

УДК 631.421:57.087

## Аналіз гідрологічної функції ґрунтів степових агроландшафтів: математичні моделі міграційних процесів

В.О. Белоліпський<sup>1\*</sup>, О.П. Другова<sup>2</sup>, О.Н. Другов<sup>2\*\*</sup>

<sup>1</sup>ННЦ «Інститут ґрунтознавства та агрохімії імені О.Н. Соколовського», Харків, Україна

<sup>2</sup>ТОВ Землевпорядна фірма «ЛАН», Старобільськ, Україна

ІНФОРМАЦІЯ	АНОТАЦІЯ
<p>Отримано 04.12.2018 Отримано після доопрацювання 28.03.2019 Затверджено до друку 19.08.2019 Доступно онлайн 01.09.2019</p> <p><i>Ключові слова:</i></p> <p><i>агроландшафт;</i> <i>гідрологічна функція;</i> <i>ґрунт;</i> <i>матриця;</i> <i>модель;</i> <i>фактори.</i></p>	<p>Математичні моделі процесів міграції та накопичення вологи в ґрунтах степових агроландшафтів розроблено за результатами аналізу їх гідрологічної функції на прикладі чорнозему звичайного на території дослідного поля Синельниківської дослідної станції у типовому степовому агроландшафті з періодично промивним водним режимом. Математичне моделювання гідрологічних процесів міграції і накопичення вологи у шарах ґрунту і підґрунті (до 1000 см) з використанням квадратної матриці аналізу. Розрахунки зроблено за архівними та опублікованими даними досліджень і спостережень, проведених у період з 1967 до 2000 р. В результаті за даними натурних визначень баланс вмісту вологи у чорноземі звичайному з періодично промивним водним режимом встановлено, що у шарі ґрунту 0-10 см із 497 мм опадів 33,5 % (240 мм) витрачається на випаровування з поверхні ґрунту; 5,5 % (37 мм) – на стік; 23,7 % (160,4 мм) – на транспірацію рослинами; 8,8 % (59,6 мм) – на просочування у глибинні шари. Розроблено математико-статистичні моделі вологонакопичення у досліджуваному ґрунті під чорним паром для чотирьох зон (шарів) ґрунту: зона формування основної маси кореневої системи (0-150 см); зона зміни гранулометричного складу ґрунту з його обважненням (150-320 см); зона з низьким умістом вологи (320-500 см); зона капілярної кайми (глибше 500 см). Для шару 0-150 см виявлено провідні чинники і розраховано ступінь їхнього впливу на вологозабезпеченість ґрунту: щільність будови (57,2 %); вміст гранулометричної фракції &lt;0,001 мм (26,8 %); вміст суми фракцій &lt;0,01 мм (9,1 %); порозність ґрунту (5,6 %); найменша (польова) вологемність (1,3 %). За результатами досліджень сформульовано практичні рекомендації для землекористувачів: поліпшити гідрологічний режим шарів ґрунту і створити резерви накопичення вологи для території з агроценозами з глибини можливо шляхом формування на орних землях комплексу екологічних ніш із промивним водним режимом ґрунту (наприклад, система лісомеліоративних смуг), тобто, шляхом забезпечення взаємодії різних агрофонів з лісомеліоративними прийомами.</p>

E-mail: \*belolipskiy-42@ukr.net; \*\*drugov-a.n@ukr.net

*Форма цитування:* Белоліпський В.О., Другова О.П., Другов О.Н. Аналіз гідрологічної функції ґрунтів степових агроландшафтів: математичні моделі міграційних процесів. *Агрохімія і ґрунтознавство*. Міжвід. тем. наук. збірник. Вип. 88. Харків: ННЦ «ІГА ім. О.Н. Соколовського». 2019. С. 12-21. DOI: <https://doi.org/10.31073/acss88-02>.

### 1. Вступ

Моделювання гідрологічної функції ґрунтового покриву в натурних умовах з метою аналізу механізму міграційних процесів вологи є широко поширеним методом дослідження в природничих науках [1-4]. Ця функція означає діяльність ґрунту, спрямовану на формування певного глибкопрофільного режиму вологозабезпеченості рослин в агроландшафті [5, 6].

Виявлювана варіабельність вмісту вологи, як у часі, так і у просторі, є визначальним фактором для формування чорноземних ґрунтів та їх водно-фізичних властивостей і режимів. Випадаючи з атмосферними опадами на поверхню ґрунту волога мігрує в різні шари ґрунту і витрачається в системі «рослини (тип агрофону, транспірація) → ґрунт (випаровування, фільтрація, стік)».

Анізотропність ґрунту, як відмінності у властивостях по вертикалі і горизонталі, визначає характер і тип його зволоження, що обумовлюється кількістю атмосферних опадів, характером розподілу їх по профілю у низхідному, висхідному і бічному напрямках і типом рослинності, що використовує вологу. Об'єми вологи у цих «потоках» змінюються в межах багаторічних, річних і сезонних циклів, проте, завжди досягають деякого рівноважного стану, оцінюваного балансом вологи. Саме тому кількісні показники балансу та його складові в агроландшафтах представляють інтерес для вивчення з метою математичного моделювання міграційних процесів.

Метод математичного моделювання складних процесів є не лише найбільш ефективним способом їх аналізу, але й способом проведення «математичних експериментів» [1] для вивчення реакції модельованої системи на ті або інші деградаційні процеси.

У публікаціях [1, 2] сформульовано задачі побудови математичної моделі процесів

міграції хімічних елементів, як у природних, так і штучно створених компонентах біосфери, а також в умовах різного роду забруднення з метою аналізу механізмів складного природного процесу, прогнозів його перебігу та обґрунтування заходів для його регулювання.

