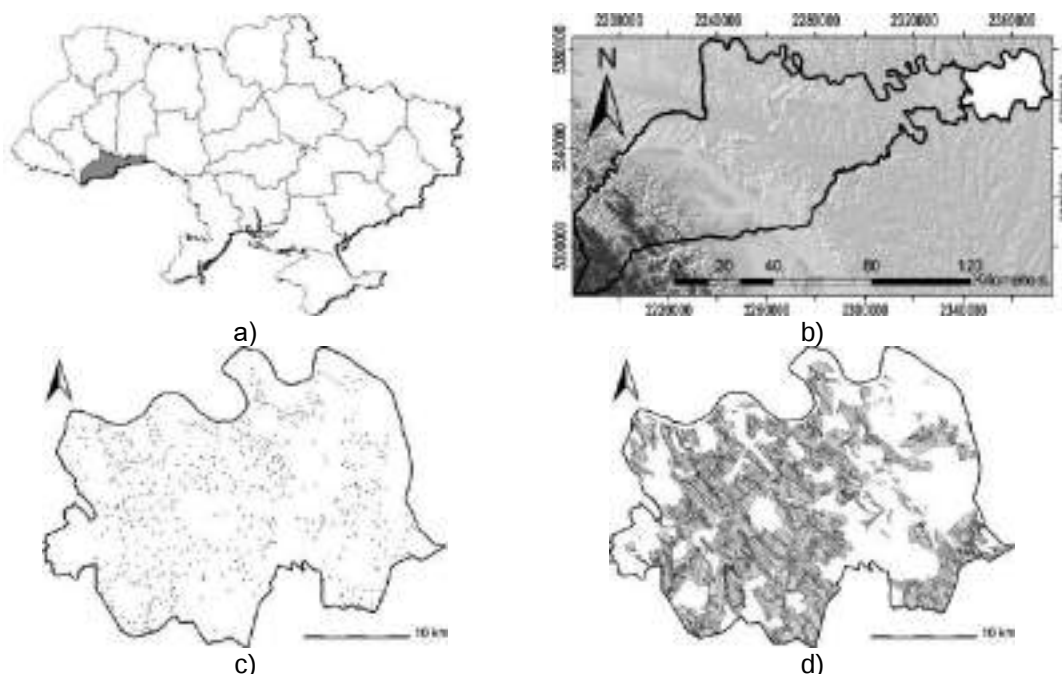


Fig. 1. Geographical location of the region of research within Ukraine (a) and Chernivtsi region (b); distribution of dataset points (c) and the availability of data large-scale soil surveys (d) *SRTM data was used for the background

Analysis of the nomenclature list of soils and the coordination of their contours, allowed to obtain preliminary data on the percentage of the territory with soil surveying. It is worth noting that the measurement of vector objects and their raster analogues shows some different results. If for large continuous areas, they are often identical, such as, for example, for the area of the district (67644.5 ha), the area of small contours – differs (Tab. 2). Which is lower spatial resolution,

the greater it will be this difference. Characterizing the structure of the soil cover, we find that dominant soils of soils are gray forest soils, dark gray forest soils and podzolized Chernozems. The structure of the soil cover is quite complicated and field studies are really covered with 51.4 % of the area of the district (Tab. 2, Fig. 1d). Such a picture is characteristic of the rest of Ukraine [23, 24]. At the same time, there are many locations where large-scale soil studies were not carried out in general, but there are intensively used in agricultural production, which is also characteristic of the study area (Fig. 1c, d).

Table 2

List of agro-production groups of soils of studies area

№	Cipher	Area of agro-production groups of soils, ha ($p=25$ m)			№	Cipher	Area of agro-production groups of soils, ha ($p=25$ m)		
		vector map	raster map	predictive raster map			vector map	raster map	predictive raster map
1	25e	11,68	11,50	12,44	28	103ezh	71,80	71,19	286,50
2	35d	11688,76	11389,06	26172,37	29	104dz	131,96	132,94	965,45
3	35e	24,64	24,50	425,57	30	104dk	87,35	87,88	559,74
4	37v	19,88	19,94	80,75	31	133e	22,51	22,25	39,83
5	37d	5021,22	4927,50	9962,84	32	133l	14,97	15,38	26,42
6	37e	15,75	15,69	50,47	33	139e	3,86	3,81	15,26
7	38e	1211,60	1207,25	2467,24	34	139l	57,54	57,06	336,36
8	38ezh	28,65	28,75	92,14	35	141e	1028,52	945,81	1729,50
9	39e	310,25	307,38	941,88	36	142e	395,29	394,56	422,38
10	40e	2792,37	2775,25	3331,38	37	149e	3,23	3,13	313,81
11	41e	783,14	781,13	957,13	38	175d	14,07	14,06	1,66
12	44e	20,35	20,38	20,38	39	175zl	6,02	6,13	53,34
13	45e	232,25	231,19	321,94	40	176g	6,32	6,19	37,50
14	49d	0,33	0,31	199,69	41	176e	16,17	16,19	437,19
15	49e	3705,33	3635,44	5350,61	42	208d	13,30	13,44	16,63
16	49l	16,25	16,19	237,89	43	208e	9,47	9,31	9,50
17	50e	554,56	520,06	896,81	44	210e	21,53	21,50	138,13
18	51e	66,74	63,94	80,63	45	215e	77,45	77,56	185,57
19	53e	63,61	63,88	288,06	46	215zh	1,81	1,88	8,18
20	55e	89,57	89,63	77,88	47	216e	0,63	0,56	1,12
21	75d	6,10	6,13	4,44	48	216l	22,42	22,94	23,26
22	82l	176,53	175,50	185,25	49	217ek	225,49	218,94	2033,82
23	85l	1128,94	1125,44	1381,31	50	217zh	155,03	154,31	1155,49
24	86l	1881,65	1868,25	2632,94	51	218e	0,62	0,63	0,13
25	87e	41,35	41,19	81,52	52	221e	5,74	5,88	15,87
26	87l	1129,35	1124,56	2041,48	53	221l	67,42	58,75	123,26
27	101d	88,48	88,56	334,56	Total:		33569,85	32920,88	67565,50

3. Results

Analysis of problems regarding the most important goal – modeling of organic carbon reserves in soils and evaluation of their temporal dynamics is carried out in accordance with the main stages we are recommended. First, if necessary to receive not indicative data (GSOCseq map, resolution 1 km), but more precise, for example, with $p=25$ m, which will provide solutions to the real tasks of calculating carbon credits on a scale of a separate field, it is difficult to access or absent this data in Ukraine (even the source data with $p=1$ km is a big problem).

Second, if the data is already collected, then the further process of harmonization is impossible without a number of improvements. After bringing heterogeneous data to a single coordinate system and cut for AOI (area of interest), it is necessary to evaluate their current p and do not simply resampling, but interpolation to the required resolution. The current version of the methodology uses the simplest option, that is, a mechanical increase in the resolution, which is a resampling by the algorithm of the nearest neighbor. In this case, smooth data gradients are not achieved and the same, for example, average temperatures on the boundaries of the former 50 km pixels will have a sharp change. Obviously, at the local level, this may be a significant difference in the final results.

We propose a tested algorithm [25], which adequately reproduces climatic and other indicators when resampling from low resolution data and provides a smooth, not discrete gradients. Actually, all climatic data (Tab. 1) were obtained by such an approach.

The third stage is modeling of soil data, in particular the content of clay (0-30 cm) and organic carbon reserves (0-30 cm) based on the map of agro-production groups of soils. As already shown, existing maps do not cover the entire territory of surveys, and therefore predicative

modeling was carried out for filling these gaps (Tab. 2, Fig. 2a) and obtained good level of Cohen's Kappa coefficient 89.5% (based on previous research [23-24, 26- 30]). Such a predictive map became the basis for model of clay content (Fig. 2b) and organic carbon (Fig. 2c). If the Random Forest algorithm used for the latter, the modeling of the clay content was non-trivial. Since measured values with a sufficient density of points are practically absent, then for obtaining information about the soil texture we used the ciphers of agro-production groups of soils obtained by the results of large-scale soil surveys on a scale of 1:10,000 (1957-1990). Each cipher corresponds to a certain group according to the soil texture and from each group were elected median the content of clay in two-fraction classification. In the future, we switched to three--fraction classification using Shein's methodology [31]. This was obtained by quantitative values of the clay content for all the polygons of each of the agrogroups, including and predicted for the study area (Fig. 2b).

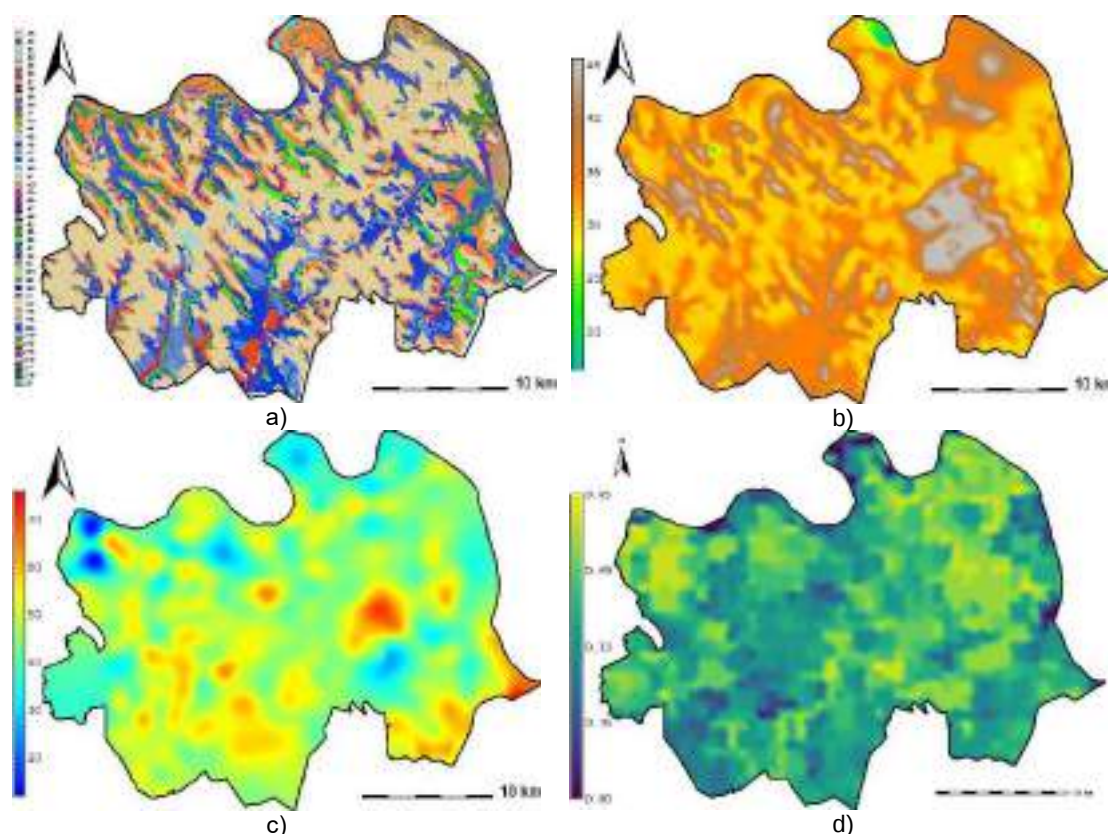


Fig. 2. Predicted cartograms of agro-production groups of soils (a) and input layers for the RothC model: clay content map (%) by classification FAO/USDA (b), organic carbon content (c), t/ha and NDVI index at $p=25$ m

The fourth stage provided for a choice of data on the type of land use (land use/cover, re-classified into 12 classes defined in the FAO Global Land Cover) and the degree of coverage of vegetation ((Monthly vegetation cover) are also needed to build a model. For vegetation, we used the NDVI index (Fig. 2d). In the absence of national data (maps) on the type of land use, we were forced to use open public sources, where the pixel size is approximated by 300 m. Since the interpolation here is incorrect (the limits of the settlement or land are discrete), then the type of land use contributes the most uncertainty in results.

The last stage is an actual modeling of the planned indicators, which allowed getting all the results in the form of a vector point file with intermediate and final data located in the corresponding fields of its attribute table. Here were consistently attracted supplemented and changed to work on local levels of scripts (generally 15) in the language R [20]. This stage requires the largest cost of machine time: at an average compute for 1 point (pixel center) about 2 seconds, field of 100 hectares for $p=25$ m is calculated about 1 hour. So, with the current implementation of the algorithm for building a potential sequestration map of carbon for the entire territory of Ukraine with $p=1$ km, only this stage will continuous about 25-30 days, and in resolution of 25 m in order more.

After completing the last script, we get results – full series of maps (see the section Materials and Methods). All of them have a significant value, but their characteristic requires a large volume of material, and therefore we demonstrate the results on the example of the relative

difference in organic carbon (SOC Relative Differences), which is defined as the difference between the practices of sustainable land use and traditional agriculture (SSM1–3 – BAU). As can be seen from the data (Fig. 3), there are quite significant areas where even modern sustainable land use practices is not enough to neutralize the emission of carbon dioxide. Accordingly, it is in these areas that it is advisable to pay the most attention to the type of agrotechnics, which will contribute to the sequestration of carbon or minimize its emission.

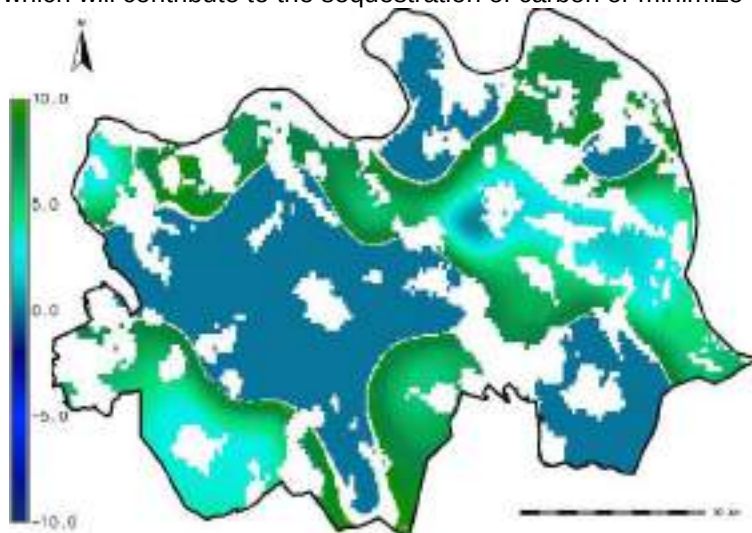


Fig. 3. Relative difference in the content of organic soil carbon (SOC Relative differences as SSM3–BAU, in tC/ha); white spots are territories of settlements and other areas for which the simulation is impossible

4. Discussion

The obtained results indicate that the RothC model in FAO implementation variant using a number of adaptations can be used at all levels: a state, regional or local (farm). For estimated judgments at different levels, it is necessary to choose the corresponding resolution parameter. For the state level, it is quite enough $p=1$ km, on the regional (oblast), in our opinion – 100 m, separate districts – 50, and farms – 25 m. Even such values p in modeling are currently prolonged in time and therefore one of the following directions of our research will be optimize the code and its implementation with all improvements in the faster programming languages then R.

It should be borne in mind that calculations on the basis of rasters stored in the geographic coordinate system have certain features. Technically, this is possible, however, measurements are not entirely correctly, since the area of the raster (pixel) will depend on latitude, because degrees are not linear units, but angular. In particular, the linear dimensions that are declared for GSOCseq map 1x1 km resolution grid (30 arcseconds), at the latitude of the equator make up 1x1 km; but at the latitude of the southern coast of Crimea ~1360x1420 m, in the area of the most northern point of Ukraine ~1500x1780 m. In the area of surveys, 30 arcseconds will be 1440x1590 m. Consequently, calculations on the scale of the whole state based on the geographical coordinate system will be too generalized, and therefore it is advisable to use projections that will provide single results for the entire territory of Ukraine. These include, in particular, used by us "Ukraine Albers conic equal area" projection based on the Datum Pulkovo 1942 with an extent of 22.00, 44.30, 40.20, 52.40, which in terms of Proj4 will have the appearance:

```
+proj=aea +lat_0=48 +lon_0=32 +lat_1=46 +lat_2=51 +x_0=796902 +y_0=0 +ellps=krass
+towgs84=23.57,-140.95,-79.8,0,0.35,0.79,-0.22 +units=m +no_defs +type=crs
```

The proposed option makes it possible to provide the same pixel size regardless of the location within Ukraine, while the error in the lengths of the lines is only 0.1%. Of course, within the oblasts you can use as a proposed projection, and more precise Gauss-Kruger projections (EPSG 28404-28407, 5565-5583). It is necessary to only take into account the likelihood of finding some areas in several of the listed zones.

A separate place is a problem with the insufficient accuracy map of the high-resolution content of the organic carbon content and the inaccessibility of data on its content in the surface (0–30 cm) of the soil layer (or any other). According to the conclusion of the authors of the organic carbon stock map of Ukraine with $p=1$ km [32], the spatial evaluation is based on a set of data, 30% of which are obtained in the period up to 1991 and therefore it is necessary to complement it with newer studies. These include the data of Soils Protection Institute of Ukraine, which every 5 years conduct agrochemical examination of fields and, accordingly, may have a solid array of

data. Deserves attention base of the properties of Ukraine soils [33] with a large amount of data on soil profiles. Integration of these and other databases into system for monitoring the soils of Ukraine and the national infrastructure of geospatial data and subsequent cooperation with WOSIS will be even a step towards close international cooperation between Ukraine in this area.

As indicated, there is a problem with data on granulometric structure of soils both global and local scales. The path of its solution shown to a certain extent is blocked by the inaccessibility of cartograms of agro-production groups of soils in open access. With them, it was possible to be acquainted with the website of the normative monetary assessment of agricultural land of Ukraine, but currently these data became unavailable. Their use and predictive algorithms would allow the corresponding card to the entire territory of Ukraine in a detailed scale. In addition to this possible future model, it would be possible to add data of Laktionova et al. [33] to obtain results that are more correct.

Potentially there is another way that can create prerequisites for the development of Ukrainian soil science - it is the use of the results of large-scale soil surveys of 1957-1990. Technical reports about surveys for 40 million hectares with schemes of soil profiles and pits, the results of laboratory surveys are practically stored in archives Land management institutes without working on the interests of the state, although great funds were spent on the state budget for these surveys. For political will, these materials could get to monitoring services in full volume, and their number, according to rough estimates, exceeds hundreds of thousands. Such results would be able to significantly expand the possibilities of any modeling both in soil science and in related sciences, providing managers of different levels with the most necessary information.

In addition to purely soil-based data, there is an urgent need to access large-scale topographic data, or in the form of scanned topographic maps M1:10000, or vectorized isolines. In the leading world states, these data are in free access, and are quite ready to use in the form of high-resolution digital elevation models. Of great importance for modeling carbon sequestration have maps of land types (land use), which are constantly updated and are publicly available, for example, in Europe.

Solving the complex of the above-described problems will develop maps of carbon sequestration potential by soils and to obtain more precise results than similar studies, which included the territory of Ukraine [34]. Such maps, despite the assessment of changes in the content of organic carbon, will allow specific measures to offer, if simulated practices of agriculture (traditional plowing, minimum or zero cultivation etc.) will not provide the necessary results. These include attribute such as the change in land use types: forest -> arable land, arable land -> pasture, forest -> pasture or any other combinations. To this, you can also add a carbon balance tool. For example, an EX-ANTE system (EX-ACT) has been FAO developed, which provides an assessment of projects, management programs of soil resources (lands) and agricultural development policies on carbon balance [35]. Integration of all mentioned tools and approaches creates a methodology for obtaining actual spatial information about emissions-sequestration of soil carbon. This will become the basis for making decisions by managers of all levels, providing the necessary data to mitigate climate change, supporting the necessary soil fertility, reduction of their degradation, providing international cooperation and trade and, as a result, state's food security.

