

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 предствалення 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 осінне-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	$H_{н.оп.} = \frac{\sum H_{ф.оп.}}{\sum H_{середн.оп.}}$	$\sum H_{ф.оп.}$ — сума фактичних опадів (листопад–березень); $\sum H_{середн.оп.}$ — 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 осінне-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.

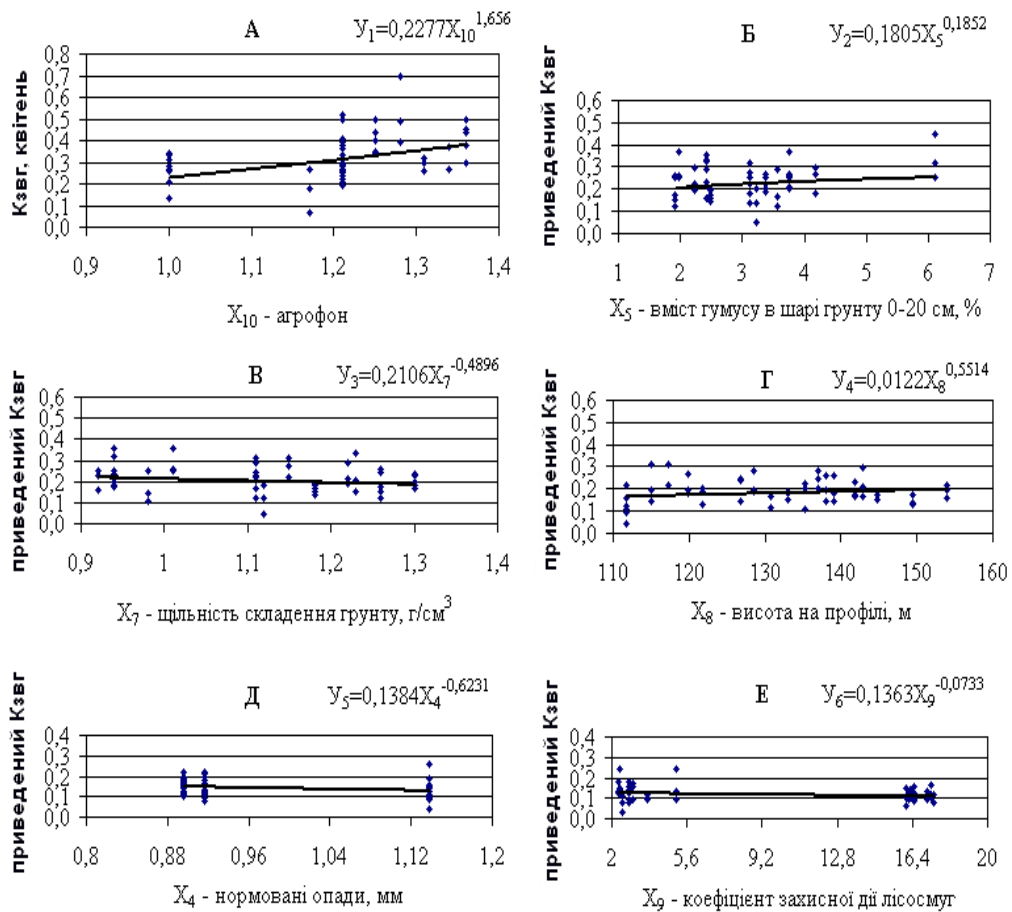


Рис. 1. Залежність коефіцієнта зволоженості ґрунту в шарі 0–100 см (квітень) від факторів X_{10} , X_5 , X_7 , X_8 , X_4 , X_9

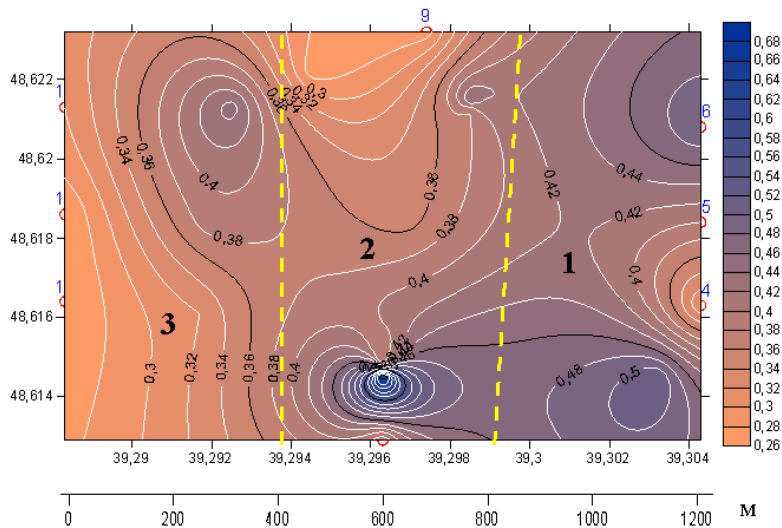


Рис. 2. 2Д діаграма коефіцієнта зволоженості ґрунту у квітні

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.