В роботі В.В. Медведєва [3] узагальнено результати досліджень геохімічної і гідрологічної функцій ґрунтового покриву в умовах ґрунтово-екологічного полігону у верхніх (0-20 та 0-100 см) шарах ґрунту. Ці матеріали показують можливість трансформації характеру розвитку агроландшафту від деградаційного до якісно нового – етапу стійкого збереження його позитивних властивостей.

У результатах стаціонарних досліджень О.П. Другової [5,6] у період 1967-1992 рр. оцінено водно-фізичні властивості чорноземів звичайних і представлено дані ґрунтових процесів і глибокопрофільних (диференційовано по глибинах 0-1,5; 3-5; 5-10 м) режимів, характерних для гідрологічного профілю (згідно з класифікацією О.А. Роде [7]) степових агроландшафтів України. Вивчення цього матеріалу дозволяє зазначити, що база даних для розробки функціональних моделей накопичення вологи в гідрологічному профілі має включати інформацію з таких аспектів: 1) вологонакопичення в окремих елементах агроландшафту й екосистем (агрофон, поле сівозміни); 2) вологість шарів ґрунту від поверхні до верхнього або нижнього водоносних горизонтів; 3) випаровування з поверхні ґрунту; 4) транспірація вологи рослинами; 5) втрата води зі стоком.

В основу теоретичного обґрунтування моделі необхідно закласти кількісно збалансовану схему розподілу водних потоків по всіх структурних категоріях гідрологічного профілю ґрунту. Це означає, що потрібно знайти баланс розподілу води атмосферних опадів по всіх горизонтах ґрунту і материнської породи, з урахуванням води, витягнутої рослинами з кожного горизонту, та води, яка випаровується з поверхні ґрунту. Аналіз процесів переміщення вологи по елементах поля міграції можливий тільки на основі такої деталізованої схеми.

Мета дослідження – провести аналіз гідрологічної функції ґрунтів степових агроландшафтів і розробити математичні моделі процесів міграції та накопичення вологи.

## 2. Методичні підходи до проведення досліджень

Для аналізу гідрологічної функції ґрунтів було використано методи структурної алгебри та математичного моделювання: 1) побудова сіткових графів розподілу потоків води (мігрантів). Граф - інформаційна модель, на якій представлено сукупність об'єктів (вершини) зі зв'язками між ними (лінії), які з'єднують пари цих об'єктів; 2) аналіз із застосуванням матричних алгоритмів [1]; 3) побудова математико-статистичних моделей [8,12]. При цьому структурними категоріями моделі можна вважати, передусім, яруси розрізу квадратного майданчика в межах біогеоценозу, в число яких входять рослинність (Р) і генетичні горизонти ґрунтово-геологічного профілю (П, В, С, Г) аж до верхнього водоносного шару (Х). Крім того, вводимо узагальнені категорії: «атмосфера» (А), як джерело поверхневої вологи, «верхній (Д) і нижній (Н) сусідні райони», як джерело і приймач частини поверхневого і глибинного припливу і стоку на дослідному майданчику і, нарешті, «вихід із біогеоценозу» (У), тобто, витрата вологи на випаровування, на стік і винос мігрантів зі збиранням урожаю та за інших штучних заходів (Табл. 1).

### Таблиця 1

Усереднені параметри гідрологічних показників степового агроландшафту (ґрунти - чорноземи звичайні)

Гідрологічні категорії	Шар ґрунту, h, см	Δ h, см	Щільність будови ґрунту, г/см <sup>3</sup>	ПВ	НВ	Маса коренів	
				мм		кг/см <sup>3</sup>	частка у профілі, %
Атмосфера (А)	Атмосферні опади 497 мм						
Верхній сусід (Д)	Поверхневий стік - 37 мм						
Рослинність (Р)		3,6		66,9			
Поверхневий шар (П)	0-10	10	1,17	48,0	34,8	1,057	40,2
Верхній шар (В)	10-100	90	1,35	41,3	30,4	1,428	54,3
Середній шар (С)	100-150	50	1,38	41,8	39,6	0,087	3,3
Глибинний шар (Г)	150-350	200	1,40	40,6	30,2	0,058	2,2
Водоносний шар (Х)	350-560	210	1,36	39,5	31,1		
Нижній сусід (Н)							
Відхід (втрати) з біогеоценозу (У)	Випаровування (И) - 676 мм, в тому числі, безпосередньо з поверхні - 240 мм						

Примітка: ПВ – повна вологоємність; НВ – найменша (синонім - польова) вологоємність

Для дослідження використовували результати розрахунку балансу вологи в чорноземі звичайному на дослідному полі Синельниківської дослідної станції у типовому степовому агроландшафті з періодично промивним водним режимом. Необхідну інформацію щодо цього агроландшафту взято з опублікованих робіт О.П. Другової [5,6] про динаміку вологості ґрунтів у межах Синельниківського стаціонару, та робіт В.О. Белоліпського зі співавторами, де зібрано ерозійно-гідрологічні показники ґрунтів у степових агроландшафтах [8,12] з усередненням великої кількості результатів спостережень і досліджень за періоди 1967-1970 та 1980-2000 рр. і доповнено з монографії Є.А. Афанасьєвої [9]. Середні багаторічні параметри гідрологічних показників, використаних у моделюванні, представлено в таблиці 1.