5. Conclusion

The main problems in modeling organic carbon stocks for the territory of Ukraine are determined, among which: absence (difficult to access) high resolution data, including land use types; the need to harmonize existing data; the need for predictive modeling of indicators (clay and organic carbon content) for the areas where the necessary data is absent; significant volumes of machine time for computation.

There is a need for open access to archival data (soil essays) of the results of large-scale soil surveys of 1957–1990 and access to large-scale topographic data as in the form of scanned topographic cards M 1:10000 and vectorized isolines.

To ensure the same pixel size, regardless of the location within Ukraine, it is proposed to use the Ukraine Albers conic equal area projection based on the Datum Pulkovo 1942 for which the error in the lengths of the lines is only 0.1%. Within areas can be used as a proposed projection, as well as precise Gauss-Kruger projections (EPSG 28404-28407, 5565-5583). In this case, it is necessary to take into account the likelihood of finding individual areas in several of the listed zones.

Modeling allows you to establish territories in which even the best practices of management will not provide neutralization of the emission of organic carbon from soils. However, it is necessary to introduce a priority introduction of adaptive management of the soil resources of agro-landscapes that will contribute to carbon sequestration or minimization of its emission.

References

1. United Nations, and Canada. (1992). United Nations Framework Convention on Climate Change. [New York]: United Nations, General Assembly,
2. Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change. (1997). Dec. 10, 1997. 2303 U.N.T.S. 162.
3. Paris Agreement to the United Nations Framework Convention on Climate Change. (2015) Dec. 12, 2015. T.I.A.S. No. 16-1104.
4. Graham, F. (2021). COP26: Glasgow Climate Pact signed into history. *Nature*. DOI: <https://doi.org/10.1038/d41586-021-03464-9>.
5. IPCC. 2018. Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (Eds.)].
6. Boincean, B. P. & Dent, D. L. (2019). *Farming the black earth. Sustainable and Climate-Smart Management of Chernozem Soil*. Springer Nature, Cham, Switzerland AG. doi: 10.1007/978-3-030-22533-9.
7. Lal, R. (2004). Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, 304(5677), 1623-1627. doi: 10.1126/science.1097396.
8. Vargas-Rojas, R., Cuevas-Corona, R., Yigini Y., Tong, Y., Bazza, Z. & Wiese L. (2018). International Yearbook of Soil Law and Policy. In Ginzky H., Dooley E., Heuser I.L., Kasimbazi E., Markus T., Qin T. (Eds.). *International Yearbook of Soil Law and Policy*. Cham, Springer International Publishing. pp. 373–395. doi: 10.1007/978-3-030-00758-4_18.
9. FAO. (2017). Unlocking the potential of soil organic carbon. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome, Italy.
10. FAO. (2020). A protocol for measurement, monitoring, reporting and verification of soil organic carbon in agricultural landscapes – GSOC-MRV Protocol. Rome. doi: 10.4060/cb0509en.
11. FAO. (2021). Global Soil Organic Carbon Sequestration Potential Map (GSOCseq). URL: <https://www.fao.org/global-soil-partnership/gsocseq-map/en>.
12. FAO. (2020). Technical specifications and country guidelines for Global Soil Organic Carbon Sequestration Potential Map (GSOCseq). Rome, Italy. URL: <https://www.fao.org/documents/card/ru/c/cb0353en>.
13. Jenkinson, D. S. & Rayner, J. H. (1977). The turnover of soil organic matter in some of the Rothamsted classical experiments. *Soil science*, 123(5), 298-305. doi: 10.1097/00010694-197705000-00005.
14. Jenkinson, D. S. (1990). The turnover of organic carbon and nitrogen in soil. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, 329, 361-368. doi: 10.1098/rstb.1990.0177.
15. Sierra, C. A., Müller, M. & Trumbore, S. E. (2012). Models of soil organic matter decomposition: the SoilR package, version 1.0. *Geoscientific Model Development*, 5, 4, 1045-1060. doi: 10.5194/gmd-5-1045-2012.
16. Coleman, K. & Jenkinson, D. S. (1996). RothC-26.3-A Model for the turnover of carbon in soil. In: Powlson D.S., Smith P., Smith J.U. (Eds.). *Evaluation of Soil Organic Matter Models*. NATO ASI Series (Series I: Global Environmental Change). Vol. 38. Springer, Berlin, Heidelberg. doi: 10.1007/978-3-642-61094-3_17.
17. Falloon, P. & Smith, P. (2009). Modeling Soil Carbon Dynamics. In: Kutsch W. L., Bahn M., Heinemeyer A. (Eds.). *Soil carbon dynamics: an integrated methodology*. Cambridge University Press. doi: 10.1017/CBO9780511711794.
18. Mitášová, H. & Mitáš, L. (1993). Interpolation by regularized spline with tension: I. Theory and implementation. *Mathematical Geology*, 25(6), 641-655.
19. GRASS Development Team. Geographic Resources Analysis Support System (GRASS GIS) Software. (2021). Version 7.8.6. Open Source Geospatial Foundation, 2021. URL: <http://grass.osgeo.org> (online; accessed: 1.09.2021).
20. R Development Core Team. (2021). R: A language and environment for statistical computing. *R Foundation for Statistical Computing*. URL: <http://www.r-project.org>.
21. Breiman, L. (2001). Random forests. *Machine learning*, 45(1), 5-32. doi: 10.1023/A:1010933404324.
22. NASA JPL. (2013). NASA Shuttle Radar Topography Mission Global 1 arc second. Distributed by NASA EOSDIS Land Processes DAAC. doi: 10.5067/MEASURES/SRTM/SRTMGL1.003. Accessed 2021-06-01.
23. Dmytruk, Y., Cherlinka, V. & Demyd, I. (2019). Predicative soil cartographic materials as an element of modern large-scale surveys. *Visnyk of Lviv National Agrarian University: Agronomy*, 23, 202-206. doi: 10.31734/agronomy2019.01.202. [in Ukrainian]
24. Iatsuk, I., Dmytruk, Y., Cherlinka, V. & Dent, D. (2021). Status and Problems of Normative Monetary Valuation of Land in Ukraine. In: Dmytruk, Y. & Dent, D. (Eds.). *Soils Under Stress: More Work for Soil Science in Ukraine*. Cham: Springer International Publishing. pp. 17-26. doi: 10.1007/978-3-030-68394-8_2.
25. Hofierka, J., Parajka, J., Mitasova, H. & Mitas, L. (2002). Multivariate interpolation of precipitation using regularized spline with tension. *Transactions in GIS*, 6(2), 135-150. doi: 10.1111/1467-9671.00101.
26. Cherlinka, V. R. (2019). Digital elevation models in soil science: theoretical and methodological bases and practical application: Extended Abstract of Dr. Biol. Sciences: 03.00.18. Dissertation, Chernivtsi, Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University, 538 p. URL: https://drive.google.com/open?id=1TZubbaD3fNik7FQUkSyZOdK_dPpozqN [in Ukrainian].
27. Cherlinka, V. R. (2017). Influence of resolution of digital relief models on the quality of predicative simulation of soil cover. *Soil Science*. 18(1-2), 79-95. [in Ukrainian].
28. Cherlinka, V. R. & Dmytruk, Y. M. (2018). Solving existing problems with soil maps in Ukraine. *Biological systems*, 10(1), 298-308. URL: <http://biosystems-journal.chnu.edu.ua/index.php?journal=BioSystems&page=article&op=view&path%5B%5D=https%3A%2F%2Fdoi.org%2F10.31861%2Fbiosystems2018.01.094>.
29. Cherlinka, V. (2017). Using Geostatistics, DEM and remote sensing to clarify soil cover maps of Ukraine. In: Dent, D., Dmytruk, Y. (Eds.), *Soil Science Working for a Living: Applications of soil science to present-day problems*. Springer-Verlag GmbH, Cham, Switzerland, Ch. 7, pp. 89–100. doi: 10.1007/978-3-319-45417-7_7.

30. Cherlinka, V. R. (2017). Variations of predictive efficiency of soil maps depending on the methods of constructing educational samples of predicative algorithms. *Ecology and noospherology*, 28(3-4), 55-71. URL: <http://erae.dp.ua/index.php/erae/article/view/20>. [in Ukrainian].
31. Shein, E. V. (2009). Granulometric composition of soils: problems of investigation methods, interpretation of results and classifications. *Pochvovedenie*, 3, 309-317. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=11722362>. [in Russian].
32. Viatkin, K., Zalavskiy, Y., Bihun, O., Lebed, V., Sherstiuk, O., Plisko, I. & Nakisko, S. (2018). Creation of the Ukrainian national soil organic carbon stocks map using digital soil mapping methods. *Pochvovedenie i agrokimiya*, 2, 5-17. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sozdanie-natsionalnoy-karty-zapasov-organicheskogo-ugleroda-v-pochvah-ukrainy-s-ispolzovaniem-tsifrovyyh-metodov-pochvennogo>. [in Russian].
33. Laktionova, T. M., Medvedev, V. V., Savchenko, K. V., Bigun, O. M., Nakisko, S. G. & Sheiko S. M. (2012). Soil properties of Ukraine database (structure & operating procedure). 2nd edition. Kharkiv: Apostrof. 150 p. URL: <http://www.issar.com.ua/uk/vydannya/baza-dannyh-svoystva-pochv-ukrayny-struktura-y-poryadok-yspolzovannya> [in Russian].
34. Smith, J. O., Smith, P., Wattenbach, M., Gottschalk, P. I. A., Romanenkov V. A., Shevtsova, L. K., ... Lisovoi, N. V. (2007). Projected changes in the organic carbon stocks of cropland mineral soils of European Russia and the Ukraine, 1990–2070. *Global Change Biology*, 13(2), 342-356. doi: 10.1111/j.1365-2486.2006.01297.x.
35. FAO. (2021). The EX-Ante Carbon-balance Tool (EX-ACT). Economic and Policy Analysis of Climate Change. URL: <https://www.fao.org/in-action/epic/ex-act-tool/suite-of-tools/ex-act/en>.

УДК 631.4:551.4:004.942

Проблеми та можливості моделювання потенціалу секвестрації діоксиду карбону ґрунтами України

В. Р. Черлінка^{1,2}, Ю. М. Дмитрук¹, В. І. Собко³, М.В.Гунчак³, Т. І. Балан¹, Л. В. Черлінка¹

¹Чернівецький національний університет ім. Ю. Федьковича, Чернівці, Україна

²EOS Data Analytics inc, Menlo Park CA, USA

³Чернівецька філія ДУ «Інститут охорони ґрунтів України», Чернівці, Україна

*E-mail: v.cherlinka@chnu.edu.ua

У статті розглянуто підходи до моделювання секвестрації діоксиду вуглецю ґрунтами України на різних масштабних рівнях та охарактеризовано ряд проблем, які виникають в ході цього процесу. Визначено основні проблеми в моделюванні запасів органічного вуглецю для території України, серед яких: відсутність (важкодоступність) даних високої роздільної здатності, у тому числі, про типи землекористування; необхідність гармонізації наявних даних; потреба в предикативному моделюванні показників (гранулометричний склад, вміст органічного вуглецю) для ареалів, де необхідні дані відсутні; істотні об'єми машинного часу для власне моделювання. Вказано на потребу відкритого доступу до архівних даних — ґрунтових нарисів, результатів великомасштабних ґрунтових обстежень 1957-1990 рр. та у доступі до великомасштабних топографічних даних, як у вигляді сканованих топографічних карт М 1:10000, так і векторизованих горизонталей. Для забезпечення однакового розміру пікселя, незалежно від місцезнаходження в межах України, запропоновано використання проєкції Ukraine Albers Conic Equal Area на основі датума Pulkovo 1942, за якого похибка у довжинах ліній становить всього 0,1 % і показано, що в межах адміністративних областей можна використовувати як пропоновану проєкцію, так і більш точніші проєкції Гаусса-Крюгера із відповідними засторогами. Продемонстровано, що моделювання дозволяє встановити території, в яких навіть найкращі практики господарювання не забезпечують нейтралізацію емісії органічного вуглецю з ґрунтів. Саме в таких ареалах є необхідним першочергове запровадження адаптивного управління ґрунтовими ресурсами агроландшафтів, яке сприятиме секвестрації вуглецю чи мінімізації його емісії.

Ключові слова: GSOCseq; секвестрація діоксиду карбону; предикативні алгоритми; моделювання

Форма цитування: Cherlinka V.R., Dmytruk Y.M., Sobko V.I., Gunchak M.V., Balan T.I. & Cherlinka L.V. (2021). Challenges and opportunities of modelling carbon dioxide sequestration potential in Ukrainian soils. *AgroChemistry and Soil Science*, 92, 62-70. doi:10.31073/acss92-07

ДОСЛІДЖЕННЯ МОЛОДИХ НАУКОВЦІВ STUDIES of YOUNG SCIENTISTS

УДК 631.445.4; 631.416.2

Просторова та часова варіабельність вмісту рухомого фосфору в орному шарі ґрунтів за даними різних методів¹

С.С. Коваленко

Національний науковий центр «Інститут ґрунтознавства та агрохімії імені О.Н. Соколовського»,
Харків, Україна

ІНФОРМАЦІЯ	АНОТАЦІЯ
Отримано 01.10.2021 Отримано після доопрацювання 06.12.2021 Затверджено до видання 10.12.2021 Доступно онлайн 20.12.2021	Мета статті – висвітлення результатів оцінювання сталості у часі та просторі вмісту рухомих сполук фосфору у ґрунті в межах орного шару на окремих земельних ділянках. Дослідження проводили впродовж 2018–2020 рр. на двох полях дослідного господарства «Граківське» ННЦ «ІГА імені О.Н. Соколовського» у Харківській області України. Ґрунтовий покрив одного з полів становлять чорнозем опідзолений (Chernic Phaeozem) в комплексі з темно-сірим опідзоленим ґрунтом (Luvic Greyzem Phaeozem), а другого поля — чорнозем типовий (Haplic Chernozem) з еродованими та підвищено зволженими різновидами. Кожне поле розділено на 24 ділянки, з яких відбирали змішані зразки ґрунту з 7 індивідуальних проб із шару 0–30 см двічі за сезон — у квітні–травні та у жовтні–листопаді. На ґрунтах опідзоленого ряду виявлено високу амплітуду коливань значень рН сольового впродовж 3-річних спостережень — від 4,4 до 5,2. Внаслідок цього параметри насиченості ґрунтів рухомих фосфором, визначені за методами Чирикова та Мачигіна значно відрізнялись. На полі з чорноземом типовим результати вимірювань за обома методами були близькими. Результати аналізування вмісту рухомого фосфору в ґрунтах поля за середніми значеннями сукупності індивідуальних проб не показали істотних сезонних відмінностей. Однак на кожному з полів виявилися окремі локації з більш високими значеннями як за методом Чирикова, так і за методом Мачигіна, незалежно від сезону відбирання проб. Поряд з цим, на обох полях є локації, де обидва методи визначення показують різні тенденції просторового розподілу вмісту рухомого фосфору, що свідчить про штучний характер такої неоднорідності, зумовленої більше хіміко-аналітичними причинами, аніж рухомістю фосфору.

Ключові слова:

методи;
просторова
варіабельність;
фосфор рухомий;
чорнозем;

* E-mail: stanislawkowalenko@gmail.com

Форма цитування: Коваленко С.С. Просторова та часова варіабельність вмісту рухомого фосфору в орному шарі ґрунтів за даними різних методів. *Агрохімія і ґрунтознавство*. Міжвід. тем. наук. збірник. 2021. Вип. 92. Харків: ННЦ «ІГА ім. О.Н. Соколовського». С. 71-79. <https://doi.org/10.31073/acss92-08>

1. Вступ

Одним з найбільш технологічно розвинутих напрямів сучасного землеробства є так зване «точне землеробство» («precise agriculture»), за якого враховують геопросторову інформацію щодо властивостей ґрунтів та стану рослин для диференційованого обробітку ґрунту, удобрення, застосування пестицидів тощо. Точне внесення мінеральних добрив, на підставі такої інформації, дозволяє скоротити витрати та водночас зменшити екологічні ризики [1, 2]. За даними А. Iho та М. Laukkanen, точне управління фосфорним живленням за допомогою диференційованого внесення добрив, залежно від накопичення у ґрунті його рухомих форм, може значно зменшити фосфорне навантаження на агроєкосистеми та запобігти шкоди довкіллю від надмірного удобрення [3].

Необхідною передумовою диференційованого внесення добрив за принципами точного землеробства є наявність просторової неоднорідності забезпеченості рослин доступними ґрунтовими формами елементів живлення. Дослідженнями В.В. Медведєва доведено, що просторова неоднорідність ґрунтів України є здебільшого ймовірно-статистичним наслідком дії реліктових та рецентних чинників ґрунтоутворення [4]. Через це закономірності просторового розподілу елементів живлення у ґрунті можуть бути зумовлені як природними, так і антропогенними чинниками.

Накопичення рухомого фосфору (визначеного за Олсенем) у пониженнях з підвищеною вологістю було виявлено дослідженнями Н.Ф. Wilson et al. [5] на горбистих сільськогосподарських ландшафтах південного заходу канадської Манітоби.

¹ Науковий керівник роботи: М.М. Мірошніченко, д-р біол. наук, чл.-кор. НААН

Для оцінки фосфорного стану ґрунтів найчастіше застосовують показник вмісту рухомих форм, який визначають за різними методами, залежно від типу ґрунту та прийнятої в країні агрохімічної практики. Дослідженнями А. Piotrowska-Długosz et al. [6] на Luvisol typical (аналог сірих лісових ґрунтів) показано, що незалежно від сезону (квітень/серпень) найбільш варіабельними, серед форм фосфору в ґрунті, є рухомі сполуки, які визначено за Egner-Riehm (метод Егнера-Рімма, витяжка 0,1 н $\text{NH}_4\text{C}_2\text{H}_5\text{O}_3$, рН 3,7), органічні форми мають середню варіабельність, а неорганічні форми — слабку.

Поряд з цим, питання сталості структури просторової неоднорідності в часі досліджено недостатньо. Відомо, що сезонна динаміка вмісту поживних речовин у ґрунті досить висока. За даними Є.Г. Пивоварової [7], в межах одного поля за різних строків відбирання проб фактор сезонної динаміки більше ніж у три рази перевищував фактор просторової варіації. Поряд із цим, за певних умов можливе й інше співвідношення змін у часі та просторі, адже згідно зі спостереженнями А.І. Мельника зі співавторами [8], мінливість у часі параметрів вмісту рухомого фосфору не перевищує розміру похибки визначення, а середні коефіцієнти варіації становлять 9,2–10,1 %. Аналіз часової мінливості рухомого фосфору в *Orthic Luvisol* в Чехії також виявив відносно невисокий її рівень, але коефіцієнт варіабельності сягав 50–64 % [9]. За даними П.Г. Адерихіна і Д.І. Шубіної [10], в межах одного ареалу чорнозему типового вміст рухомого фосфору в ґрунті орного шару варіював від 76 до 210 мг/кг.