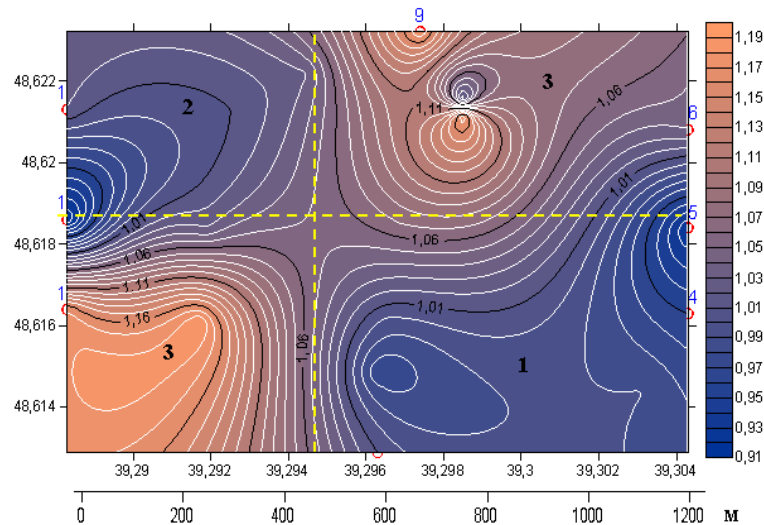


Рис. 3. 2Д діаграма коефіцієнта дефіциту води в ґрунті у травні–червні

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).

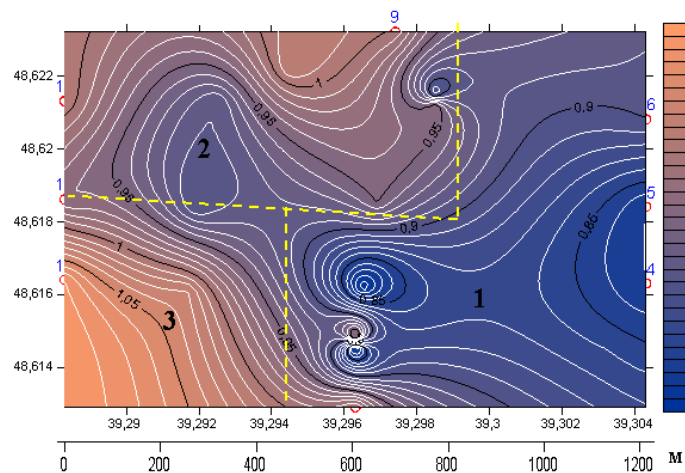


Рис. 4. 2Д діаграма коефіцієнта дефіциту води в ґрунті у липні-серпні

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).

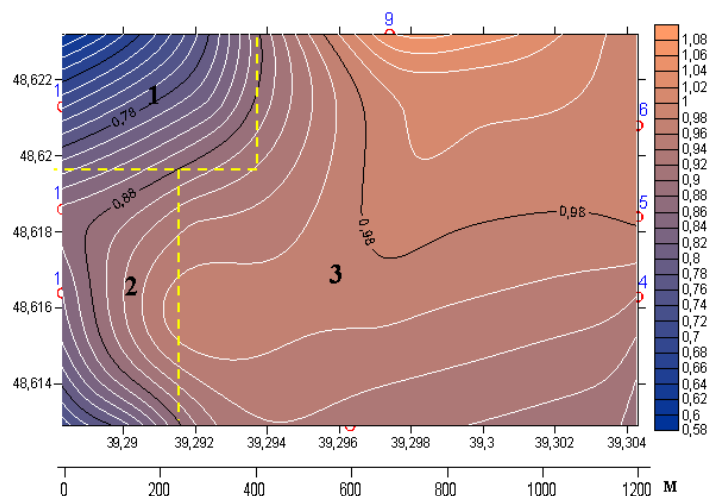


Рис. 5. 2Д діаграма коефіцієнта дефіциту води в ґрунті у вересні-жовтні

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 схилових, 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].