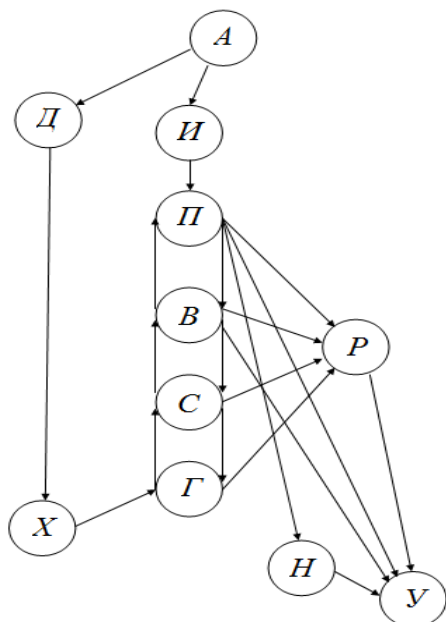
### 3. Результати досліджень та їх обговорення

#### 3.1. Теоретичне обґрунтування напряму дослідження

Водний режим степового агроландшафту з чорноземами звичайними залежить від погодних особливостей року. У періоди переважання років з великим атмосферним зволоженням можливим є наскрізне промочування ґрунту і породи, навіть до горизонту, що залягає тут на глибинах 8,0-10,0 м. У посушливі роки водний режим виявляється непромивним, а баланс вологи, що надходить з атмосферними опадами, – від'ємним. Тобто, з майданчика біогеоценозу в середньому за рік витрачається вологи більше, ніж надходить з опадами. За даними тривалих спостережень О.П. Другової [6] від'ємний баланс вологи є характерним для ландшафтів чорноземного степу і багаторічне середньорічне значення коефіцієнту зволоження (КЗ) на чорному пару дорівнює 0,97, на посівах кукурудзи – 0,74, озимої пшениці по чорному пару – 0,59, тобто, як правило, <1. Це підтверджується також висновками Є.А. Афанасьєвої [9].

Щоб пояснити можливість функціонування агроландшафту в умовах тривалого, досить стабільного водного режиму з дефіцитом вологи, очевидно, слід припустити наявність компенсації дефіциту поверхневої вологи за рахунок поповнення з підґрунтових вод. Джерела насичення підземних вод розташовуються, за межами даного ландшафту.

Схему зв'язків компонентів агроландшафту та водного режиму чорнозему звичайного зображено на рис.1, де кожен структурну категорію гідрологічного профілю ґрунту показано літерою згідно з поясненням у табл. 1. Категорія, з якої виходить стрілка потоку, є "донором", а категорія, на яку вказує стрілка – "акцептором".



**Рис. 1.** Схema зв'язків аналізованих компонентів степового ландшафту за Анохіним [1].

(Символи на рисунку пояснено у таблиці 1)

Перша особливість цього процесу полягає в тому, що загальним джерелом всієї циркулюючої вологи і головним донором є атмосфера (А), яка живить не тільки досліджуваний об'єкт степового агроландшафту, але й інші, що лежать за його межами, сусідні райони (Д), з яких поповнюються ресурси підземних вод (Х), які й покривають дефіцит поверхневого зволоження. Позначаємо ці потоки стрілками «АД», «ДХ» і «ХГ».

Другою особливістю графа є чергування протягом року низхідних потоків (А-И) по ланцюгу «П→В→С→Г» з потоками, висхідними по тому ж ланцюгу: «Г→С→В→П».

Епізодична зміна низхідних потоків висхідними відбувається в будь-яких біогеоценозах. З розгляду результатів спостережень, наведених у роботах [6, 9], констатовано, що промочування ґрунту поверхневою вологою рідко простягається глибше верхньої частини шару "Г". Ця волога, за теорією О.А. Роде [7], знаходиться у «підвішеному» стані й глибше неї лежать шари з вологістю не більше найменшої (польової) вологості ґрунту (НВ), що не утворюють рідинного зв'язку з водоносним горизонтом, який в цих умовах залягає на великих глибинах. Вважають [10], що в таких випадках поповнення вологи верхніх шарів ґрунту здійснюється шляхом переміщення водяної пари, наприклад, у зимовий час, коли вода з водоносного горизонту, що має додатну температуру, переміщується в охолоджені верхні шари. У літній період висушування верхніх шарів ґрунту може простягатися на велику глибину, і тоді підйом води з більш глибоких горизонтів може відбуватися шляхом капілярного підняття рідкої води по ланцюжках «Г→С→В» та «В→П». Поверхневий стік відбувається переважно за рахунок весняного танення снігового покриву і позначений ланцюгом «П→Н».

Живлення рослин, як показують результати власних досліджень авторів [6] і узагальнення Є.А. Афанасьєвої [9], здійснюється з великої товщі ґрунту: коренева система степової рослинності в пошуках вологи проникає до глибини 200 см і більше, не поступаючись у цьому лісовій рослинності, і навіть захоплює шар «Г»; це показано ланцюгом «Г→Р».

Для кількісного аналізу водного режиму замінимо приведений граф схемою зв'язку гідрологічних показників чорнозему звичайного степового агроландшафту, яка представлена у формі квадратної матриці (Табл. 2), в якій число рядків збігається з числом стовпців при 10- рівневому порядку, а елементи (a<sub>ij</sub>) утворюють головну діагональ матриці, що розділяє різне поєднання елементів (a<sub>ij</sub> ... a<sub>in</sub>) низхідних і висхідних потоків вологи.

**Таблиця 2**

Схема зв'язку гідрологічних показників чорнозему звичайного степового агроландшафту, представлена у формі квадратної матриці. (Позначення показників - у таблиці 1)

1 2	А	Д	П	В	С	Г	Р	Х	Н	У	Σ
А		<u>26,5</u> 179	<u>73,5</u> 497								<u>100</u> 676
Д								<u>100</u> 26,5* 179			<u>100</u> 26,5* 179
П				8,8* 59,6			<u>40,2</u> 23,7* 160,4		5,5* 37,0	35,5* 240	73,5* 497
В		<u>0</u>			<u>45,7</u> 4,0* 27,2		<u>54,3</u> 32,0* 216,6				<u>100</u> 36,0* 243,8
С				27,2* 184,2		<u>96,7</u> 3,9* 26,3	<u>3,3</u> 2,0* 13,2				<u>100</u> 33,1* 223,7
Г					<u>97,8</u> 29,1* 196,5		<u>2,2</u> 1,3* 8,8				<u>100</u> 30,4* 205,3
Р										<u>100</u> 59,0* 399	<u>100</u> 59,0* 399
Х						<u>100</u> 26,5* 179,0					<u>100</u> 26,5* 179,0
Н									<u>100</u> 5,5* 37,0		<u>100</u> 5,5* 37,0
У											
Σ		26,5* 179	73,5* 497	36,0* 243,8	33,1* 223,7	30,4* 205,3	59,0* 399	26,5* 179	5,5* 37	100 676	