Оскільки впровадження точного землеробства вимагає великого обсягу польових та аналітичних робіт для одержання вихідних даних про неоднорідність властивостей ґрунтів, наразі ведеться пошук шляхів для спрощення та здешевлення цієї процедури. Зменшення кількості вихідних точок опробування більше ніж удвічі може бути досягнуто завдяки застосуванню нових технологій цифрового картографування з використанням штучного інтелекту [11]. Ще одним способом здешевлення здобування необхідної вихідної інформації щодо просторового розподілу рухомого фосфору в ґрунті є застосування дистанційних або безконтактних методів вимірювань. На жаль, найбільш поширені спектрофотометри, що працюють у видимій ближній інфрачервоній або середньо-інфрачервоній частині спектру, не забезпечують достатньої надійності та точності даних [12]. З цих причин, більш реальним шляхом зменшення собівартості робіт з визначення структури просторової неоднорідності може бути виявлення їхньої сталої складової, яка зумовлена геоморфологією, гранулометричним складом ґрунту, водним режимом або іншими чинниками.

Згідно з робочою гіпотезою, критерієм такої сталості може бути наявність локацій зі збільшеним чи зменшеним вмістом фосфору, незалежно від сезону, року досліджень або методу аналітичного визначення. У зв'язку з цим, метою статті було оцінювання збіжності результатів визначення вмісту рухомого фосфору за різними методами впродовж 3-річного циклу досліджень.

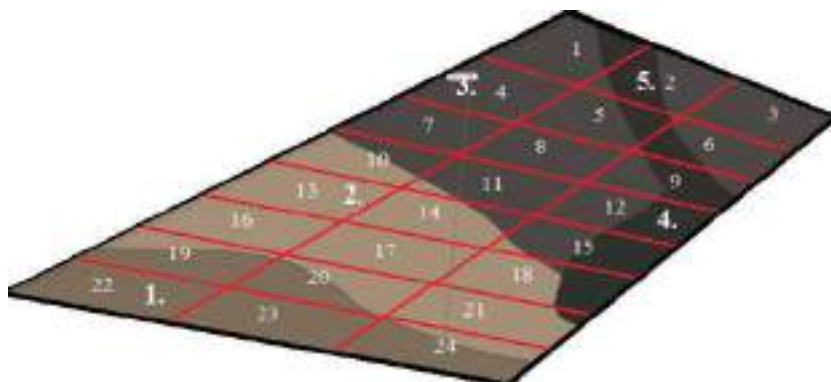
2. Об'єкти та методика досліджень

Дослідження проводили на двох дослідних полях ДП «ДГ «Граківське» ННЦ «ІГА імені О.Н. Соколовського» у Харківській області. Кожне поле було розділене на 24 майданчики для спостережень.

Об'єкт № 1 — дослідне поле площею 48,7 га, розташоване на території Коротичанського відділення ДП ДГ «Граківське» (у Харківському районі). Ґрунтовий покрив поля (Рис. 1) включає чорнозем опідзолений (шифр 3.) і темно-сірий опідзолений ґрунт (1.), але є також їхні різновиди, а саме: темно-сірий опідзолений слабксероморфний ґрунт у комплексі з еродованим (2.), чорнозем опідзолений підвищено зволожений (4.), чорнозем опідзолений намитий (5.). Через строкатість ґрунтового покриття вміст органічного вуглецю в ґрунті орного шару на цьому полі коливається від 2,1 до 3,8 %, рН сольовий — від 4,60 до 5,40.

Об'єкт № 2 — дослідне поле площею 24 га, розташоване в ДП ДГ «Граківське» у селищі Дослідне (у Чугуївському районі). У ґрунтовому покритті поля (Рис. 2) переважає чорнозем типовий, але є також контури його еродованих (шифр 2 v), вилугуваних та підвищено звожених (3 v) різновидів. Вміст органічного вуглецю у ґрунті орного шару коливається від 3,42 % до 3,88 %, рН сольовий — від 5,55 до 7,00.

Дослідження проводили з квітня 2018 до листопада 2020 р. Проби ґрунту відбирали з шару 0-30 см кожного року у квітні–травні та у жовтні–листопаді. На кожному з 24 робочих майданчиків, позначених на рис. 1 і 2, у центральній точці з визначеними координатами та у радіусі 10 м від неї відбирали 7 індивідуальних проб, з яких формували змішаний зразок для аналізування. Таким чином на кожному майданчику за три роки було відібрано у часі по 6 змішаних зразків — 3 весною та 3 восени.



Ґрунти: 1 – темно-сірий опідзолений; 2 – темно-сірий у комплексі з еродованими; 3 – чорнозем опідзолений; 4 – чорнозем опідзолений зволожений; 5 – чорнозем опідзолений намитий

Рис. 1. Ґрунтовий покрив та схема розбивки на робочі майданчики об'єкта № 1



Ґрунти: фон – чорнозем типовий; 2 v – чорнозем типовий еродований; 3 v – чорнозем типовий підвищено зволожений

Рис. 2. Ґрунтовий покрив та схема розбивки на робочі майданчики об'єкта № 2

Ланка сівозміни у період 2018-2020 рр. була такою: на об'єкті № 1 — чистий пар—соняшник—кукурудза на зерно, а на об'єкті № 2 — соняшник—кукурудза на зерно—ячмінь. Внесення добрив: нітроамофоска 150 кг/га (2018 р.), аммофос 120 кг/га (2019 і 2020 рр.).

У відібраних пробах ґрунту визначали вміст рухомого фосфору після екстрагування 0.5 н CH_3COOH за Чириковим згідно з ДСТУ 4115 та після екстрагування 1 % $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ за Мачигіним згідно з ДСТУ 4114, а також рН сольовий згідно з ДСТУ 7910. Вміст органічного вуглецю визначено за методом сульфохромного спалювання згідно з ДСТУ 4289. Статистичну обробку даних проводили за допомогою пакету STATISTICA 13.5.0.17.

3. Результати досліджень

Відповідно до сфери застосування національних стандартів на методи визначення рухомого фосфору, метод Чирикова рекомендовано для ґрунтів опідзоленого ряду, а саме: чорноземів опідзолених, темно-сірих опідзолених, сірих та ясно-сірих лісових ґрунтів, а метод Мачигіна — для всіх вищезазначених ґрунтів, а також інших чорноземів (типових, звичайних і південних), лучно-чорноземних, темно-каштанових та інших ґрунтів. Таким чином, на об'єкті №1 правомірним є застосування обох методів, а на об'єкті № 2 більш правильним є застосування методу Мачигіна. Причиною такого обмеження сфери застосування методу Чирикова, як вважає А. Христенко [13], є ймовірність штучного завищення результатів у випадках наявності у ґрунтах апатитоподібних сполук фосфору. Однак, у практиці агрохімічної паспортизації в Харківській області на чорноземах типових до цього часу здебільшого застосовують метод Чирикова. Більше того, агрохімічного паспортизацію передбачено усереднення показників в межах робочих ділянок площею 15 га, що призводить до ігнорування неоднорідності ґрунтів за їх властивостями, у т.ч. за вмістом рухомого фосфору.

За результатами нашого дослідження на об'єкті № 1, середній вміст рухомого фосфору (із поправними коефіцієнтами, запропонованими А.О. Христенко [13]), у період від 30.05.2018 до 17.06.2020 становив 40,0–47,3 мг/кг ґрунту за Чириковим (що відповідає низькому ступеню забезпеченості згідно з рекомендованим групуванням ґрунтів²) та 16,9–31,5 мг/кг — за Мачигіним (середній та підвищений ступінь забезпеченості), що суперечить одне одному (Табл. 1). Тільки восени 2020 р. після внесення мінеральних добрив на цьому полі вміст рухомого фосфору за Чириковим збільшився до середнього ступеня забезпеченості.

Таблиця 1

Статистичні характеристики варіабельності вмісту в ґрунті рухомого фосфору на об'єкті №1 (шар 0–30 см)

Показник	Вміст рухомого фосфору (P_2O_5), мг/кг ґрунту					
	2018		2019		2020	
	30.05	03.08	30.05	03.09	17.06	21.07
<i>За методом Чирикова</i>						
Середнє арифметичне значення	46,2	47,3	47,2	40,0	42,8	70,0
Стандартна помилка середнього	2,8	2,5	2,4	1,1	2,2	12,2
Стандартне відхилення	13,5	12,2	11,8	5,2	10,6	59,6
Коефіцієнт варіації, %	29	26	25	13	25	85
<i>За методом Мачигіна</i>						
Середнє арифметичне значення	21,9	20,6	23,6	16,9	19,3	31,5
Стандартна помилка середнього	0,8	0,6	0,7	0,4	0,6	1,9
Стандартне відхилення	3,9	3,1	3,5	2,1	2,8	9,5
Коефіцієнт варіації, %	18	15	15	12	14	30

Можна припустити, що ґрунти об'єкта №1 також містять апатитоподібні або інші сполуки, що призводить до суперечливості результатів вимірювань за двома методами, адже на архівних картах ґрунти ідентифікувалися як чорноземи типові. Звертає на себе увагу також вища варіабельність результатів аналізу за методом Чирикова, що може бути наслідком впливу стороннього чинника, наприклад, кислотності ґрунту. Динаміку рН показано на рис. 3.

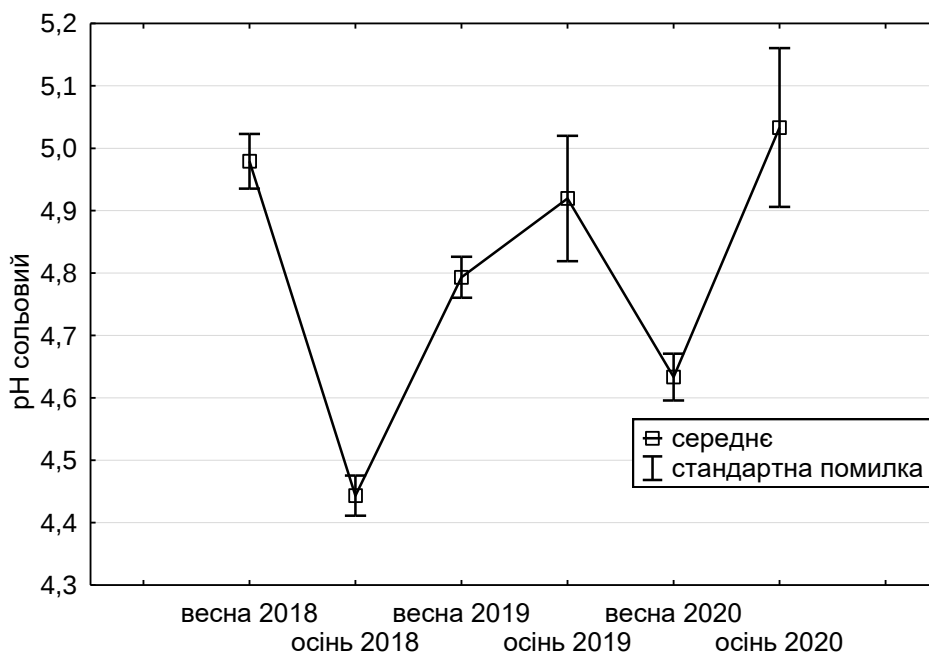


Рис. 3. Динаміка значень рН сольового ґрунту на об'єкті № 1 (шар 0–30 см)

Встановлено, що значення рН сольової витяжки, впродовж трьох років досліджень, зазнавали коливань зі значною амплітудою, змінюючись від 4,6 до 5,4, що можна було б

² Методика проведення агрохімічної паспортизації земель сільськогосподарського призначення: керівний нормативний документ / за ред. І.П. Яцука, С.А. Балока. Вид. 2-е допов. Київ, 2019. 108 с.

пов'язати з відповідною сезонною міграцією ґрунтових карбонатів у профілі [15]. Однак, динаміка змін рН (Рис. 3.) не виявила сезонного характеру, оскільки падіння значень спостерігалось як восени 2018 р., так і навесні 2020 р.

На об'єкті № 2 загальною оцінкою фосфатного стану за двома методами не виявлено суперечності (Табл. 2). Середній вміст рухомого фосфору за методом Чирикова становив у 2018–2020 рр. 97,8–115,9 мг/кг ґрунту (переважно підвищений ступінь забезпеченості), а за методом Мачигіна — 31,2–55,7 мг/кг ґрунту (підвищений та високий ступінь забезпеченості). Більш висока варіабельність даних притаманна результатам вимірювань за методом Мачигіна.

Таблиця 2

Статистичні характеристики варіабельності вмісту в ґрунті рухомого фосфору на об'єкті №2 (шар 0–30 см)

Показник	Вміст рухомого фосфору (P_2O_5), мг/кг ґрунту					
	2018		2019		2020	
	30.05	03.08	30.05	03.09	17.06	21.07
<i>За методом Чирикова</i>						
Середнє арифметичне значення	102,6	106,4	97,8	115,9	100,3	103,2
Стандартна помилка середнього	4,4	4,1	4,1	5,3	3,4	4,6
Стандартне відхилення	21,4	19,8	20,2	25,9	16,6	22,4
Коефіцієнт варіації, %	21	19	21	22	17	22
<i>За методом Мачигіна</i>						
Середнє арифметичне значення	44,1	45,7	41,7	55,7	46,4	31,2
Стандартна помилка середнього	1,6	2,6	3,3	5,3	2,2	2,3
Стандартне відхилення	7,9	12,8	16,2	25,8	10,7	11,5
Коефіцієнт варіації, %	18	28	39	46	23	37

Динаміка рН сольового на об'єкті № 2 виявилася подібною до об'єкту № 1 (Рис. 4). Це наводить на думку про подібність причин її виникнення, а саме, через схожість зміни гідротермічних умов у Харківському регіоні у період досліджень. Найнижчі значення рН зафіксовано восени 2018 р. та навесні 2020 р., але загальний рівень реакції ґрунту був вищим, ніж на об'єкті № 1.

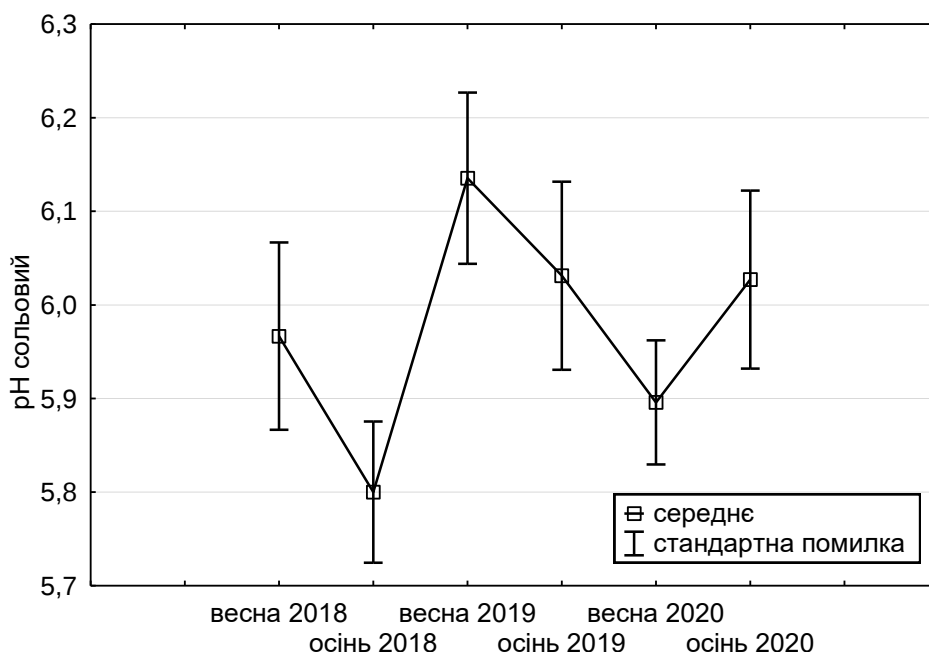


Рис. 4. Динаміка значень рН сольового ґрунтів на об'єкті № 2 (шар 0–30 см)

4. Обговорення результатів

Таким чином, оцінюючи фосфатний стан ґрунтів усього поля за середніми значеннями сукупності індивідуальних проб, як це передбачено методикою агрохімічної паспортизації, ми не знайшли підстав для твердження про істотні сезонні коливання. Різниця була або у межах стандартної помилки, або змінювалася протилежним чином. Це збігається з висновками А. Христенка [13], а також А. Мельника із співавторами [8] про цілком стабільний характер вмісту в ґрунті рухомого фосфору.

Однак, детальний аналіз усієї сукупності даних свідчить про наявність окремих локацій, на яких неодноразово спостерігали більш високий або низький вміст рухомого фосфору, аніж в середньому по полю. Більше того, якщо така особливість ґрунтів у певних місцях має природний, а не штучний характер, то більш високий або низький вміст рухомого фосфору має проявлятися систематично і незалежно від обраного методу.

Для перевірки правильності нашої гіпотези щодо наявності сталої складової просторової неоднорідності ґрунтів за вмістом рухомого фосфору ми порівняли результати спостережень на кожному з об'єктів за обома методами визначення цього показника, а саме: за Чириковим та за Мачигіним. На графіках (Рис. 5), складених за методом накопичувального підсумку, добре видно, що на об'єкті №1 є низка локацій, де неодноразово зафіксовано високі значення, вище середнього, як за методом Чирикова, так і за методом Мачигіна. Зокрема, це майданчики 5, 9, 15, 17, 21, 23. Згідно з ґрунтовою картою, на цих локаціях залягають різні ґрунти, що не дає підстав стверджувати про зв'язок підвищеного вмісту рухомого фосфору з генезисом ґрунтів. Це зрозуміло, оскільки ми досліджували лише орний шар ґрунтів.

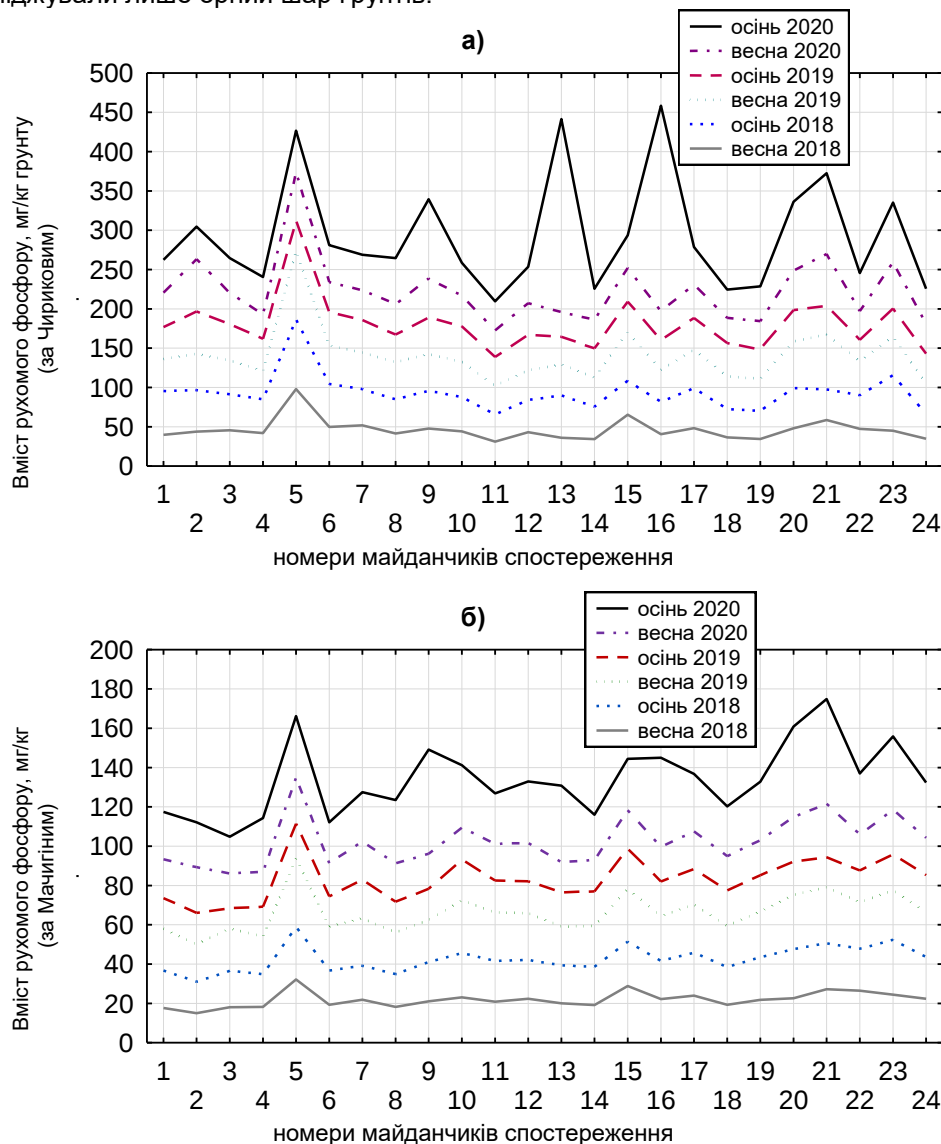


Рис. 5. Вміст рухомого фосфору у ґрунті пробних майданчиків на об'єкті №1 за методами Чирикова (а) та Мачигіна (б)

Аналогічні локації підвищеного вмісту рухомого фосфору спостерігаються також і на об'єкті № 2 (Рис. 6). Це майданчики, які розташовані на контурах підвищено зволоженого (21, 23, 24) та еродованого (2, 5, 8, 12) різновидів чорнозему типового. На майданчиках 1 та 4, які також розташовані на контурі чорнозему типового еродованого, відзначено найнижчі параметри вмісту рухомого фосфору.

Поряд з цим, на обох об'єктах є локації, де визначення за обома методами показують різні тенденції вмісту в ґрунті орного шару рухомого фосфору, наприклад майданчики 2 і 11 на об'єкті №1 та 13 і 16 на об'єкті №2. На нашу думку, це свідчить про штучний характер такої неоднорідності, зумовлений не реальними чинниками, а системною помилкою методу аналізування ґрунту. При цьому помітно, що найвищі значення вмісту рухомого фосфору за Чириковим на майданчиках 13 та 16 на об'єкті №2 (246 та 261 мг/кг відповідно) було визначено за найбільш високих значень рН (6,5 та 6,2 відповідно), які виникли восени 2020 р.

Згідно з висновками С. Penn & J. Camberato [15], саме в цьому інтервалі рН спостерігається найменша фіксація фосфору кальцієм та алюмінієм. Оскільки у попередні цикли досліджень у 2018-2020 рр. такого ефекту не спостерігалось, то вищевказані осередки могли утворитися тільки через нерівномірне внесення добрив восени 2020 р. Як було доведено В. Зубковською [16], за внесення органічних та мінеральних добрив та підвищеного зволоження на кислих за природою ґрунтах відбувається значне посилення міграційної здатності фосфатів, що також збігається з нашими даними. Таким чином, має місце випадкове тимчасове підвищення вмісту рухомого фосфору, а не осередок його концентрації у ґрунтового покриві.

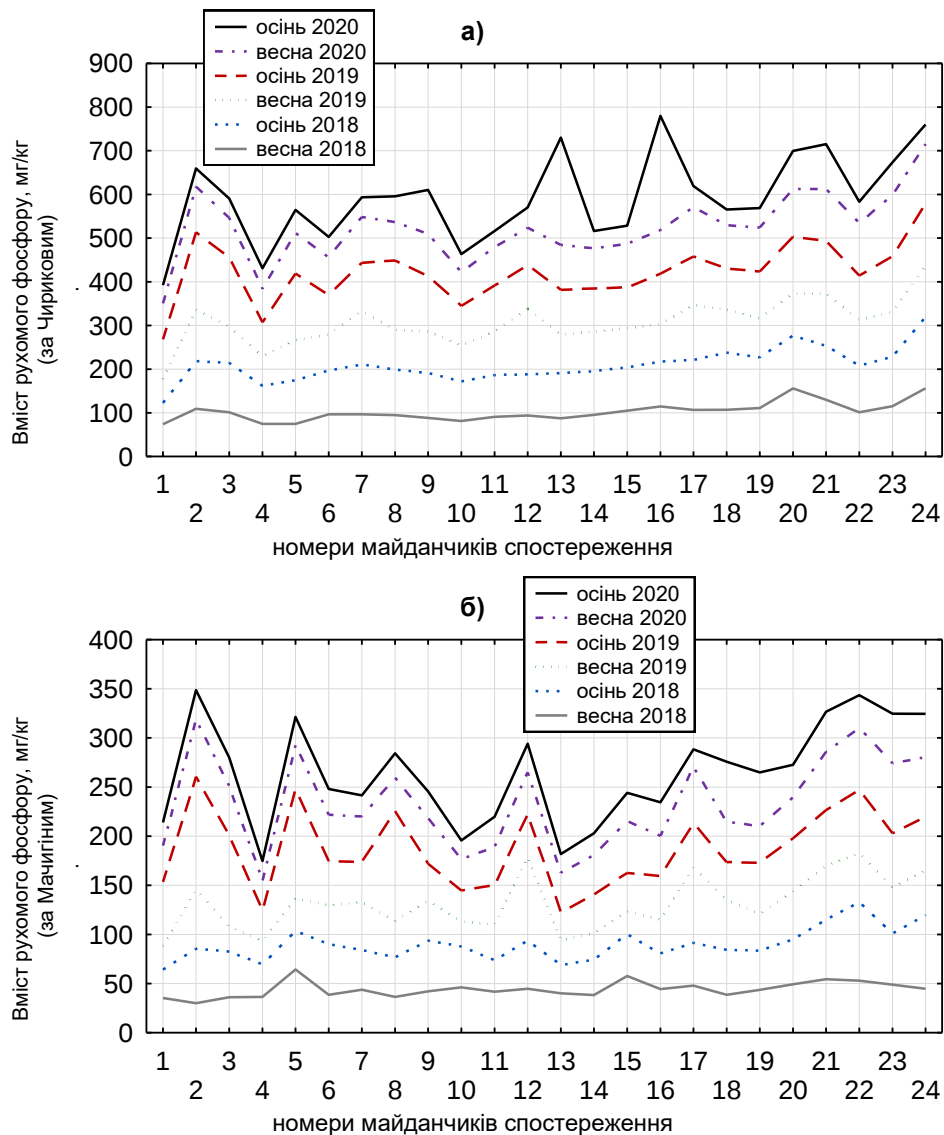


Рис. 6. Вміст рухомого фосфору у ґрунті пробних майданчиків на об'єкті №2 за методами Чирикова (а) та Мачигіна (б)

4. Висновки

1. Часова мінливість вмісту рухомого фосфору в чорноземних та темно-сірих опідзолених ґрунтах, оцінена за усередненими значеннями в шарі 0–30 см на початку та наприкінці вегетаційного періоду в межах сільськогосподарського поля, не показує істотної сезонної динаміки.

2. Просторова неоднорідність вмісту рухомого фосфору в чорноземних та темно-сірих опідзолених ґрунтах має сталу складову, яка проявляється у тенденції до більш високого або низького вмісту в окремих локаціях незалежно від аналітичного методу визначення та сезону відбирання проб. Поряд з цим, на окремих локаціях спостерігаються тимчасові відмінності вмісту рухомого фосфору, спричинені, очевидно, нерівномірним внесенням добрив, зрушенням рН або іншими причинами випадкового характеру.

Подяки. Автор висловлює вдячність науковому керівнику д-ру біол. наук М.М. Мірошниченку та канд. с.-г. наук А.О. Христенку за теоретичні консультації, а також інженерам відділу агрохімії ННЦ «ІГА імені О. Н. Соколовського» Л. М. Бурлаковій і Ю.Л. Разуменко за допомогу в проведенні аналітичних робіт.

Список використаних джерел

1. Медведев В.В. Неоднородность почв и точное земледелие. Часть 1. Введение в проблему. Харьков, изд-во «13 типография», 2007. 296 с.
2. Афанасьев Р.А. Агрохимическое обеспечение точного земледелия. *Проблемы агрохимии и экологии*. 2008. 3. С. 46–53.
3. Iho A., Laukkanen M. Precision phosphorus management and agricultural phosphorus loading. *Ecological Economics*. 2012. 77. P. 91–102. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2012.02.010>
4. Неоднородность почв и точное земледелие. Часть 2. Результаты исследований. / под ред. В.В. Медведева. Харьков: Городская типография, 2009. 260 с.
5. Wilson H.F., Satchithanatham S., Moulin A.P., Glenn A.J. Soil phosphorus spatial variability due to landform, tillage, and input management: A case study of small watersheds in southwestern Manitoba. *Geoderma*. 280. P. 14–21 <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.06.009>
6. Spatio-temporal variations of soil properties in a plot scale: a case study of soil phosphorus forms and related enzymes / A. Piotrowska-Długosz, J. Lemanowicz, J. Długosz [et al.]. *Journal of Soils and Sediments*. 2016. 16. P. 62–76. <https://doi.org/10.1007/s11368-015-1180-9>.
7. Пивоварова Е.Г. Решение вопросов пространственной и временной вариации агрохимических свойств почв с помощью информационно-логического анализа. *Агрохимия*. 2006. 8. С. 77–84.
8. Мельник А.І., Матухно Ю.Д., Проценко О.І. Мінливість агрохімічних показників темно-сірого опідзоленого легкосуглинкового ґрунту упродовж теплого періоду року. *Вісник Житомирського національного агрокологічного університету*. 2011. 1. С. 76–83.
9. Temporal variability of available phosphorus, potassium and magnesium in arable soil / K. Štípek, V. Vaněk, J. Száková [et al.]. *Plant and Soil Environment*. 2004. 50(12):547–551.
10. Адерихин П.Г., Шубина Д.И. Пространственное варьирование свойств почв и продуктивность сельскохозяйственных растений внутри элементарного почвенного ареала. Структура почвенного покрова и ее значение для картирования почв, учета использования почвенных ресурсов. Кишинев: Штиинца, 1980. С. 36–38.
11. Dong W., Wu T., Sun Y., Luo J. Digital Mapping of Soil Available Phosphorus Supported by AI Technology for Precision Agriculture, *7th International Conference on Agro-geoinformatics (Agro-geoinformatics)*. 2018. P. 1–5, <https://doi.org/10.1109/Agro-Geoinformatics.2018.8476007>.
12. Heggermann T., Wagner P., Rodionov A. Predicting plant available phosphorus using infrared spectroscopy with consideration for future mobile sensing applications in precision farming / S. Pätzold, M. Leenen, M. Frizen [et al.]. *Precision Agriculture*. 2020. 21. P. 737–761. <https://doi.org/10.1007/s11119-019-09693-3>
13. Христенко А.А. Теоретические и практические аспекты оценки состояния и динамики азотных, фосфатных и калийных систем почв. Харьков: ФЛП Бровин А.В., 2019. 180 с.
14. Тихоненко Д.Г., Гавва Д.В. Сезонна динаміка карбонатів кальцію у чорноземах типових під різними фітоценозами південно-східного Лісостепу України. *Вісник Харківського національного аграрного університету імені В.В. Докучаєва*. Серія: Ґрунтознавство, агрохімія, землеробство, лісове господарство, екологія ґрунтів. 2012. 4. С. 5–10. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vkhnau_grunt_2012_4_3
15. Penn C.J., Camberato J.J. A critical review on soil chemical processes that control how soil affects phosphorus availability to plants. *Agriculture*. 2019. 9(6), 120. <https://doi.org/10.3390/agriculture9060120>
16. Зубковська В.В. Вплив зволоження на поведінку фосфору у ясно-сірому поверхнево оглеєному лісовому ґрунті. *Вісник аграрної науки*. 2013. 8. С. 70–72.

UDC 631.445.4; 631.416.2

Spatial and temporal variability of available phosphorus content in the arable soil layer according to different methods**Stanislav Kovalenko****National Scientific Center Institute for Soil Science and Agrochemistry Research named after O.N. Sokolovsky",
Kharkiv, Ukraine**E-mail: stanislawkowalenko@gmail.com

The purpose of the article is to highlight the results of assessing the stability in time and space of the content of mobile phosphorus compounds in the soil within the arable layer on the land plots. The studies were carried out during 2018-2020 on two fields of the experimental farm "Grakovskoe" NSC "ISSAR named after O.N. Sokolovsky" in the Kharkiv region. The soil cover of one of the fields is made up of Chernozem podzolized (Chernic Phaeozem) in combination with Dark gray podzolized soil (Luvic Greyzemic Phaeozem), and the second field is Chernozem typical (Haplic Chernozem) with eroded and highly moistened varieties. Each field was divided into 24 plots, from which mixed soil samples were taken from 7 individual samples from a layer of 0–30 cm twice a season – in April–May and in October–November. On the soils of the podzolized row, a high amplitude of fluctuations in the pH values of salt was found during 3-year observations – from 4.4 to 5.2. As a result, the parameters of soil saturation with mobile phosphorus, determined by the methods of Chirikov and Machigin, were significantly different. In a field with chernozem, the typical measurement results for both methods were similar. The results of the analysis of the content of mobile phosphorus in the soils of the field according to the average values of the aggregate of individual samples did not show significant seasonal differences. However, on each of the fields, there were separate locations with higher values both according to the Chirikov method and the Machigin method, regardless of the sampling season. Along with this, in both fields there are locations where two methods of determination show different trends in the spatial distribution of the content of mobile phosphorus, which indicates the artificial nature of such heterogeneity. This confirms the hypothesis about the presence of a stable and temporarily artificial component of the spatial heterogeneity of the phosphate state of soils.

Keywords: methods; spatial variability; phosphorus is mobile; black soil;

Citing: Kovalenko S.S. (2021). Spatial and temporal variability of available phosphorus content in the arable soil layer according to different methods. *AgroChemistry and Soil Science*. 92, 71-79. [doi:10.31073/acss92-08](https://doi.org/10.31073/acss92-08) [in Ukrainian].

УДК 631.4:52-83

До питання про роль рельєфу у формуванні просторової неоднорідності ґрунтових параметрів¹

К. М. Куцова

Національний науковий центр «Інститут ґрунтознавства та агрохімії імені О.Н. Соколовського»,
Харків, Україна

ІНФОРМАЦІЯ	АНОТАЦІЯ
Отримано 29.10.2021 Отримано після доопрацювання 30.11.2021 Затверджено до видання 10.12.2021 Доступно онлайн 20.12.2021	Висвітлено результати дослідження ролі рельєфу у формуванні просторової неоднорідності вмісту в ґрунті гумусу, рухомих сполук фосфору і калію, загального вмісту азоту і pH_{H_2O} у межах орного шару. Дослідження проведено на двох полях у Харківській області у зоні Лівобережного Лісостепу України. Ґрунтовий покрив одного з полів представлено сірим лісовим (Haplic Luvisol) та темно-сірим опідзоленим (Luvic Greyzem Phaeozem) ґрунтами, другого — чорноземом опідзоленим (Chernic Phaeozem) (в тому числі намитим) і темно-сірим опідзоленим (Luvic Greyzem Phaeozem) слабкосероморфним ґрунтом у комплексі з еродованими аналогами. За гранулометричним складом всі ґрунти важкосуглинкові. Віднайдено зв'язки між основними показниками родючості ґрунтів та характеристиками рельєфу обстежених земельних ділянок, створено картографічні матеріали просторового розподілу елементів живлення за використання статистичних методів обробки даних. Підтверджено існування просторової неоднорідності властивостей ґрунтів (за $C_v > 25\%$) та визначено фактори, які впливають на особливості їх просторового розподілу. З'ясовано, що існування неоднорідних форм рельєфу і, зокрема, наявність мікропонижень на обстежених ділянках, зумовлює нерівномірний розподіл опадів, чим істотно впливає на формування неоднорідності якості ґрунту в межах поля щодо вмісту поживних елементів (азот, фосфор і калій) та реакції ґрунтового середовища (pH). Результати свідчать, що найкраще забезпечено гумусом та рухомими сполуками фосфору ґрунт на найвищих точках рельєфу та у мікропониженнях і мікрозападинах. Зони збагачення рухомих калієм та азотом збігаються з пониженнями у рельєфі. Причиною розподілу елементів живлення є міграції потоків речовин, інтенсивність яких залежить від топографічних особливостей території. Виявлено, що підвищені ділянки поля характеризуються близькими до нейтральних значеннями pH_{H_2O} . На ділянках із різким ухилом поверхні виявлено відносно підкислення ґрунту. На основі здобутих результатів рекомендовано враховувати особливості просторового розподілу властивостей ґрунту у практиці внесення добрив та хімічних меліорантів.

E-mail: karinamatveeva48@gmail.com

Форма цитування: Куцова К.М. До питання про роль рельєфу у формуванні просторової неоднорідності ґрунтових параметрів. Агрохімія і ґрунтознавство. Міжвід. тем. наук. збірник. 2021. Вип. 92. Харків: ННЦ "ІГА ім. О.Н. Соколовського". С. 80-91.
<https://doi.org/10.31073/acss92-09>

1. Вступ

Ґрунти утворюються в результаті різноспрямованих фізичних, хімічних і біологічних процесів та є комплексною функцією гірської породи, організмів, клімату, рельєфу та часу, які зумовлюють просторову гетерогенність властивостей ґрунтів [1–3]. Численні дослідження свідчать про те, що ухил, висота і мікрорельєф, відіграють важливу роль у визначенні просторових варіацій властивостей ґрунту в різних масштабах [4–6]. Проте, просторова неоднорідність показників родючості ґрунтів і складний взаємозв'язок між ґрунтовими процесами та топографічними факторами у різних типах ландшафту залишаються недостатньо вивченими [7, 8]. Не є винятком і Харківський регіон, де орні угіддя розміщені як на увігнутих, так і опуклих формах рельєфу, ґрунти яких суттєво відрізняються за агрохімічними та продуктивними показниками, у зв'язку з чим вимагають додаткового вивчення.

На наш погляд, дослідження та аналізування просторової неоднорідності показників родючості орних ґрунтів сприятиме напрацюванню теоретичних і практичних підходів до створення моделі високоефективного агровиробництва. Інформація про реальну просторову неоднорідність властивостей ґрунту у межах поля дозволить захистити ґрунт від дефіциту елементів живлення та запобігти негативним проявам деградації, а також заощадити ресурси та, в кінцевому рахунку, сприятиме вирощуванню стабільних врожаїв конкурентоздатної сільськогосподарської продукції.

¹ Роботу виконано під керівництвом доктора с.-г. наук, с.н.с. І.В. Пліско.

2. Аналіз останніх досліджень і публікацій

Загальновідомо, що неоднорідність ґрунтового покриву має складну ієрархічну структуру — від локального до континентального рівня [9]. Складність ґрунтового покриву зумовлюється не лише типологічною розмаїтістю ґрунтів, а також їх сполученнями та розмірами ґрунтових ареалів.