Примітка: 1 - Прихід вологи; 2 - Витрата вологи; \* - Дефіцит вологи (%) від випаровування;  
Одиниці вимірювання: підкреслення — - мм; = - %

Так, для рядка «А» (атмосфера) ми знаємо, що загальна сума опадів (497 мм), яка надходить на майданчик не покриває обсяг випаровування на цій території (676 мм). Отже для дотримання водного балансу в чарунку «АД» пишемо 179 мм (26,5 % від загального випаровування).

Щодо категорії «Д» (верхній сусід) ми не знаємо скільки води надходить з більш високих територій на майданчик. Але, виходячи з водного балансу, ця кількість повинна відповідати дефіциту вологи від випаровування (179 мм, 26,5%).

По рядку «П» (поверхневий шар ґрунту) щодо розподілу водних потоків з поверхні, ми знаємо, що на випаровування йде 35,5 % (чарунка «ПУ»), а на поверхневий стік – 5,5 % («ПН»). Щоб врахувати частку водного ресурсу, що витрачається на живлення рослин, обчислюємо витрату вологи на транспірацію з поверхневого шару «ПР», використовуючи дані Афанасьєвой [9] (Див. табл.1) і додаємо можливу кількість вологи, що просочується з поверхневого шару («ПВ»).

Рядок «В» (верхній шар ґрунту) буде формувати ресурс вологи по складанню показників виводу вологи на транспірацію з чарунки «ВР» плюс на просочування з «ВС».

Рядок «С» (середній шар ґрунту). Ресурс вологи ґрунту формується по складанню показників вологи на транспірацію з шару «С» (клітина СР) плюс волога, що просочилася в шар «СГ».

Рядок «Г» (глибинний шар ґрунту). У ньому відбувається перенесення вологи в глибину і з'єднання з глибинними потоками вологи.

Щоб звести позначений баланс у горизонтальних рядках внесено донорів, а в клітини їх перетину зі стовпцями – напрям стрілки графа до відповідних акцепторів та їх параметри за матричними алгебраїчними розрахунками. Запис вихідних даних у квадратній матриці (Табл. 2) проводимо по рядках: «А» - кількість опадів (497 мм), випаровування (676 мм), «П» - поверхневий стік (37 мм) і випаровування з поверхні (240 мм) як розподіл ресурсів шару «П» (див. Табл. 1).

При цьому враховуємо найголовнішу відмінність алгоритмів обчислення графів, що мають замкнуті цикли, яка полягає в даному разі в тому, що ми повинні окремо порахувати низхідний потік і окремо – висхідний, перевіряючи результати зведенням балансу вологи по кожному горизонтальному та вертикальному рядку за такими етапами:

**Етап 1.** Визначення дефіциту вологи в рядку «А», як різниці між випаровуванням і опадами:  $676-497=179$  мм (26,5 %);

**Етап 2.** Визначення параметра транспірації вологи рослинністю (стовпець «рослинність Р») який розраховується як різниця між сумарним випаровуванням, випаровуванням з поверхні і стоком:  $676-240-37 = 399$  мм (59%). Цю цифру ми рознесемо по рядках пропорційно розподілу коренів: 40,2 % в чарунці "ПР", 54,3 – в "ВР", 3,3 – в "СР" і 2,2 % – в "ГР" і визначаємо кількість транспірації вологи з поверхневого шару 0-5 см (160,4 мм), шару 5-90 см (216 мм), шару «С»-13,8 мм і «Г»-8,8 мм і їх відсоток від випаровування (676 мм) відповідно 23,7; 32,0; 2,0 і 1,3;

**Етап 3.** Визначення кількості вологи, що залишається для просочування у верхній шар ґрунту. З поверхні «П» на рослинність «П→Р», на стік в нижній район «П→Н» та на випаровування «П→У» витрачається  $160,4 + 37,0 + 240,0 = 437,4$  мм вологи. Отже, з опадів, що випали на поверхню, 497 мм (підсумок стовпця «П») залишається на просочування у верхній шар «П→В» 59,6 мм;

**Етап 4.** Визначення кількості вологи, що просочилася в шар «В» і «С». Волога з шару «В» на 54,3 % витрачається на транспірацію, отже, 45,7 % вологи, що просочилася зверху (59,6 мм), тобто 27,2 мм, піде в більш глибокий горизонт «С», що відображено в чарунці «ВС». З шару «С» тільки 3,3 % вологи йде на транспірацію і, значить, 96,7 % вологи, що просочилась, або 26,3 мм, потрібно записати в чарунку «СГ»;

**Етап 5.** Визначення джерела поповнення дефіциту вологи в загальному балансі. Цим джерелом в ресурсі глибинного шару може бути нове джерело висхідної вологи, яка приходить з віддалених районів по ланцюгу «АД→ДХ→ХГ», заповнює дефіцит вологи в розмірі  $676 - 497 = 179$  мм (26,5%) – шар «АД». В результаті стовпця «Г» нам слід записати суму  $26,3 + 179,0 = 205,3$  мм як ресурс цього шару. З цієї кількості 8,8 мм йде на транспірацію, і, отже, різниця  $205,3 - 8,8 = 196,5$  мм піднімається вгору по шляху «ГС»;

**Етап 6.** Визначення балансу вологи. У стовпці «С» у результаті виявляється  $27,2 + 196,5 = 223,7$  мм. З них 13,2 мм йде на транспірацію, а крім того, 26,3 мм стікають назад у шар «Р». Таким чином, піднімається вгору  $223,7 - (13,2+26,3) = 184,2$  мм, що показано в чарунці «СВ».