Запаси поживних речовин у ґрунтах та їх доступність сільськогосподарським культурам, а також запаси продуктивної вологи в ґрунтовому середовищі, знаходяться у тісному взаємозв'язку і з природно-кліматичними умовами агроландшафтів. До таких чинників відносять особливості рельєфу, гідрогеологічних умов, ґрунтоутворних порід, клімату, але не виключають при цьому вплив зональних систем землеробства [10]. Сукупний вплив перелічених факторів визначає величину і якість урожаю сільськогосподарських культур.

Основною ознакою ґрунтового покриву вважається безперервність (континуальність), що полягає в поступовій зміні властивостей ґрунту у просторі, синхронізованій зі змінами ролі ґрунтоутворювальних факторів, а дискретність (просторова) є переважно штучною привнесеною категорією [11].

У роботах професора В.В. Медведєва [1, 12] ґрунт описується як продукт динамічного процесу, а залежність властивостей ґрунту від впливу чинників ґрунтоутворення має вірогіднісно-статистичний характер. Про що свідчить вплив комплексу ґрунтоутворювачів на формування діапазону параметрів властивостей ґрунтів. У межах земельної ділянки неоднорідність орних ґрунтів більшою мірою підпорядковується впливу мезо- і мікрорельєфу, у зв'язку зі змінами у зволоженні, різній глибині залягання підґрунтових вод, особливостями розподілу фітоценозів, мікроклімату та ін., що підтверджується результатами наукових досліджень [11, 12]. Збіг градієнтів рельєфу та трендів розміщення елементів живлення в межах окремого поля дозволяє виявити вплив горизонтальних потоків вологи на переміщення поживних речовин із внесених добрив, і формування своєрідного антропогенного горизонтального хімічного профілю орних ґрунтів.

Найбільш чутливим до зовнішніх умов, визнано шар ґрунту 0–30 см, адже більша частина змін властивостей ґрунту і умов для розвитку рослин в результаті використання довгострокових систем землеробства, типів землекористування та змін умов навколишнього середовища відбувається на цій глибині [13]. Саме у цьому просторі спостерігаються найбільш високі коефіцієнти варіації властивостей ґрунту [14].

На формування неоднорідності ґрунтового покриву впливають відмінності положення ґрунтів у рельєфі, що характеризується коливаннями висот. Мезорельєф і мікрорельєф відіграють особливу роль у перерозподілі тепла, вологи, поживних речовин у ґрунті, а також у просторовому поширенні основних типів ґрунтів.

У працях академіка В.В. Медведєва [15] неодноразово підтверджено вплив рельєфу на ґрунтоутворювальний процес, що підсилює просторову неоднорідність якості ґрунтів. Це може спостерігатись у вигляді процесів ерозії або акумуляції, оглеєння або опідзолення ґрунтів, а також інших процесів міграції речовин у ґрунтовому покриві. Саме завдяки різним швидкостям руху вологи і поживних речовин, залежно від вектора, виникають різноспрямовані рухи тонкодисперсної маси [16].

Українські дослідники визнають [17], що характеристика рельєфу є обов'язковою у дослідженні ґрунтів, вбачаючи, що саме ухил поверхні та експозиція схилу є важливими показниками, які опосередковано визначають родючість ґрунтів та впливають на врожайність сільськогосподарських культур на досліджуваній земельній ділянці (полі).

Ґрунти на увігнутих і опуклих формах рельєфу показують різну якість, порівняно з лінійним мікрорельєфом, в основному, через потік води. Просторова варіабельність топографічних особливостей, таких як рельєф, ухил поверхні та крутість схилу чинить наявність схилів різної форми, окрім регулювання транспортування води і поживних речовин, також визначає гідрологічний режим ґрунту та тип рослинності [18].

Наукові пошуки дослідників ННЦ «Інституту ґрунтознавства та агрохімії імені О.Н. Соколовського» [19] дозволяють отримати додаткове підтвердження ролі висот у просторовому розподілі параметрів властивостей ґрунту, зокрема, вмісту гумусу. Найвищий вміст було зафіксовано на верхніх частинах схилу, де має місце несуттєва інтенсивність стоку. У зв'язку з чим, особливої уваги необхідно приділяти експозиції та крутості схилу — факторам, що напряду пов'язані з просторовим розподілом поживних речовин.

Польовими дослідженнями у Бразилії [20] доведено, що відмінності у просторовій варіабельності (неоднорідності) агрохімічних показників ґрунту в різних типах ландшафту,

пов'язані з варіаціями форм рельєфу, за наявності, навіть, незначних перепадів висот. Ці результати стверджують, що бічні і поверхневі потоки води в увігнутих і опуклих формах визначають специфічні середовища, які мають вплив на генетичні особливості та властивості ґрунтів та сприяють розвитку значної просторової неоднорідності властивостей ґрунту.

З іншого боку, наявність різних типів ґрунтів у межах одного поля, що пов'язано з фізико-географічним середовищем та історією розвитку ґрунтового покриву, призводить до формування різних ґрунтових властивостей: водного режиму, вмісту поживних речовин та ін. [21].

Дотримуючись теорії, за якої рельєф є чинником утворення більш розвиненого ґрунту у пониженнях території порівняно зі схилами, П.В. Голеусов та В.К. Тохтарь [22] доводять, що це відбувається внаслідок додаткового надходження вологи, продуктів ґрунтоутворення та інших факторів. Мезорельєф суттєво впливає на розподіл кліматичних елементів (температура, опади) в межах невеликих територій та сприяє формуванню специфічних мікрокліматичних умов.

Продуктивність ґрунтів полів із мікрозападами помітно зменшується, а на найбільш підвищених ділянках поля, в більшості випадків, спостерігається нижча урожайність сільськогосподарських культур доводять — Стародубцев із співавторами [23, 24]. Разом з тим дослідники підкреслюють, що роль мікрозападин проявляється не тільки у формуванні складного ґрунтового покриву. За фільтрації поверхневих вод вглиб по ґрунтових горизонтах в мікрозападах інфільтруються хімікати, забрудники, радіонукліди, а також просочується частина дрібнодисперсної твердої фази ґрунту, завдяки чому мікрозападини не замулюються століттями.

За результатами досліджень ґрунтового покриву, відображеними у роботі І.А. Сахабієва зі співавт. [25], встановлено, що зони зі значним перепадом висот (від 80 до 140 м) відзначаються просторовою варіабельністю властивостей ґрунту — від 24 до 58 %; у слаборозчленованих зонах, з плоским рельєфом, неоднорідність є суттєво нижчою і становить від 13 до 30 %. Завдяки чому, відстежується прямий вплив форми рельєфу на просторовий розподіл елементів живлення у ґрунтах.

Разом з тим, ґрунти схилів, крім просторового розподілу елементів живлення та вологи, що надходить в основному з атмосферних опадів, характеризуються проявом ерозійних процесів, особливо на опуклих формах схилів, викликаючи при цьому суттєве зниження родючості еродованих орних ґрунтів.

Дослідження В.І. Мельника та ін. [26] свідчать, що на неоднорідних за формою рельєфу ділянках відрізняються умови для розвитку рослин, зокрема, у верхній частині схилу ґрунти, здебільшого, є змитими та малородючими, але зі сприятливими кліматичними умовами. Нижня частина схилів характеризується намитими та більш родючими ґрунтами, проте може спостерігатись менш сприятливий мікроклімат для стабільного росту та розвитку сільськогосподарських культур.

Дослідженнями білоруських вчених теж доведено [27], що варіювання різних показників при окультуренні земель відбувається складним чином. За деякими параметрами можна досягти зменшення варіювання за рахунок гомогенізації ділянки, наприклад, ємність катіонного обміну, рідше, кислотність ґрунту, вміст гумусу. Інші параметри, наприклад, вміст азоту, фосфору і калію, в основному, залежать від рівня окультуреності ґрунтів, зокрема, внесення мінеральних добрив, що дозволяє регулювати кількість поживних речовин у ґрунтах та сприяє вирівнюванню їх родючості.

Отже, різні форми рельєфу відображають мікрокліматичні відмінності кожної території, у зв'язку з надходженням і віддачею радіаційного тепла, змін температури ґрунту, стоку і підйому повітряних мас, а також інших перелічених раніше чинників, які впливають на формування особливих властивостей ґрунтового покриву.

Більшість дослідників [10, 27] вважають, що закономірності змін неоднорідності показників родючості ґрунтів при окультуренні мають регіональний характер, у зв'язку з чим їх слід виявляти для кожної територіальної одиниці окремо. Адже, рельєф часто обумовлює поєднання абіотичних факторів та перерозподіляє тепло, вологу, світло, які є зональними особливостями території, тобто, залежать від широти місцевості.

Мета статті — висвітлити результати польових досліджень з виявлення просторового розподілу властивостей ґрунту у межах поля зі складним мікро- та мезорельєфом та аналізу особливостей впливу різних елементів рельєфу на неоднорідність ґрунтової родючості.

3. Об'єкти та методи досліджень

Дослідження просторової неоднорідності параметрів основних агрохімічних характеристик орного ґрунту проведено на двох об'єктах у Харківській області в зоні Лівобережного Лісостепу України.

Дослідний об'єкт № 1 — земельна ділянка на території ДП ДГ «Граківське» в с. Новий Коротич Харківського району площею 31,7 га. Ґрунтовий покрив представлено чорноземом опідзоленим (Chernic Phaeozem) (в тому числі намитим), темно-сірим опідзоленим (Luvic Greyzemic Phaeozem) слабксероморфним ґрунтом у комплексі з його еродованими аналогами. Гранулометричний склад ґрунтів у межах поля — важкосуглинковий. Схему відбирання проб ґрунту зображено на рис. 1 А, відстань між точками — 100 м. Вирощувана культура – кукурудза на зерно. Проби ґрунту відібрано у червні 2020 р.



Рис.1. Схema точок відбирання проб ґрунту на дослідних об'єктах (на базі Google-map)

Земельна ділянка має ухил поверхні 1,5-2,5 градусів, спостерігаються значні зміни висот на поверхні ділянки – від 120 до 145 м за даними топографічних карт [28] (Рис. 2 А).

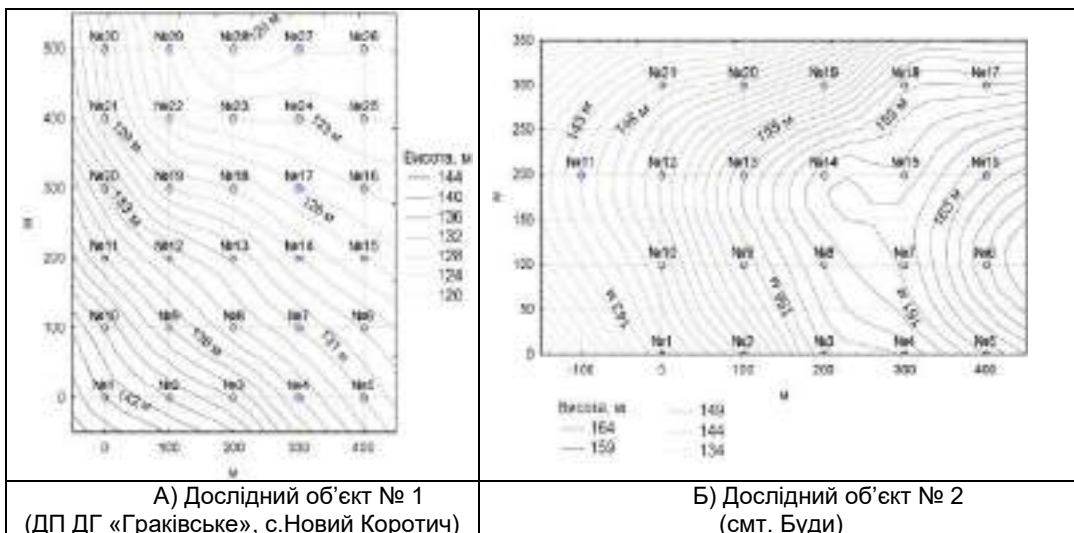


Рис. 2. Картохема рельєфу дослідних об'єктів

Дослідний об'єкт № 2 — земельна ділянка площею 20 га — частина поля, яке знаходиться біля смт. Буди Харківського району. Схему точок відбирання проб ґрунту зображено на рис. 1 Б, відстань між точками — 100 м. Ґрунтовий покрив ділянки представлено сірим лісовим (Haplic Luvisol) та темно-сірим опідзоленим (Luvic Greyzemic Phaeozem) ґрунтами важкосуглинкового гранулометричного складу на лесових породах та їх слабо- і

середньозмитими аналогами, які розташовані на схилах різної крутості. Проби ґрунту відібрано у липні 2020 р. Вирощувана культура — озима пшениця.

Рельєф об'єкту № 2 представлений хвилястою рівниною зі значними амплітудами висот, чергуванням підвищень та знижень поверхні, що зумовлює локальний перерозподіл тепла та вологи. Ухил поверхні змінюється від 2 до 6 градусів, перепад висот варіює від 135 до 173 м (Рис. 2 Б). Обстежена земельна ділянка характеризується низькою стійкістю до дефляції через відсутність вільної вологи та низьку грудкуватість верхнього шару ґрунту.

Загалом, обидва дослідні об'єкти характеризуються як ерозійно небезпечні території (ухил поверхні 1-5 %) з проявами ерозійних процесів, що дало змогу простежити вплив різних елементів рельєфу на неоднорідність ґрунтових параметрів. Обстежені ґрунти на обох об'єктах відносяться до автоморфного типу, що визначає перевагу рельєфу та низхідних потоків атмосферних опадів у перерозподілі елементів живлення разом із пониженням території.

Варто відмітити, що традиційними методами відбирання ґрунтових проб для аналізу вмісту поживних елементів, як в Україні, так і за кордоном [29], передбачено отримання усереднених значень показника для всього поля, що й слугує основною для розрахунку однакової дози внесення добрив на все поле. З появою можливості диференційованого внесення добрив виникла необхідність відбирати більшу кількість проб для виявлення просторової неоднорідності агрохімічних показників родючості ґрунту в межах поля. Ми використали запропонований академіком В.В. Медведєвим [12], для визначення неоднорідності властивостей орних ґрунтів, метод пробовідбирання за регулярною сіткою з географічною прив'язкою точок.

На дослідних об'єктах точкові проби ґрунту відібрано буром із шару 0–30 см за вимогами, описаними в ДСТУ 4287:2004². Для визначення основних агрохімічних показників ґрунту застосовано такі аналітичні методи: загальний вміст гумусу — методом Тюріна в модифікації ЦІНАО за ДСТУ 4289:2004³; вміст рухомих сполук фосфору і калію — за модифікованим методом Чирикова за ДСТУ 4115:2002⁴; вмісту нітратного й амонійного азоту — за ДСТУ 4729:2007 в модифікації ННЦ ІГА ім. О.Н. Соколовського⁵; рНвод. — за ДСТУ 8346:2015⁶.

Для характеристики наявності в ґрунті поживних елементів використано шкалу рівня забезпеченості (високий, середній, низький) за національними критеріями⁷.

Картосхеми рельєфу дослідних об'єктів побудовано на основі даних топографічної карти [28]. Для оцінювання ступеня загальної варіативності та для візуалізації просторової неоднорідності досліджених показників ґрунту використано методи дисперсійного аналізу та картографічний метод обробки даних. Картосхеми (2Д діаграми) просторового розподілу досліджуваних параметрів (Рис. 3-7) побудовано у програмі Statistica.

4. Результати досліджень

У ході досліджень виявлено просторову неоднорідність основних агрохімічних показників ґрунтів та оцінено вплив елементів рельєфу на їх розподіл в межах дослідних об'єктів. У табл.1 наведено максимальні, мінімальні значення досліджених показників та значення їх коефіцієнтів варіації (Cv).

Існування неоднорідності (за $C_v > 25\%$) на об'єкті № 1 підтверджено для вмісту рухомого фосфору, на об'єкті № 2 — для вмісту гумусу та рухомого фосфору. Інші показники наближаються до цього значення Cv, але не перевищують його.

² ДСТУ 4287:2004 Якість ґрунту. Відбирання проб [Чинний від 2005-07-01]. К.: Держспоживстандарт України, 2005. 9 с.

³ ДСТУ 4289:2004 Якість ґрунту. Методи визначення органічної речовини [Чинний від 2005-07-01]. К.: Держстандарт України, 2005. 18 с.

⁴ ДСТУ 4115:2002 ґрунти. Визначення рухомих сполук фосфору і калію за модифікованим методом Чирикова [Чинний від 01.01.2003] К.: Державний комітет України з питань технічного регулювання та споживчої політики, 2002. 6 с.

⁵ ДСТУ 4729:2007 Якість ґрунту. Визначення нітратного і амонійного азоту в модифікації ННЦ ІГА ім.О.Н. Соколовського [Чинний від 2008-01-01]. К.: Держспоживстандарт України, 2008. 9 с.

⁶ ДСТУ 8346:2015 Якість ґрунту. Методи визначення питомої електропровідності, рН і щільного залишку водної витяжки. [Чинний від 2017-07-01]. Київ: УкрНДНЦ, 2017. 10 с.

⁷ Методика проведення агрохімічної паспортизації земель сільськогосподарського призначення: керівний нормативний документ / за ред. І.П. Яцука, С.А. Балюка. Вид. 2-е допов. Київ, 2019. 108 с.

Таблиця 1

Результати дослідження основних ґрунтово-агрохімічних показників орних ґрунтів на дослідних об'єктах

Показник, одиниця вимірювання	Максимальне значення	Мінімальне значення	Коефіцієнт варіації (Cv), %
<i>Дослідний об'єкт № 1</i>			
Вміст гумусу, %	3,78	2,46	9
Загальний вміст азоту, мг на кг/ґрунту	11,16	5,39	17
Вміст рухомого фосфору, мг на кг/ ґрунту	238,9	33,2	74
Вміст рухомого калію, мг на кг/ґрунту	114,60	69,29	18
pH водної витяжки	7,06	5,80	4
<i>Дослідний об'єкт № 2</i>			
Вміст гумусу, %	3,1	0,84	34
Загальний вміст азоту, мг на кг/ґрунту	14,54	7,26	20
Вміст рухомого фосфору, мг на кг/ ґрунту	26,34	1,43	64
Вміст рухомого калію, мг на кг/ґрунту	141,59	54,23	23
pH водної витяжки	6,1	5,72	2

Розглянемо детальніше просторовий розподіл неоднорідності за дослідженими показниками.

Вміст гумусу. Аналіз даних з вмісту гумусу в точкових пробах показав, що за цим показником ґрунти дослідного об'єкту № 1 визначаються як ґрунти із середнім та підвищеним його вмістом (Рис. 3А). Наявний підвищений вміст гумусу зумовлюється присутністю на ділянці чорнозему опідзоленого та його намитих аналогів.

З'ясовано, що просторовий розподіл вмісту гумусу на досліджуваних ділянках є неоднорідним залежно від ухилу поверхні, у зв'язку з чим складаються різні пропорції між його акумуляцією та розкладанням. Найкраще забезпеченими гумусом виявились ґрунти, які розташовані на найвищих точках рельєфу та у місцях із мікропониженнями і мікрозападинами.