Ресурс вологи шару «В» складається з  $59,6 + 184,2 = 243,8$  мм і він повністю витрачається на транспірацію «ВР» = 216,7 і на просочування вниз «ВС» = 27,2 мм. Таким чином, баланс зведений правильно, так як фундаментальна властивість матричних алгоритмів — це рівність сум однойменних вертикальних стовпців і горизонтальних рядків,

дотримується. Ця властивість слугує критерієм для перевірки правильності складання матриці на всіх етапах [2].

Таким чином, за допомогою матриці показано алгоритми рішення системи рівнянь:

- |                                   |   |
|-----------------------------------|---|
| 1) $P=73,5$                       | 7) $C=B*CG$                               |
| 2) $A+Ad+0,735=1$                 | 8) $G=C*GP$                               |
| 3) $PB + 0,237+0,055+0,355=0,735$ | 9) $X=G$                                  |
| 4) $BC+0,543=1$                   | 10) $P=P 0,402+B 0,543+C 0,033+G 0,022=1$ |
| 5) $CG+0, 033=1$                  | 11) $H=P 0,055$                           |
| 6) $B=P*BC$                       | 12) $Y=P 0,355+P 0,590+H 0,055=1$         |

За викладеним матеріалом можна зробити такі узагальнення:

#### *I. За розподілом атмосферних опадів у системі шарів ґрунту («П-В-С-Г»).*

У поверхневому шарі (0-10 см) із суми атмосферних опадів (497 мм) 33,5 % (240 мм) витрачається на фізичне випаровування з поверхні; 5,5 % (37 мм) – на поверхневий стік; 23,7 % (160,4 мм) – на транспірацію рослинами; 8,8 % (59,6 мм) – на просочування, накопичення і транспірацію рослинами вологи по глибинних шарах (27,2 мм – в верхньому шарі «В», 26,9 мм – в середньому шарі «С» і 6,1 мм – у глибинному шарі «Г»).

Такий розподіл витрат і накопичення вологи створює дефіцит від загальної суми випаровування (676 мм) за період вегетації рослин у розмірі 179 мм і обумовлює вибір таких агроеліоративних прийомів в зоні активного вологообігу у ґрунті (320 см):

- атмосферна іригація, що забезпечує формування денної роси в шарі ґрунту 0-70 см і більше при створенні перепаду (зменшення) температури в ньому до рівня «льоху» і за системою І. Овсинського [11].

- регулювання випаровування (використання мульчі з рослинних залишків, поліпшення структури ґрунту);

- підвищення водопроникності здатності ґрунту агроприйомами (чизелювання, щілювання);

- використання впливу лісомеліоративних насаджень на орних землях для посилення проникнення вологи в середні і глибокі шари ґрунту з метою накопичення вологи для живлення агроценозів у глибинних шарах ґрунту і в підґрунті.

#### *II. За вибором глибин міграції вологи для побудови математичних моделей можна позначити 4 зони:*

- 1) 0-150 см – зона максимального формування кореневої системи в умовах меншої щільності ґрунту ( $1,18-1,38 \text{ г/см}^3$ ) і високої порозності ґрунту до 49-51 % з вмістом фізичної глини 55-56 %;

- 2) 150-320 см – зона зміни гранулометричного складу ґрунту (обважнення) через збільшення вмісту фізичної глини до 56-61%;

- 3) 320-500 см – зона з низьким вмістом вологи (до 15-13 %), обумовленим вмістом мулу (частинки  $<0,001 \text{ мм}$ ) у ґрунті 18-25 %. Вологість ґрунту в цій зоні коливається в межах від НВ до вологості розриву капілярів (ВРК);

- 4) Глибше 500 см – зона капілярної кайми, обумовлена глибиною підґрунтових вод 6-8 м та глибше і глинистим гранулометричним складом ґрунту (36-45 % мулу).

#### *III. За обґрунтуванням факторів влагонакопичення виділено таке поєднання:*

- 1) атмосферні опади; 2) витрата (транспірація вологи) через диференціацію агрофонів: пар, озимі по пару, кукурудза на зерно за безвідвального обробітку ґрунту; 3) гідрологічний фактор (стік + фізичне випаровування вологи з поверхневого шару ґрунту), обумовлений фізичними параметрами ґрунту (гранулометричний склад, щільність будови, порозність, найменша вологоємність). Параметри означених факторів були використані у розробці математичних моделей міграційних процесів.

### *3.2. Математичні моделі міграції вологи в ґрунті*

Кількісна оцінка вологозабезпеченості агроландшафту в більшості наукових повідомлень носить загальний характер і не відображає багатфакторних умов акумулювання, утримання і витрачання вологи.

Дослідження умов формування вологозапасів у ґрунті під чорним паром проводили на дослідному водозборі протягом вегетації залежно від параметрів фізичних чинників, згрупованих у 5 факторах, по шарах ґрунту 0-150 і 0-200 см, та у 6 факторах по шарах 0-500 і 500-1000 см:

$X_1$ щільність будови ґрунту ( $\text{г/см}^3$ );	$X_4$ порозність ґрунту (%);
$X_2$ вміст мулу (часточки розміром $<0,001$ мм) (%);	$X_5$ найменша вологоємність (НВ) (%);
$X_3$ вміст фізичної глини (ФГ - часточки розміром $<0,01$ мм) (%);	$X_6$ шар ґрунту (см).