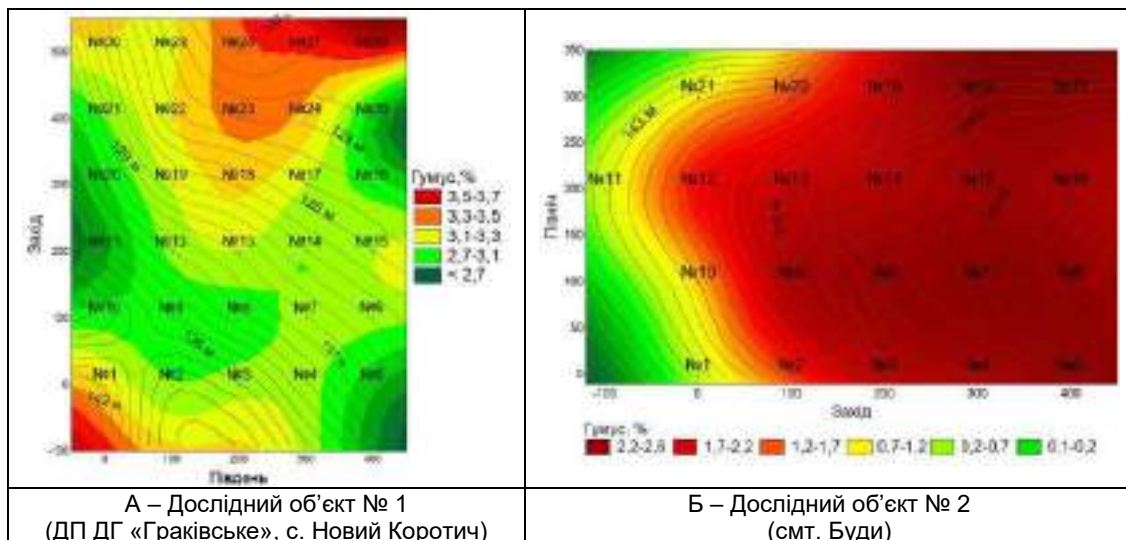


Рис.3. 2Д діаграма вмісту гумусу на дослідних об'єктах

Встановлено, що за вмістом гумусу найбільш забезпеченими є ґрунти чорноземного типу. Виявилося, що на деяких ділянках із темно-сірими ґрунтами спостерігається зниження вмісту гумусу в орному шарі, що може бути пов'язано зі змиванням гумусу вниз по профілю через його генетичну особливість — диференціацію за елювіально-ілювіальним типом, а також через наявність еродованих різновидів ґрунту

завдяки присутності «негативних» елементів рельєфу у вигляді понижень та схилів зі значним ухилом — до 6 градусів.

Більша частина ґрунтів дослідного об'єкту № 2 (сmt. Буди) характеризується низьким рівнем забезпеченості гумусом в орному шарі. Лише 20-25 % від загальної площі об'єкту мають середній та підвищений вміст гумусу (Рис. 3 Б). На відміну від дослідного об'єкту № 1, значні ухили поверхні дослідного об'єкту № 2 апіорі обумовлюють зниження потужності і гумусованості ґрунтів. В цьому випадку більшу роль у просторовому розподілі гумусу відіграє саме рельєф території. Найбільшим вмістом гумусу відзначаються ділянки, розташовані на найвищих точках рельєфу, що свідчить про стійкість ґрунтів до змиву горизонтальними водними потоками разом зі зменшенням крутості схилу.

Зміни вмісту гумусу мають залежність також від розподілу вмісту рухомого фосфору, що вже також було підтверджено дослідженнями вчених [29]. В цілому, ґрунти еродованих схилів характеризуються зниженим вмістом гумусу порівняно з повнопрофільними ґрунтами.

Загальний вміст азоту. Можна передбачити, що низький загальний вміст азоту також відображає залежність як від форми рельєфу на дослідному об'єкті № 2, так і від вмісту гумусу. Адже нітратна форма азоту більше піддається вимиванню атмосферними опадами вниз по профілю або за його межами, у зв'язку з чим більша загальна кількість азоту може спостерігатись у мікропониженнях (Рис. 4). До того ж з підсиленням прояву еродованості ґрунтів, з одного боку, істотно знижуються запаси азоту, а з іншого — збільшуються його втрати внаслідок водної чи вітрової ерозії та процесів денітрифікації, що призводить до необхідності застосування підвищених доз азотних добрив.

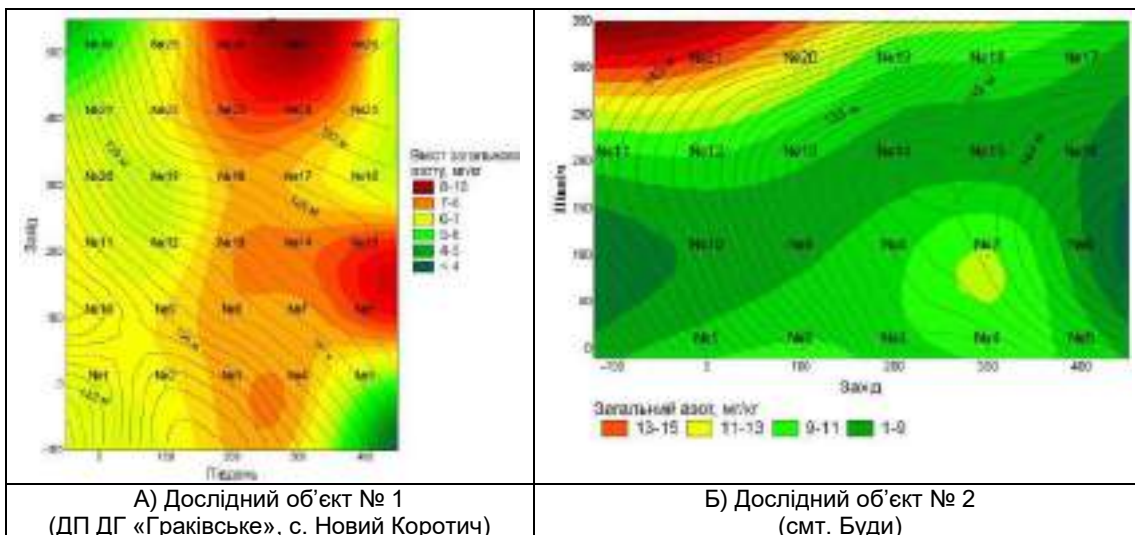


Рис. 4. 2Д діаграма загального вмісту азоту на дослідних об'єктах

Виявлено, що найбільший вміст азоту в межах дослідного об'єкту № 1 мають чорнозем опідзолені намитий та ґрунти у підвищено зволожених місцях (Рис. 4А). Звичайно, загальний вміст азоту залежить від рівня природної родючості ґрунту на кожній земельній ділянці, а також інших вагомих чинників — рівня окультуреності ґрунтів, системи удобрення, попередника, здатності поглинати рослинами елементи живлення, характеру протікання мікробіологічних процесів та ін. На дослідному об'єкті № 2 прослідковується менший вплив елементів рельєфу на просторовий розподіл загального вмісту азоту (Рис. 4Б).

В цілому, ґрунти дослідних об'єктів характеризуються дуже низьким та низьким загальним вмістом азоту, що є обґрунтованою підставою для здійснення своєчасного підживлення сільськогосподарських рослин азотними добривами.

Вміст рухомого фосфору. Просторовий розподіл вмісту рухомого фосфору в межах дослідних об'єктів характеризується дуже високим коефіцієнтом варіації (74 % для дослідного об'єкту № 1 та 64 % для дослідного об'єкту № 2) (Рис. 5).

ґрунти дослідного об'єкту № 1 характеризуються більш високим рівнем забезпеченості: більшість обстеженої площі поля характеризується середнім та високим вмістом цього елементу (Рис. 5 А).

На відміну від чорноземних ґрунтів дослідного об'єкту № 1 з високими природними властивостями та великою активною поверхнею, сірі лісові та темно-сірі опідзолені ґрунти

об'єкту № 2 характеризуються дуже низьким та низьким вмістом рухомого фосфору (Рис. 5 Б). Останнє може бути викликано здійсненням суцільного удобрення всієї площі, без урахування якості ґрунту, або внаслідок низької розчинності елементу живлення.

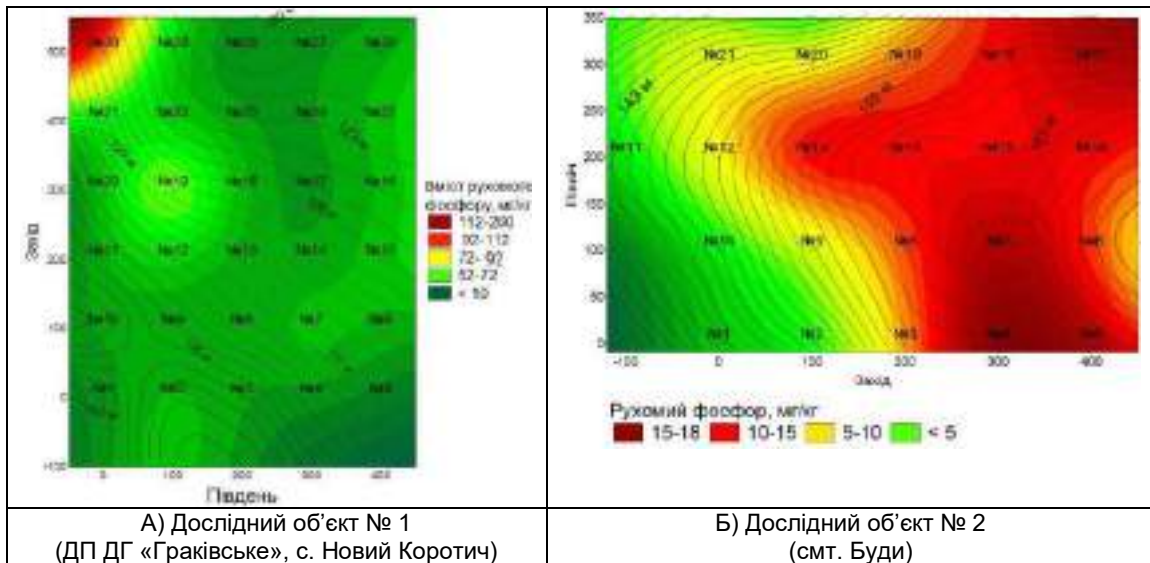


Рис.5. 2Д діаграма вмісту рухомого фосфору на дослідних об'єктах

Також на вміст рухомого фосфору значно впливає обсяг внесення мінеральних добрив, чим, певним чином, зумовлено посилення доступності фосфору рослинам [30]. Доступність і можливість екстрагування рухомого фосфору значною мірою визначається природою та зв'язком з органо-мінеральними компонентами ґрунту. Загалом, на вміст цього елементу в ґрунтах впливає низка факторів, серед яких: вміст фосфору у материнській породі (переважно у вигляді малодоступних рослинам апатитоподібних сполук), здатність вирощуваної культури поглинати фосфор із добрив, види та норми внесених добрив та їх агрегатний стан, кількість органічної речовини. На просторовий розподіл вмісту рухомого фосфору впливають також неоднорідні форми рельєфу. В ході досліджень на найвищих елементах рельєфу зафіксовано найбільші значення вмісту рухомого фосфору (Рис. 5 Б).

Вміст рухомого калію. Забезпеченість досліджених орних ґрунтів рухомих калієм є дещо кращою порівняно з їх забезпеченістю рухомих фосфором, змінюючись від середнього до високого рівнів (Рис. 6). Існуючий рівень забезпеченості рухомих калієм визначається важким гранулометричним складом ґрунтів та відображає урівноважений баланс між вмістом калію і ступенем його рухомості.

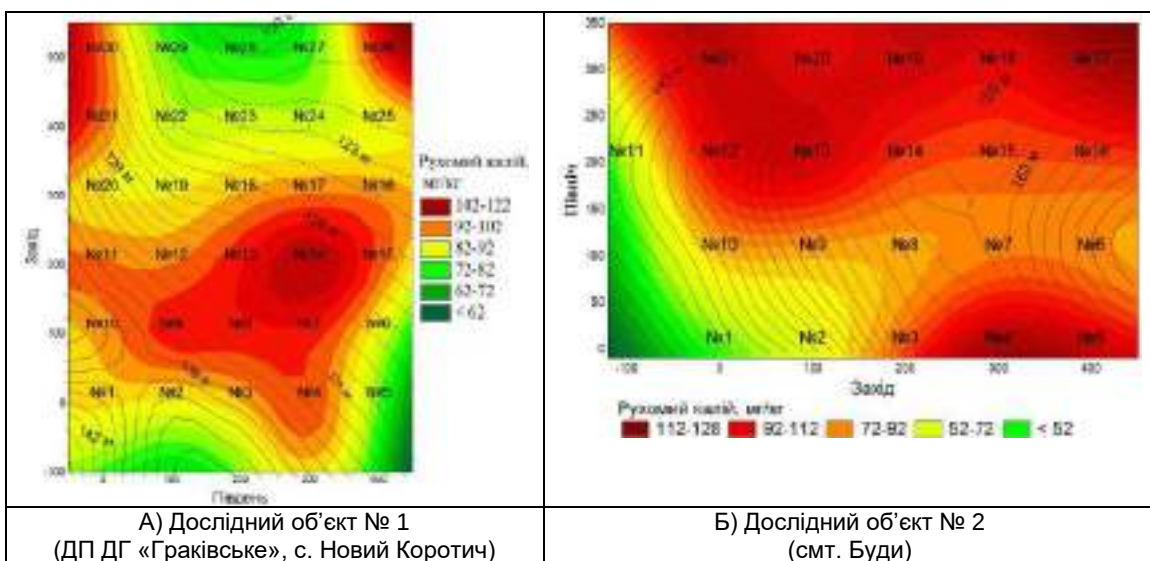


Рис.6. 2Д діаграма вмісту рухомого калію на дослідних об'єктах

Просторовий розподіл вмісту рухомого калію в межах дослідних об'єктів має тенденцію збільшення разом із пониженням форм рельєфу.

В цілому, за наявності різних елементів рельєфу можна прослідкувати тенденції просторового розподілу елементів живлення. Саме перепад висот, ухил поверхні та експозиція схилу визначено важливими показниками, які опосередковано впливають на просторовий розподіл елементів живлення.

В цілому, для дослідного об'єкту № 1 зони збагачення елементами живлення збігаються з пониженнями у рельєфі, зони збіднення — з підвищеннями. Вміст рухомого калію та загальний вміст азоту у ґрунті дослідного об'єкту № 2 підтверджують вищезазначені висновки, окрім просторового розподілу гумусу та рухомого фосфору. В даному випадку суттєву роль також відіграє стійкість ґрунту до вимивання елементів живлення, здатність поглинати елементи живлення рослинами та розроблені системи удобрення. Однозначно, на просторову неоднорідність досліджених показників родючості ґрунтів впливає ряд факторів, серед яких, більшою мірою, це — вплив господарської діяльності, кліматичних та топографічних особливостей території і просторового розподілу різновидів ґрунту.

Показник рН водний. Як відомо, кислотно-основні властивості ґрунту залежать від хімічного і мінералогічного складу, характеру і кількості органічної речовини, складу газової фази ґрунту, вологості, біологічної активності. Саме показник pH_{H_2O} є важливою властивістю ґрунту, що впливає на характер більшості фізичних, хімічних і біологічних процесів.

В ході досліджень виявлено значну просторову неоднорідність за показником $pH_{водн.}$, яка опосередковано свідчить про різноспрямований вплив природних чинників, насамперед, елементів рельєфу (Рис. 7). В межах дослідного об'єкту № 1 виявлено слабокислі, близькі до нейтральних, нейтральні та слаболужні ґрунти, дослідного об'єкту № 2 – середньокислі, слабокислі та близькі до нейтральних ґрунти. Роль рельєфу вельми чітко простежується за зіставлення карти топографії місцевості і картограм розподілу значень pH_{H_2O} . Варіабельність параметрів також пов'язана з просторовою неоднорідністю вмісту гумусу в досліджених ґрунтах.

Доведено, що на підвищених ділянках цей показник наближається до нейтральних значень, на понижених — ближче до підкислення. Швидше за все, це може бути пов'язано з особливостями міграції кальцію з підвищених частин поля у понижені або бути наслідком більш помітних втрат кальцію з вертикальними потоками на підвищених частинах поля. Таким чином, вплив рельєфу та господарської діяльності, мабуть, є першопричиною виявленої неоднорідності ґрунтового покриття за цим показником.

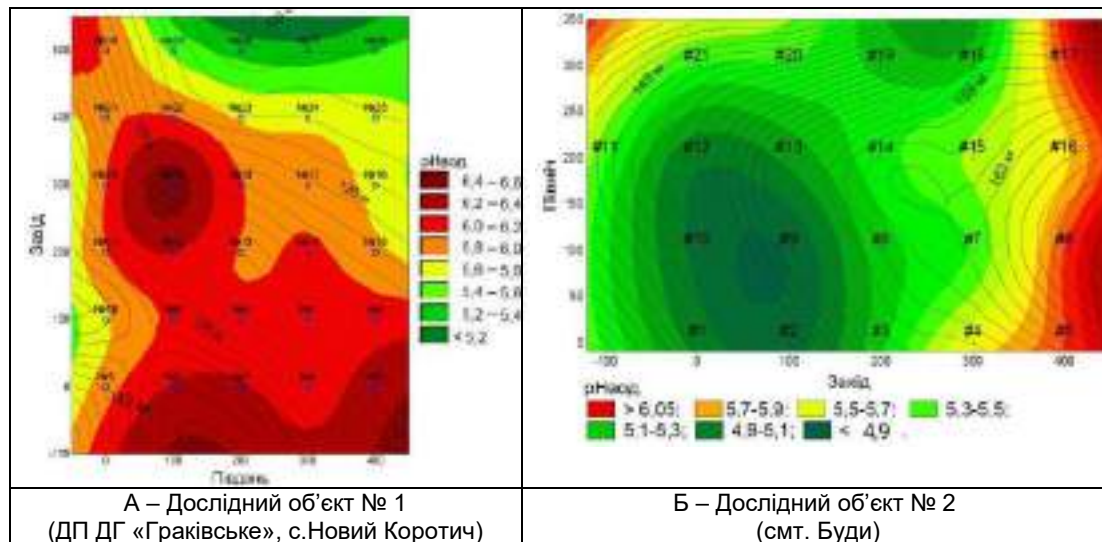


Рис. 7. 2Д діаграма значень pH_{H_2O} на дослідних об'єктах

Загалом, основна площа орних ґрунтів характеризується нейтральним та близьким до нейтрального рівнем реакції ґрунтового розчину, що забезпечує оптимальні умови для біологічної активності, азотфіксації та розкладання органічних залишків.

Виявлено, що варіювання досліджених агрохімічних показників ґрунту у просторі, помітно визначається виразністю рельєфу місцевості. Дослідження дозволили установити ґрунти з низьким рівнем забезпеченості елементами живлення. Таким чином, оптимізація

живлення рослин і підвищення родючості ґрунтів можуть бути досягнені шляхом застосування різних видів та доз добрив з урахуванням неоднорідності параметрів основних показників.

5. Висновки

Результати досліджень свідчать про те, що ґрунтовий покрив двох обстежених ділянок є неоднорідним через наявність «негативних» елементів рельєфу у вигляді понижень та схилів значної крутості.

Перерозподіл атмосферної вологи на поверхні досліджених об'єктів з таким рельєфом призводить до концентрації вологи у мікропониженнях, її фільтрації вглиб ґрунтового профілю, у зв'язку з чим спостерігається вимивання деяких елементів живлення і продуктів ґрунтоутворення. В результаті, формується дуже складний ґрунтовий покрив, представлений не тільки чорноземами типовими, але й темно-сірими опідзоленими ґрунтами та їх змитими аналогами.

З'ясовано, що існування неоднорідних форм рельєфу і наявність мікропонижень на обстежених ділянках, що, очевидно, викликало нерівномірний розподіл вологи опадів, істотно вплинуло на формування неоднорідності властивостей ґрунтів у межах одного поля (земельної ділянки).

Найбільшим умістом гумусу відзначається ґрунт на тих фрагментах поля, що розташовані на найвищих точках рельєфу, що свідчить про стійкість органічної частини ґрунтів до змиву горизонтальними водними потоками. Збільшення вмісту гумусу також притаманне ділянкам із мікропониженнями і мікрозападинами.

Просторовий розподіл загального вмісту азоту залежить від ухилу поверхні та експозиції схилу. Азот накопичується у пониженнях рельєфу, отже піддається вимиванню вологою атмосферних опадів.

На просторовий розподіл вмісту рухомого фосфору впливає неоднорідність форм рельєфу, наявність схилів різної експозиції та перепадів висот, але не виключається вплив генетичних особливостей ґрунтів з високими природними властивостями та великою активною поверхнею. Найбільші значення вмісту рухомого фосфору наявні на найвищих елементах рельєфу та схилах північно-західної експозиції.

На розподіл вмісту рухомого калію значно вплинули неоднаковість форм рельєфу та крутість ухилів поверхні. Через змивання ґрунту атмосферними водами вниз по схилу спостерігається збільшення вмісту рухомого калію у ґрунті на понижених формах рельєфу.

Виявлено, що показник pH_{H_2O} також залежить від рельєфу території. На підвищених ділянках дослідних об'єктів значення pH_{H_2O} наближаються до нейтральних, на понижених — до підкислення.

Результати вказують на доцільність впровадження диференційованого внесення добрив та хімічних меліорантів залежно від просторового розподілу властивостей ґрунту. Отримані результати дослідження сприятимуть підвищенню ефективності використання мінеральних добрив, що сприятиме нівелюванню агрохімічної строкатості полів і підвищенню урожаїв сільськогосподарських культур.

Список використаних джерел

1. Медведев В.В. Неоднорідність ґрунтів як фундаментальна проблема (частина 1). *Агрохімія і ґрунтознавство*. Міжвід. тем. наук. збірник. 2009. Вип. 72. Харків: ННЦ "ІГА ім. О.Н. Соколовського". С. 7–16.
2. Imhoff S., Pires da Silva A., Tormena C.A. Spatial heterogeneity of soil properties in areas under elephant-grass short-duration grazing system. *Plant and Soil*. 2000. 219(1-2), P. 161–168. <https://doi.org/10.1023/A:1004770911906>.
3. Spatial heterogeneity of soil nitrogen in a subtropical forest in China / L. Wang, P.P. Mou, J. Huang [et al.]. *Plant and Soil*. 2007. 295(1-2). P. 137–150. <https://doi.org/10.1007/s11104-007-9271-z>.
4. Association between lowland grassland plant communities and soil properties / C.N.R. Critchley, B.J. Chambers, J.A. Fowbert [et al.]. *Biological Conservation*. 2002. 105(2), P. 199–215. [https://doi.org/10.1016/S0006-3207\(01\)00183-5](https://doi.org/10.1016/S0006-3207(01)00183-5).
5. Spatial variability of nutrient properties in black soil of northeast China / X.Y. Zhang, Y.Y. Sui, X.D. Zhang [et al.]. *Pedosphere*. 2007. 17(1). P. 19–29. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(07\)60003-4](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(07)60003-4).
6. Taten R., Takeda H. Forest structure and tree species distribution in relation to topography-mediated heterogeneity of soil nitrogen and light at the forest floor. *Ecological Research*. 2003. 18(5). P. 559–571. <https://doi.org/10.1046/j.1440-1703.2003.00578.x>.
7. Soil nutrients influence spatial distributions of tropical trees species / R.J. Chandran, J.W. Dalling, K.E. Harms, J.B. Yavitt. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 2007. 104(3). P. 864–869. <https://doi.org/10.1073/pnas.0604666104>.
8. Spatial heterogeneity of soil chemical properties in a lowland tropical moist forest / J. B. Yavitt, K. E. Harms, M. N. Garcia [et al.]. *Australian Journal of Soil Research*. 2009. 47(7), P. 674–687. <https://doi.org/10.1071/SR08258>.

9. Захарченко А.В., Алексеев В.И., Ипатова Д.В. Иерархическая концепция неоднородности почв и планирование масштаба исследования. Известия Томского политехнического университета. *Инжиниринг георесурсов*. 2016. Т. 327, № 4. С. 149-163.
10. Безніцька Н.В. Формування показників родючості і продуктивності меліорованих ґрунтів в умовах регіональних змін клімату (на прикладі Херсонської області). дис. ...канд. с.-г. наук : 06.01.02. *ДВНЗ «Херсонський державний аграрний університет»*, 2017. 230 с.
11. Medvedev V.V. Continuity and dyscretivity of soils for fields: applied consequences for agriculture. *Fundamental and Applied Soil Science*. 2015. 16 (1–2). P. 11–25. <https://doi.org/10.15421/041502>.
12. Медведев В.В. Неоднородность почв и точное земледелие. Часть 1. Введение в проблему. Харьков: Изд. «13 типография», 2007. 296 с.
13. Mishra U., Riley W.J. Alaskan soil carbon stocks: spatial variability and dependence on environmental factors. *Biogeosciences*. 2012. No. 9, P. 3637-3645. <https://doi.org/10.5194/bg-9-3637-2012>.
14. Yihenew G.S., Getachew A. Effects of different land use systems on selected physico-chemical properties of soils in Northwestern Ethiopia. *Journal of Agricultural Scienc*, 2013. Vol. 5, No. 4. P. 114-117. <https://doi.org/10.5539/jas.v5n4p112>.
15. Медведев В.В. Неоднородность как закономерное проявление горизонтальной структуры почвенного покрова. *Ґрунтознавство*. 2010. Т. 11, № 1-2. С. 6-15.
16. Medvedev V.V. Time and spatial heterogenization of soil ploughed up. *Ґрунтознавство*. 2013. 14(1-2). P. 5-22.
17. Медведев В.В., Плиско И.В. Бонитировка и качественная оценка пахотных земель Украины. Харьков: Изд. «13 типография», 2006. 386 с.
18. Use of Topographic Models for Mapping Soil Properties and Processes / X. Li, G.W. McCarty, L. Du, S. Lee. *Soil Systems*. 2020. 4. P. 32. <https://doi.org/10.3390/soilsystems4020032>.
19. Белопіський В.О., Лактіонова Т.М., Полулях М.М. Оцінка ймовірності просторової мінливості вмісту гумусу у картуванні ґрунтів на басейновій основі. *Агрохімія і ґрунтознавство*. Харків: ННЦ «ІГА ім. О.Н. Соколовського». 2017. Вип. 86. С. 24-34. <https://doi.org/10.31073/acss86-03>.
20. Small relief shape variations influence spatial variability of soil chemical attributes / Z.M. Souza, Júnior J. Marques, G.T. Pereira, D.M. Barbieri. *Scientia agricola*. 2006. Vol. 63, no.2. P. 161-168. URL: <https://doi.org/10.1590/S0103-90162006000200008>.
21. Modern approach in farming based on estimation of soil properties variability / O.L. Tonkha, S.O. Sychevskiy, O.V. Pikovskaya, V.P. Kovalenko. *12th International Conference on Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment*. 2018. P. 68-74. <https://doi.org/10.32851/2226-0099.2020.115.17>.
22. Голєусов П.В., Тохтарь В.К. Взаимосвязь формирования почвенного и растительного покровов на участках с антропогенно нарушенной поверхностью. *Промышленная ботаника*. 2011. Вып. 11. С. 14–18.
23. Просторова неоднорідність продуктивності типових чорноземів на полях з мікрозападами / В.М. Стародубцев, І.С. Власенко, Р.М. Басараб Д.С. Комарчук. *Наукові доповіді НУБіП України*. 2018. 3(73). 8 с.
24. Milestones of the soil cover heterogeneity investigation in the Right-Bank Forest-Steppe of Ukraine / V.M. Starodubtsev, R.M. Basarab., Yu.A. Rosamakhia I.S. Vlasenko. *Journal «Almanahul SWorld»*. Moldova, Issue 1, January 2019. P. 56-64. <https://doi.org/10.30888/2410-6615.2019-01-01>.
25. Characterization of the spatial heterogeneity of the agrochemical properties of arable chernozem soils in areas with a heterogeneous relief in the aspect of variable rate application / I.A. Sahabiev, E.V. Smirnova, K.G. Giniyatullin, L.Yu. Ryzhikh. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2021. 659. 012071. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/659/1/012071>.
26. Мельник В.И., Чигрина С.А. Микроклимат каждого из полей, как фактор влияния на темпы проведения работ и потребность в технике. *Констрування, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*, 2009. Вип. 39. С. 319-325. URL: <http://dspace.kntu.kr.ua/jspui/handle/123456789/3049>.
27. Пространственная неоднородность почвенного покрова и агрохимических показателей почв Солигорского района / Н.В. Клебанович, А.Л. Киндеев, А.А. Сазонов [и др.]. *Земля Беларуси*. 2019. № 1. С. 39-48.
28. Топографічні карти. Харківська область. Масштаб 1: 10000 см [Електронний ресурс] URL: <https://ru-topographic-map.com/maps/v8t3/>
29. Syers J.K., Johnston A.E., Curtin D. Efficiency of soil and fertilizer phosphorus use: reconciling changing concepts of soil phosphorus behaviour with agronomic information. *Experimental Agriculture*. 45(01). Rome, 2009. 108 p. <https://doi.org/10.1017/S0014479708007138>

UDC 631.4:52-83

To the issue of the role of relief in the formation of spatial heterogeneity of soil parameters

K.M. Kutsova

National Scientific Center "Institute for Soil Science and Agrochemistry Research named after O.N. Sokolovsky",
 Kharkiv, Ukraine
 E-mail: karinamatveeva48@gmail.com

The results of the study of the role of relief in the formation of the spatial heterogeneity of humus content, available compounds of phosphorus and potassium, the total content of nitrogen and pH_{H₂O} within the arable layer are highlighted. The study was carried out on two fields in the Kharkiv region in the zone of the Left-Bank Forest-Steppe of Ukraine. The soil cover of one of the fields is represented by gray forest (Haplic Luvisol) and dark gray podzolized (Luvic Greyzem Phaeozem) soils, the second – by podzolized chernozem (Chernic Phaeozem) (including reclaimed) and dark gray podzolized (Luvic Gremizem) with eroded counterparts. According to the granulometric composition, all soils are heavy loamy. Relationships were found between the main indicators of soil fertility and the characteristics of the relief of the surveyed land plots, cartographic materials were created for the spatial distribution of nutrients using statistical methods of data processing. The existence of spatial heterogeneity of soil properties (Cv > 25 %) was

confirmed and factors influencing the features of their spatial distribution were determined. It was found that the existence of heterogeneous landforms and, in particular, the presence of microdepressions in the surveyed areas, causes an uneven distribution of precipitation, which significantly affects the formation of heterogeneity of soil quality within the field – the content of nutrients (nitrogen, phosphorus and potassium) and soil pH. The results show that the soil at high relief points and in micro-depressions is better provided with humus and available phosphorus compounds. The zones of available potassium and nitrogen enrichment coincide with depressions in the relief. The reason for the distribution of nutrients is the migration of flows of substances, the intensity of which depends on the topographic features of the territory. It was found that the soil at higher parts of the field is characterized by pH_{H2O} values close to neutral. Relative acidification of the soil was found in areas with a sharp slope of the surface. Based on the results, recommended to take into account the peculiarities of the spatial distribution of soil properties in the practice of applying fertilizers and chemical ameliorants.

Keywords: soil properties; spatial heterogeneity; microrelief; nutrients; microdepressions; surface slope; coefficient of variation.

Citing: Kutsova K.M. (2021). To the issue of the role of relief in the formation of spatial heterogeneity of soil parameters. *AgroChemistry and Soil Science*. 92, 80-91. [doi:10.31073/acss92-09](https://doi.org/10.31073/acss92-09) [in Ukrainian].

УДК 631.95:631.438

Накопичення ^{137}Cs у суміші лучних трав на торфово-болотних ґрунтах зони Полісся у Рівненській області

Н. В. Дмитрієвцева, Л. М. Шепелюк, С. М. Пилипака

Рівненська філія державної установи «Інститут охорони ґрунтів України»,
с. Шубків, Рівненська область, Україна

ІНФОРМАЦІЯ	АНОТАЦІЯ
Отримано 01.06.2021 Отримано після доопрацювання 03.12.2021 Затверджено до видання 10.12.2021 Доступно онлайн 20.12.2021	Висвітлено результати дослідження комплексної дії різних видів мінеральних добрив на продуктивність агроценозу і накопичення радіонуклідів фітомасою багаторічних трав на торфово-болотному ґрунті (<i>Histic Gleysols</i>). Дослідження проведено впродовж 2011-2013 рр. у тимчасовому польовому досліді з сіяними багаторічними травами (грястиця збірна, стоколос безостий і тимофійка лучна), використовуваними на годівлю худоби. Метою досліджень є виявлення особливостей впливу радіологічного навантаження на якість сільськогосподарської продукції на удобрених і неудобрених ділянках шляхом вимірювання питомої активності радіоактивного ^{137}Cs у сухій фітомасі зібраних трав, щільності забруднення ґрунту та розрахунку коефіцієнтів переходу радіонуклідів із ґрунту в пасовищний корм. Активність ^{137}Cs в рослинах визначали методом гама-спектрометрії. Внесення підвищених доз калійних добрив (K_{120}) та фосфорних разом з калійними ($\text{P}_{60}\text{K}_{120}$) виявилось ефективним заходом, який знижує активність радіоцезію в сухій масі корму. За три роки досліджень на варіанті з калійними добривами зафіксовано зниження активності ^{137}Cs в кормі в середньому в 2,9 раза, а на ділянці сукупного внесення калійних і фосфорних добрив – у 2,7 раза порівняно з контрольним варіантом досліді (без добрив).
Ключові слова: активність ^{137}Cs ; багаторічні трави; ґрунт; коефіцієнт переходу; мінеральні добрива; радіонуклід; урожай * E-mail: nataliyaDNU@i.ua	

Форма цитування: Дмитрієвцева Н.В., Шепелюк Л.М., Пилипака С.М. Накопичення ^{137}Cs у суміші лучних трав на торфово-болотних ґрунтах зони Полісся у Рівненській області. *Агрохімія і ґрунтознавство*. Міжвід. тем. наук. збірник. 2021. Вип. 92. Харків: ННЦ «ІГА ім. О.Н. Соколовського». 2021. С. 92-97. <https://doi.org/10.31073/acss92-10>

1. Вступ

У зоні Полісся Рівненської області виробництво сільськогосподарської продукції здійснюється здебільшого в умовах радіоактивного забруднення місцевості. Основною ланкою екологічного ланцюга міграції радіонуклідів є ґрунт, дією на який можна суттєво знизити їх надходження в рослинну продукцію. Інтенсивність міграції ^{137}Cs з ґрунту в рослину залежить від доступності цього радіонукліда кореневій системі рослини. Доступність може суттєво змінюватись залежно від розподілу радіонукліда по профілю ґрунту [1, 2].

Горизонтальна міграція радіонуклідів не призведе до відчутного перерозподілу їх у ландшафтах, а за рахунок вертикальної міграції поверхневий шар ґрунтів очищається повільно [3]. З літературних джерел відомо, що триває процес самодезактивації поверхневого шару ґрунтів, але швидкість його незначна. Змивання ^{137}Cs , вміст водорозчинної форми якого у ґрунтах не перевищує кількох відсотків, становить 0,1 % від загальної кількості за рік [4–7]. Швидкість цього процесу більша на природних ландшафтах з непорушеною структурою ґрунтів. Природний період напівочищення кореневого шару ґрунту співмірний з періодом напіврозпаду ^{137}Cs або перевищує його, тому не слід сподіватися на швидку зміну коефіцієнтів переходу (пропорційності) [8–10].

Торфово-болотні ґрунти є найбільш проблемними для виробництва кормів, оскільки на одиницю азоту припадає у 5–10 разів менше фосфору та у 30–40 разів — калію, ніж на мінеральних ґрунтах [11]. За вирощування сільськогосподарських культур на торфово-болотних ґрунтах велику роль також відіграють водний режим, потужність торфового шару і ступінь його розкладу [12,13].

Метою статті є викладення результатів досліджень з виявлення відмінностей щодо переходу ^{137}Cs з торфово-болотного ґрунту у фітомасу кормових багаторічних трав на ділянках з фосфорним і калійним удобренням порівняно з неудобреними.

2. Об'єкти і методи досліджень

Об'єктом дослідження є процеси міграції ^{137}Cs з ґрунту у злаковий травостій за двохукісного режиму скошування на меліорованій земельній ділянці сінокісного угіддя за внесення різних видів мінеральних добрив.

Дослід закладено 2010 року на дослідному полі лабораторії агроекології та радіологічних досліджень Сарненської дослідної станції ІВПІМ НААН України у Сарненському районі Рівненської області на меліорованому торфово-болотному масиві “Чемерне” — це торфовище низинного типу з активним напірним живленням підґрунтовими водами. Ґрунт — типовий для зони Полісся України торфово-болотний (*Histic Gleysols*). Верхній шар ґрунту (0–20 см) характеризується такими параметрами агрохімічних властивостей: $pH_{\text{сольовий}}$ — 4,5–4,6; гідролітична кислотність — 75,4–84,4 мг-екв / 100 г ґрунту; вміст рухомих форм фосфору — 6–13 та калію 10–13 мг / 100 г ґрунту (за методом Кірсанова). Щільність забруднення ґрунту ^{137}Cs коливається у межах 25,9–37,0 кБк/м², що відповідає слабкому ступеню забруднення. Такі ґрунти, згідно з чинним законодавством, придатні для сільськогосподарського використання без обмежень.

Дослідження проводили в 2011–2013 рр. У польовому досліді вивчали вплив фосфорних і калійних мінеральних добрив на продуктивність багаторічних трав та активність радіонуклідів у фітомасі кормових культур (висушена суміш скошених трав).

Варіанти досліду: 1. Без добрив (контроль); 2. K_{120} ; 3. P_{90} ; 4. $K_{120} P_{90}$.

Вносили мінеральні добрива два рази за вегетаційний сезон за такою схемою по варіантах: після I укосу: 2. K_{60} ; 3. P_{45} ; 4. $K_{60} P_{45}$. Після II укосу: 2. K_{60} ; 3. P_{45} ; 4. $K_{60} P_{45}$.

Використовували такі форми добрив з умістом діючої речовини: P — суперфосфат гранульований — 17,5 % P_2O_5 ; K — калімагnezія — 26,6 % K_2O .

Суміш насіння багаторічних трав мала такий склад: грятися збірна (*Dactylis glomerata*), ранньостигла — 3,0 кг/га; стоколос безостий (*Bromopsis inermis* Leyss), середньостиглий — 10,0 кг/га; тимофіївка лучна (*Phleum pratense*), пізньостигла — 13,0 кг/га.