Значення фізичних параметрів в окремих шарах ґрунту наведено в табл. 3.

**Таблиця 3**

*Фізичні параметри чорнозему звичайного під чорним паром (за матеріалами [6] в нашій обробці)*

Шар ґрунту, см	Фізичні параметри ґрунту					Зона зволоження
	Вміст мулу / ФГ, %	Щільність будови, $\text{г/см}^3$	Порозність, %	Вологість (середня за вегетацію) % / n	Вологоємність найменша (НВ), %	
0-50	36,4 / 56,0	1,18	55,1	19,65 / 45	26,8	А
60-100	36,6 / 55,7	1,35	49,4	18,68 / 45	22,6	А
100-150	34,6 / 56,7	1,38	48,2	18,9 / 36	22,2	А
160-200	34,6 / 61,0	1,43	45,9	19,03 / 32	21,7	А
230-350	35,9 / 53,5	1,38	48,7	19,08 / 39	20,8	А
380-530	23,9 / 36,8	1,36	49,4	14,48 / 44	17,0	Б
560-680	22,3 / 29,5	1,42	48,0	18,83 / 35	19,5	КК
710-860	20,1 / 29,7	1,43	47,0	24,03 / 37	27,8	КК
890-1000	40,2 / 56,0	1,65	36,0	30,85 / 36	34,5	РПВ

*Примітка:* А – Зона активного вологообігу; Б – Зона постійного зволоження; КК – Зона капілярної кайми; РПВ – Рівень підґрунтових вод; n – Кількість спостережень

Для побудови математико-статистичної моделі вологонакопичення у шарі ґрунту 0-150 см степового агроландшафту дані експериментальних досліджень впливу п'яти чинників були проаналізовані за методикою парних зв'язків з послідовним виключенням значущих чинників [12]. Методика дозволяє отримати задовільну точність апроксимації даних, хорошу графічну наочність інформації на агрофоні, представленому чорним паром (Рис. 2). На графіку А показано найбільш тісний регресійний зв'язок запасів вологи у ґрунті та щільності його будови, апроксимований рівнянням  $Y_1 = 27,05X_1^{-0,98}$  за випадкових значень  $X_2 - X_5$ .

Подальші регресійні зв'язки показано після послідовного виключення досліджуваних чинників:  $Y_2$  – після виключення  $X_2$ ,  $Y_3$  – після  $X_3$ ,  $Y_4$  – після  $X_4$ ,  $Y_5$  – після  $X_5$ . При цьому залишковий результат значення коефіцієнта зволоженості ґрунту (наприклад,  $Y_2$ ) залежить від чинника  $X_2$  при випадковому поєднанні ще не досліджених чинників  $X_3 - X_5$ .

Комплексна емпірична модель залежності вологозапасів ґрунту виражається рівнянням регресії:

$$Y_{\text{заз}} = A * X_1^{-0,98} * X_2^{0,461} * X_3^{-0,15} * X_4^{-0,09} * X_5^{0,022},$$

де А – постійний коефіцієнт, кореляційне відношення  $\eta = 0,998$ .

Виявлено провідні фактори, що впливають на вологозабезпеченість та визначено ступінь (частку, %) впливу кожного з них:  $X_1$  – щільність будови ґрунту, (57,2 %);  $X_2$  – вміст мулу, (26,8 %);  $X_3$  – вміст ФГ, (9,1 %);  $X_4$  – порозність ґрунту, (5,6 %);  $X_5$  – НВ, (1,3 %).

### 3.3. Порівняльний аналіз вологозабезпеченості за вегетаційний період по шарах ґрунту (гідрологічного профілю)

Порівняльним аналізом вологозапасів і параметрів у моделях агроландшафту в період вегетації (травень-жовтень) виявлено провідні групи факторів керування гідрологічним режимом ґрунту [12] (Табл. 4). Так, у шарах 0-150 і 0-200 см провідними факторами формування вологозапасів є  $X_1$  - щільність будови ґрунту (57,2 і 65,9 %) і  $X_2$  – вміст мулу (25,5 і 26,8 %). У шарі ґрунту 0-1000 см запас вологи визначається фактором  $X_5$  – найменша вологоємність ґрунту (93,6 %). У шарі 0-500 см зі збільшенням глибини гідрологічного профілю провідними факторами є також  $X_1$  (41-42 %),  $X_2$  (39,1 %) і зростає роль фактора глибини  $X_6$  (13,3 %).