Облік урожаю зеленої маси в дослідях проводили укисним методом шляхом скошування травостою косаркою в період пасовищної стиглості (висота травостою 15–40 см) при висоті зрізу 5–6 см [14]. Вміст абсолютно сухої речовини в урожаї визначали ваговим методом: після скошування врожаю з кожного варіанта відбирали середню пробу, подрібнювали її та зважували, після чого висушували в бюксах у сушильній шафі при температурі 100–105°С до постійної маси. Одержані результати обробляли методом дисперсійного аналізу [15, 16].

Питому активність ^{137}Cs у повітряно-сухій масі трав (Бк/кг) визначали методом вимірювання на гама-спектрометрі СЕГ-01 в літрових посудинах Марінеллі з часом експозиції 1 година [17–20]. Щільність забруднення ґрунту також визначали вимірюванням на гама-спектрометрі СЕГ-01.

Коефіцієнти переходу ^{137}Cs у рослини розраховували як відношення питомої активності ^{137}Cs у рослинній продукції (Бк/кг) до щільності забруднення ґрунту (кБк/м²).

3. Результати досліджень та їх обговорення

За результатами проведених нами досліджень було виявлено позитивний вплив удобрення на радіоактивність травостою. За результатами двох укосів трав, порівняно з контрольним (неудобреним) варіантом, виявлено зниження радіоактивності ^{137}Cs на 54,8–156,7 Бк/кг (в 1,2–1,8 раза) на варіантах внесення (K_{120}), на 75,7–168,5 Бк/кг (в 1,3–1,7 раза) — на варіантах внесення ($P_{90} K_{120}$) і лише на 17,2–95,3 Бк/кг (в 1,1–1,2 раза) на варіантах внесення (P_{90}) (Табл. 1).

Отже, можна стверджувати, що серед досліджених прийомів найефективнішим для зниження активності радіоцезію в сухій масі корму, виявилось внесення підвищених доз калійних та разом фосфорних і калійних добрив. За три роки досліджень на варіанті з калійними добривами зафіксовано зниження вмісту ^{137}Cs в кормі в середньому на 118,7 Бк/кг або в 2,9 раза. Дещо меншим було зниження на варіанті з фосфорними разом з калійними добривами ($P_{90} K_{120}$) — на 129,3 Бк/кг, або в 2,7 раза порівняно з контрольним варіантом (без удобрення). З літератури відомо, що оптимальним співвідношенням між фосфором та калієм за удобрення багаторічних трав на торфово-болотних ґрунтах є 1:2 [21].

Результати трирічних вимірювань активності ^{137}Cs у повітряно-сухій масі трав після двох укосів по окремих польових повторностях варіантів досліду представлено в таблиці 2. Дані свідчать, що після першого укосу активність ^{137}Cs у масі трав з контрольних (неудобрених) ділянок коливалася в межах 276–354,3 Бк/кг; на варіанті K_{120} — 180,7–227,0 Бк/кг; на варіанті P_{90} — 156–348 Бк/кг; на варіанті внесення $P_{90} K_{120}$ — 115,3–197,7 Бк/кг. Це середні значення по трьох повторностях. Широкий діапазон розбіжностей між повторностями спричинено великим значенням похибки вимірювань приладу гама-спектрометру СЕГ-01, яка становить $\Delta=25\%$.

Таблиця 1

Зниження питомої активності ^{137}Cs у повітряно-сухій масі злакового травостою порівняно з неудобреним варіантом (2011-2013 рр.)

Варіант	Повтор-ність	Зниження активності ^{137}Cs у масі трав порівняно з неудобреним варіантом					
		I укіс		II укіс		Середнє зниження	
		Бк/кг	разів	Бк/кг	разів	Бк/кг	разів
2. K_{120}	I	86,3	1,4	227,0	2,3	156,7	1,9
	II	102,0	1,4	7,7	1,0	54,8	1,2
	III	146,0	2,0	143,3	1,5	144,7	1,8
	Середнє	—	—	—	—	118,7	1,6
3. P_{90}	I	87,0	1,0	103,7	1,4	95,3	1,2
	II	105,3	1,0	16,7	1,1	61,0	1,0
	III	19,3	1,1	15,0	1,0	17,2	1,1
	Середнє	—	—	—	—	57,8	1,1
4. $\text{P}_{90}\text{K}_{120}$	I	159,0	1,6	178,0	1,8	168,5	1,7
	II	216,7	1,8	71,3	1,3	144,0	1,5
	III	83,7	1,4	67,3	1,2	75,5	1,3
	Середнє	—	—	—	—	129,3	1,5

Безпечним вважається забруднення трав'яної суміші на рівні 600 Бк/кг, отже урожай трав на всіх варіантах дослідів є цілком придатним для використання у тваринництві.

Після другого укосу активність ^{137}Cs в повітряно-сухій масі травостою збільшилася на порядок і коливалася в межах 372,3–403 Бк/кг на варіантах без внесення добрив; 217–301,7 Бк/кг — на варіанті K_{120} ; 272,7–383,3 Бк/кг — на варіанті внесення P_{90} ; 195,7–335,7 Бк/кг — на варіанті внесення $\text{P}_{90}\text{K}_{120}$ (Табл. 2).

Таблиця 2

Активність ^{137}Cs в повітряно-сухій масі злакового травостою (2011–2013 рр.)

Повторність	Варіант	Активність ^{137}Cs у повітряно-сухій масі трав, Бк/кг							
		2011		2012		2013		середня	
		I укіс	II укіс	I укіс	II укіс	I укіс	II укіс	I укіс	II укіс
I	Контроль (без добрив)	281	372	308	430	254	396	281,0	399,3
	K_{120}	227	192	184	285	173	40,1	194,7	172,4
	P_{90}	219	273	120	318	243	296	194,0	295,7
	$\text{P}_{90}\text{K}_{120}$	113	142	125	337	128	185	122,0	221,3
II	Контроль (без добрив)	389	358	404	343	294	317	362,3	339,3
	K_{120}	237	290	299	295	245	410	260,3	331,7
	P_{90}	175	228	161	284	435	456	257,0	322,7
	$\text{P}_{90}\text{K}_{120}$	136	150	199	294	102	360	145,7	268,0
III	Контроль (без добрив)	393	388	205	356	280	496	292,7	413,3
	K_{120}	118	171	198	325	124	314	146,7	270,0
	P_{90}	264	317	189	480	367	398	273,3	398,3
	$\text{P}_{90}\text{K}_{120}$	242	295	269	281	116	462	209,0	346,0
середня по 3-х повтореннях	Контроль (без добрив)	354,3	372,7	305,7	376,3	276,0	403,0	312,0	384,0
	K_{120}	194,0	217,7	227,0	301,7	180,7	254,7	200,6	258,0
	P_{90}	219,3	272,7	156,7	360,7	348,7	383,3	241,4	238,9
	$\text{P}_{90}\text{K}_{120}$	163,7	195,7	197,7	304,0	115,3	335,7	158,9	278,4

Ефект від застосування лише фосфорних добрив був найслабшим; на цьому варіанті активність ^{137}Cs в повітряно-сухій масі скошених трав мало відрізнялася від контролю, а іноді була навіть вищою (у другому укосі 2012 і 2013 рр.).

Застосування калійних та фосфорно-калійних добрив визначено як ефективний та економічно виправданий захід для зниження надходження ^{137}Cs у рослинницьку продукцію, витрати на який, до того ж, окупаються збільшенням урожаю (Рис.1).

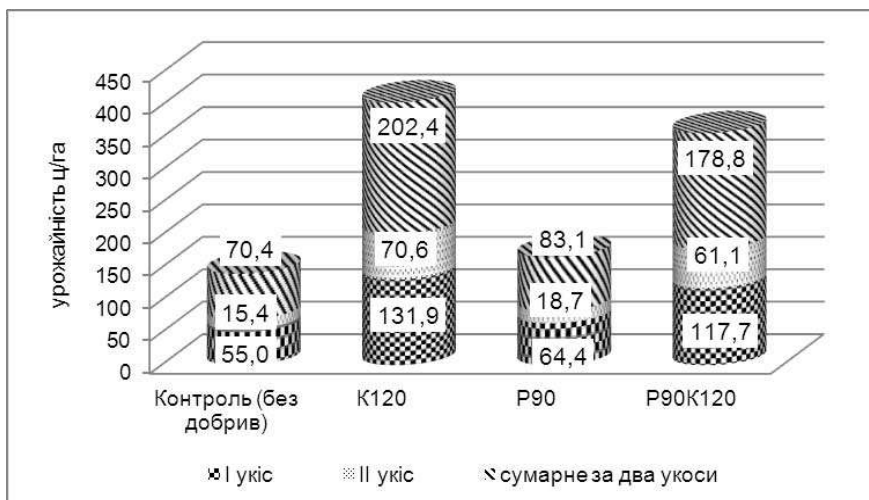


Рис. 1. Урожайність зеленої маси злакових трав (середня за 2011-2013 рр.)

Урожайність трав за результатами першого скошування на варіантах внесення калійних та фосфорних разом з калійними добрив була у 2,4 та 2,1 раза відповідно вищою ніж на варіанті без добрив, а після другого — в 1,2 і 3,9 раза.

Основний агрохімічний прийом, що обмежує надходження ^{137}Cs у травостій на торфово-болотних ґрунтах, – застосування підвищених доз калійних добрив. Це пов'язано з конкуренцією калію добрив та цезію в процесі поглинання іонів ґрунтового розчину коренями, а також із позитивним впливом калію на врожайність травостою, особливо на низько забезпечених рухомим калієм ґрунтах (<200 мг/кг ґрунту).

За даними наших досліджень, характеризуючи зміну коефіцієнта переходу радіонуклідів із ґрунту в пасовищний корм, можна зробити висновок, що протягом трьох років цей показник коливався в межах 6,13–14,83.

Трирічними дослідженнями на варіанті з калійними добривами (K₁₂₀) зафіксовано зниження коефіцієнтів переходу ^{137}Cs з ґрунту у злаковий травостій в середньому в 1,5 раза порівняно з коефіцієнтом на контрольному варіанті, а за внесення разом фосфорних і калійних добрив (P₆₀ K₁₂₀) коефіцієнт переходу був в 1,6 раза нижчим. Найвищим коефіцієнтом переходу характеризувався варіант внесення фосфорних добрив.

Порівнюючи дані з двох укосів визначили, що коефіцієнти переходу ^{137}Cs в корм сіяних багаторічних трав після скошування їх удруге за сезон зросли на всіх варіантах майже в 1,2–1,8 раза порівняно з першим укосом (Рис. 2).

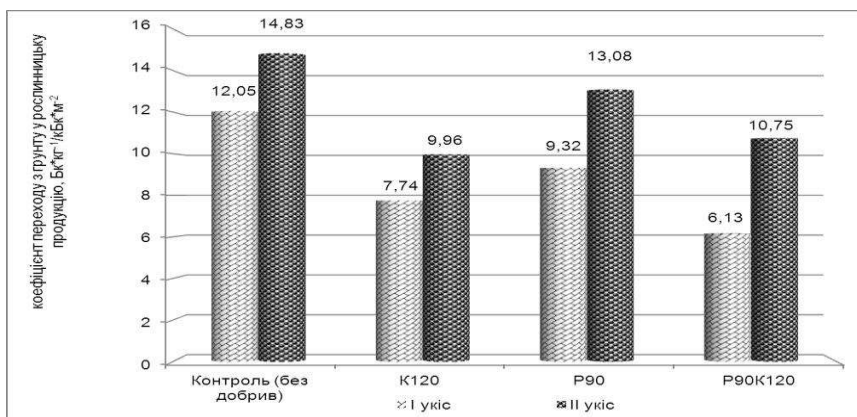


Рис. 2. Коефіцієнти переходу ^{137}Cs із ґрунту в фітомасу суміші трав за двох укосів

Це пов'язано з тим, що на початку вегетації нестача води в ґрунті обмежувала рухливість радіонуклідів і певною мірою блокувала їх надходження в надземну частину рослин.

Таким чином, оцінюючи радіопротекторну ефективність різних видів мінеральних добрив, виявили ефективність внесення разом фосфорних і калійних та окремо калійних добрив, що забезпечувало зниження активності ^{137}Cs в повітряно-сухій масі трав у 2,7 та 2,9 раза відповідно, порівняно з контрольним варіантом.

4. Висновки

1. За внесення під багаторічні трави калійних добрив зафіксовано зниження активності ^{137}Cs в трав'яній масі, використовуваній на корм, в середньому на 118,7 Бк/кг, а за внесення разом фосфорних і калійних добрив — на 129,3 Бк/кг порівняно з неудобреною контрольною ділянкою.

2. Коефіцієнт переходу ^{137}Cs з ґрунту у злаковий травостій на варіанті внесення калійних добрив (K_{120}) знизився у 1,5 раза, а за внесення фосфорних добрив разом з калійними ($P_{60} K_{120}$) — в 1,6 раза порівняно з контролем.

Список використаних джерел

1. Писаренко В.М., Писаренко П.В., Писаренко В.В. Агроєкологія. Полтава, 2008. 256 с.
2. Смаглій О.Ф., Кардашов Ф.Т., Литвак П.В. Агроєкологія: навч. посіб. Київ: Вища освіта, 2006. 671 с.
3. Перепелятников Г.П. Основы общей радиоэкологии. Київ: Атика, 2008. 460 с.
4. Ведення сільського господарства в умовах радіоактивного забруднення території України внаслідок аварії на Чорнобильській АЕС на період 1999-2002 рр. Методичні рекомендації. За ред. Б. С. Прістера. Київ: Ярмарок. 1998. 103 с.
5. Romanchuk L.D., Fedonyuk T.P., Fedonyuk R.G. Model of influence of landscape vegetation on mass transfer processes. *Biosystem Diversity*. 2017. 25(3). P. 203-209. <https://doi.org/10.15421/011731>
6. Чорнобильська катастрофа. Актуальні проблеми, напрямки та шляхи їх вирішення. Житомир: ЖНАЕУ, 2018. 412 с.
7. Health effects of the Chernobyl Accident Thirty Years Aftermath / D. Bazyka, V. Sushko, A. Chumak [et al.] Kyiv: DIA, 2016. 524 p. http://nrcrm.gov.ua/downloads/2017/monograph_last.pdf
8. Доповідь про стан ядерної та радіаційної безпеки в Україні у 2016 році. Київ: Державний комітет ядерного регулювання України, 2017. 82 с.
9. Дутов О.І. Агроєкологічні підходи до мінімізації доз опромінення населення у віддалений період розвитку радіологічної ситуації після аварії на ЧАЕС. *Екологічні науки*. Київ: ДАЕ, 2014. 1(5). С. 24-30. URL: <http://ecoj.dea.kiev.ua/archives/2015/6.pdt>.
10. Радіологічна оцінка деревної золи в населених пунктах півночі Житомирського Полісся / М.М. Лазарев, О.В. Косарчук, С.В. Поліщук, С.Є. Левчук. *Агроєкологічний журнал*. 2017. №4. С.29-36. <https://doi.org/10.33730/2077-4893.4.2017.219718>
11. Малоштан М.І., Поліщук С. В., Кашпаров В. О. Динаміка коефіцієнтів накопичення ^{137}Cs трав'янистими рослинами на торф'яно-болотних ґрунтах з аномальною високою біологічною доступністю. *Ядерна фізика та енергетика*. 2015. 16(3). С. 263-272. <https://doi.org/10.15407/jnpae2015.03.263>.
12. Кашпаров В.О., Поліщук С.В., Отрешко Л.М. Радіологічні проблеми ведення сільськогосподарського виробництва на забрудненій території України. *Чорнобильський науковий вісник. Бюлетень екологічного стану зони відчуження та зони безумовного (обов'язкового) відселення*. 2011. 2(38). С. 13-30.
13. Проблеми забруднених радіонуклідами сільськогосподарських територій на сучасному / М.М. Лазарев, С.Є. Левчук, О.В. Косарчук, А.О. Мажар. *Вісник ЖНАЕУ*. 2016. 1(55), Т. 3. С. 191-201. <http://znau.edu.ua/cat-visnyk-znaeu/vipuski-visnik-zhnaeu>.
14. Бабич А.О., Кулик М.Ф., Макаренко П.С. Методика проведення дослідів з кормовиробництва і годівлі тварин. Київ: Аграрна наука, 1998. 78 с.
15. Городній М.М. Агрохімія. [4-е вид., переробл. та доп.] Київ: Арістей, 2008. 936 с.
16. Доспехов Б.П. Методика полевого опыта. Москва: Колос, 1973. 322 с.
17. Довідник для радіологічних служб Мінсільгосппроду України. За ред. Б.С. Прістер, Ю.О. Іванов та ін. Київ, 1997. 175 с.
18. Методика комплексного радіаційного обстеження забруднених внаслідок Чорнобильської катастрофи територій (за винятком території зони відчуження). Київ: Атика-Н, 2007. 60 с.
19. Методика проведення агрохімічної паспортизації земель сільськогосподарського призначення : керівний нормативний документ / за ред. І.П. Яцука, С.А. Балюка. Київ, 2013. 104 с.
20. Лященко С.А. Лоцилов М.О. Асташева Н.П. Методичний посібник з організації проведення науково-дослідних робіт в галузі сільськогосподарської радіології. Київ, 1992. 136 с.
21. Веремєєнко С.І. Еволюція та управління продуктивністю ґрунтів Полісся України: Монографія. Луцьк: Надстир'я, 1997. 314 с.

UDC 631.95:631.438

Accumulation of ^{137}Cs by meadow grasses on peat-bog soils of the Polissia zone in the Rivne region

N. V. Dmitriyevtseva, L. N. Shepelyuk, S. M. Pilipaka

Rivne branch of the state institution "Institute of Soil Protection of Ukraine",
Shubkov, Rivne region, Ukraine

The role and effectiveness of the combined action of various types of mineral fertilizers on the productivity of the agroecosystem and the accumulation of radionuclides by the phytomass of perennial grasses on peat-bog soil (*Histic Gleysols*) have been investigated. The research was carried out during 2011-2013. In a temporary field experiment with seeded perennial grasses (*Dactylis glomerata*, *Bromopsis inermis*, *Phleum pratense*) used for livestock feed. The aim of the research is to identify the features of the effect of radiological load on the quality of agricultural products in fertilized and non-fertilized areas by measuring the specific activity of radioactive ^{137}Cs in the dry phytomass of collected herbs, the density of soil contamination and calculating the coefficients of the transfer of radionuclides from soil to pasture fodder. The activity of ^{137}Cs in plants was determined by gamma spectrometer. The introduction of increased doses of potash (K_{120}) and phosphorus fertilizers together with potash ($\text{P}_{60} \text{K}_{120}$) was effective in reducing the activity of radiocaesium in the dry mass of feed. Over the three years of research on the variant with potash fertilizers, a decrease in ^{137}Cs activity in the feed by an average of 2.9 times was recorded, and at the site of the combined application of potash and phosphate fertilizers – by 2.7 times compared with the control variant of the experiment (without fertilizers).

Keywords: activity of ^{137}Cs ; perennial herbs; the soil; conversion factor; mineral fertilizers; radionuclide; harvest.

Citing: Dmitriyeva N.V., Shepelyuk L.N., Pilipaka S.M. (2021). Accumulation of ^{137}Cs by meadow grasses on peat-bog soils of the Polissia zone in the Rivne region. *AgroChemistry and Soil Science*. 92-97. doi:[10.31073/acss92-10](https://doi.org/10.31073/acss92-10). [in Ukrainian].