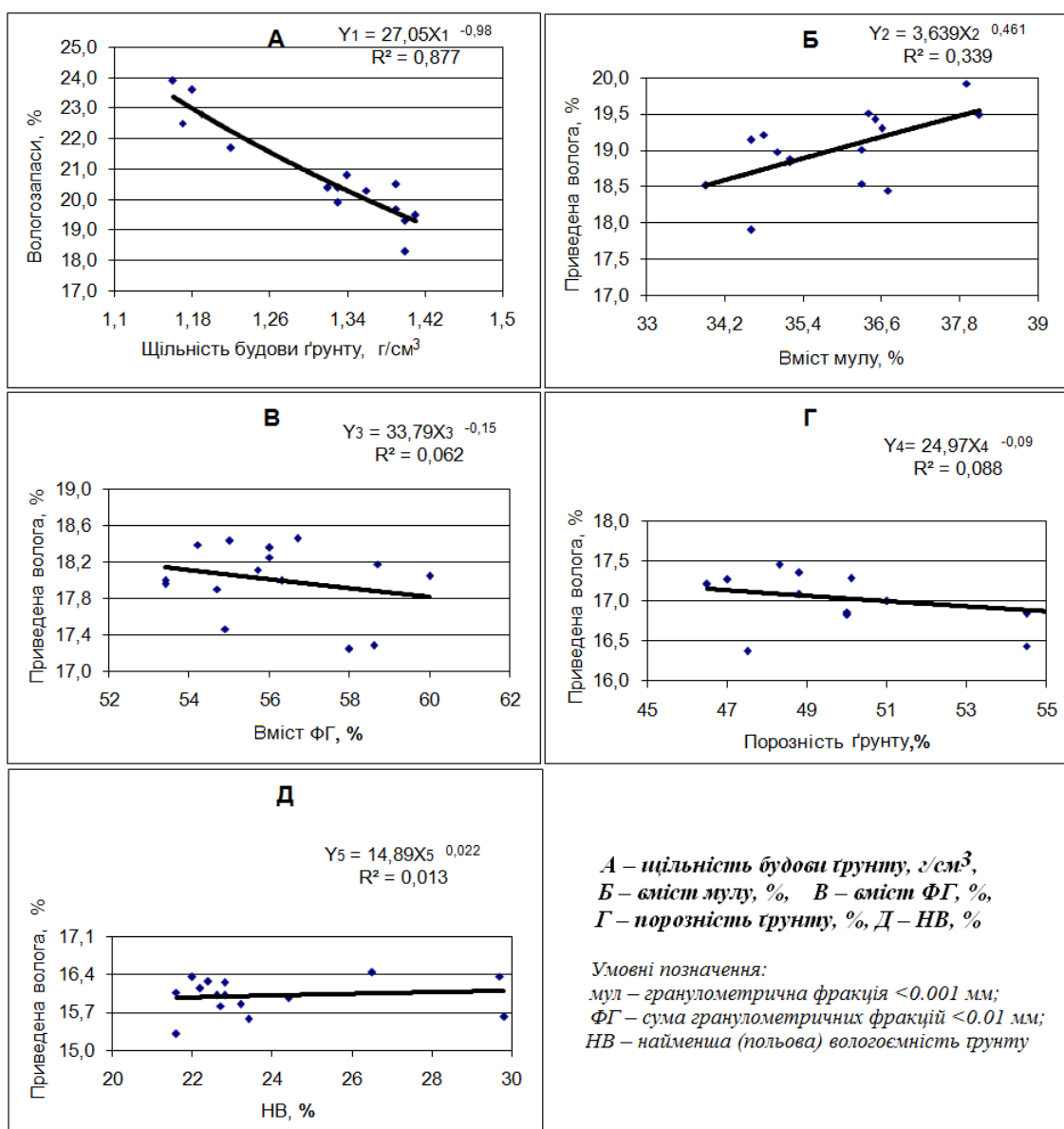


Рис. 2. Залежність запасів води у шарі ґрунту 0-150 см від фізичних параметрів

Таблиця 4

Параметри факторів і моделі запасів води у різних шарах ґрунту

Шар ґрунту, см	Фактори, їх порядок та їх вплив (%); модель, коефіцієнт кореляції ( $\eta$ ), відносна помилка (E, %)				
0-150	$X_1 - 57,2$	$X_2 - 26,8$	$X_3 - 9,1$	$X_4 - 5,6$	$X_5 - 1,3$
	$Y = 13,31403 X_1^{-0,986} X_2^{0,4617} X_3^{-0,1565} X_4^{-0,098} X_5^{0,0226}$ ( $\eta=0,998$ , E=0,012)				
0-200	$X_1 - 65,9$	$X_2 - 25,5$	$X_4 - 6,6$	$X_5 - 2$	-
	$Y = 9,53433 X_1^{-0,9489} X_2^{0,3669} X_4^{-0,0943} X_5^{0,0294}$ ( $\eta=0,999$ , E=0,013)				
0-500	$X_6 - 13,3$	$X_2 - 39,1$	$X_1 - 41,2$	$X_5 - 1,9$	$X_4 - 4,5$
	$Y = 6,34516 X_6^{-0,1233} X_2^{0,3622} X_1^{0,3817} X_5^{-0,0173} X_4^{0,0421}$ ( $\eta=0,980$ , E=1,21)				
500-1000	$X_6 - 88,8$	$X_1 - 7,4$	$X_2 - 1,9$	$X_4 - 1,6$	$X_3 - 0,3$
	$Y = 0,00994 X_6^{1,1599} X_1^{0,0961} X_2^{-0,0254} X_4^{0,0025} X_3^{0,0153}$ ( $\eta=0,997$ , E=0,18)				
0-1000	$X_5 - 93,6$	$X_6 - 1,7$	$X_3 - 1,0$	$X_2 - 1,8$	$X_1 - 1,9$
	$Y = 0,986195 X_5^{0,9228} X_6^{0,0169} X_3^{-0,01} X_2^{0,0179} X_1^{0,0208}$ ( $\eta=0,998$ , E=0,087)				

*Примітка.* Фактори:  $X_1$  – щільність будови;  $X_2$  – мул (гранулометрична фракція <0.001 мм);  $X_3$  – ФГ (сума гранулометричних фракцій <0.01 мм);  $X_4$  – порозність;  $X_5$  – НВ (найменша вологоємність);  $X_6$  – глибина гідрологічного профілю;  $Y$  – запаси води, %



Таким чином, на підставі встановлених закономірностей формування вологозапасів ґрунту за розробленими математико-статистичними моделями можна стверджувати, що в степовому агроландшафті керування гідрологічним режимом у біологічно активному шарі 0-150 (0-200) см є можливим з використанням ґрунтоводоохоронних агротехнічних прийомів, спрямованих на забезпечення повного поглинання опадів і зменшення випаровування, що збігається з теоретичним обґрунтуванням (див. табл. 2).

Однак ущільнення ґрунту у шарах 50-100 см (до  $1,35 \text{ г/см}^3$ ), 100-150 см (до  $1,38 \text{ г/см}^3$ ) і 150-200 см (до  $1,43 \text{ г/см}^3$ ) (Табл. 3) обумовлює виникнення прошарків висушування ґрунту з їх негативним впливом у передпосівний період та період формування врожаю сільгоспкультур [6,13].

Поліпшити гідрологічний режим цих і більш глибоких шарів ґрунту (до 500 см) і створити резерви накопичення вологи на території з агроценозами з глибини можна шляхом формування на орних землях комплексу екологічних ніш з промивним гідрологічним режимом ґрунту (система лісомеліоративних смуг), тобто створити комплекс взаємодії різних агрофонів з лісомеліоративними прийомами [13].

#### 4. Висновки

1. На основі сіткового графа розподілу потоків по структурних категоріях фактичного геологічного розрізу квадратних майданчиків описано балансові розрахунки водних режимів чорнозему звичайного степового агроландшафту з періодично промивним водним режимом.

2. За структурою вологонакопичення в системі горизонтальних шарів ґрунту ("П-В-С-Г") у поверхневому шарі (0-10 см) із 497 мм опадів 33,5 % (240 мм) витрачається на фізичне випаровування з поверхні ґрунту; 5,5 % (37 мм) – на поверхневий стік; 23,7 % (160,4 мм) – на транспірацію рослинами; 8,8 % (59,6 мм) на просочування, накопичення і транспірацію рослинами вологи по глибинних шарах (27,2 мм – у верхньому шарі "В", 26,9 мм – у середньому шарі "С" і 6,1 мм – в глибинному шарі «Г»). Такий розподіл витрат і накопичення вологи створює дефіцит вологи за період вегетації рослин у розмірі 179 мм і обумовлює вибір агроеліоративних прийомів у зоні активного вологообігу ґрунту (0-320 см).

3. За вибором глибин міграції вологи для побудови математичних моделей можна позначити чотири зони:

– 0-150 см – зона максимального формування кореневої системи в умовах меншої щільності будови ґрунту (до  $1,38 \text{ г/см}^3$ ) і високої порозності ґрунту (до 51 %) з умістом фізичної глини 55-56 %;

– 150-320 см – зона збільшення вмісту фізичної глини до 57-61%;

– 320-500 см – зона з низьким умістом вологи – до 15-13 %;

– глибше 500 см – зона капілярної кайми, глибина залягання і потужність якої обумовлена глибиною залягання підґрунтових вод (6-8 м) та більш важким гранулометричним складом ґрунту (вміст мулу – 36-45 %).

4. За обґрунтуванням факторів вологонакопичення виділено таке поєднання: атмосферні опади; витрата (транспірація вологи) через диференціацію агрофонів: пар, озимі по пару, кукурудза на зерно з безвідвальним обробітком ґрунту; гідрологічний фактор, обумовлений фізичними параметрами ґрунту (гранулометричний склад, щільність будови, порозність, найменша вологоємність).

5. За розробленою математико-статистичною моделлю вологонакопичення у ґрунті степового агроландшафту під чорним паром для шару ґрунту 0-150 см виявлено провідні фактори і ступінь (частку) їхнього впливу (%) на вологозабезпеченість:  $X_1$  – щільність будови ґрунту (57,2 %) →  $X_2$  – вміст мулу (26,8 %) →  $X_3$  – вміст ФГ (9,1 %) →  $X_4$  – порозність ґрунту (5,6 %) →  $X_5$  – НВ (1,3 %).

6. Порівняльним аналізом вологозапасів і параметрів у моделях агроландшафту в період вегетації (травень-жовтень) виявлено провідні групи факторів керування гідрологічним режимом ґрунту у різних шарах:

– 0-150 і 0-200 см провідними факторами вологозапасів є  $X_1$  – щільність будови ґрунту (57,2-65,9 %) і  $X_2$  – вміст мулу (25,5-26,8 %);

– 0-500 см зі збільшенням глибини гідрологічного профілю провідними факторами також залишаються  $X_1$  (41-42 %),  $X_2$  (39,1 %) і зростає роль фактора глибини –  $X_6$  (13,3 %);

– 0-1000 см формування вологозапасів визначається фактором  $X_5$  – найменша вологоємність ґрунту (93,6 %).

### Список використаних джерел

1. Анохин В.Л. Алгоритмы исчисления водного режима ландшафтов суши для математической модели миграционных процессов. *Почвоведение*. 1971. № 1. С.92-101.
2. Anokhin V.L., Svirzhev Y.M., Tyuryukanov A.N. The mathematical model of process migration of the radioisotope strontium in the soil. *Proceed. intern. Sympos. on Radioecology*. Stockholm, 1966, Pergamon Press, N. Y., 1967. P. 32-40.
3. Медведев В.В. Мониторинг почв Украины. Концепция. Итоги. Задачи. (2-ое пересмотренное и дополненное издание). Харьков: Изд. КП «Городская типография», 2012. 536 с.
4. Будник С.В. Оптимизация агроландшафтов. Житомир: Изд. ЖГУ им. И.Франка, 2007. 311 с.
5. Другова О.П., Кисіль В.Д. Глибокопрофільне дослідження вологості в Північному Степу України. *Вісник с.-г. науки*. 1974. №3. С. 47-52.
6. Другова О.П. До формування функціональної моделі «чорноземи» степу. *Вісник ХНАУ*. 2011. №1. С. 61-65.
7. Роде А.А. Методы изучения водного режима почв. Москва: Изд. АНСССР, 1960. 243 с.
8. Шелякин Н.М., Белоліпський В.А., Головченко И.Н.. Контурно-мелиоративное земледелие на склонах. Киев: Урожай, 1990. 168 с.
9. Афанасьева Е.А. Черноземы Среднерусской возвышенности. Москва: Наука, 1966. 228 с.
10. Селезнёв К.Г. Изменение влажности от поверхности до уровня грунтовых вод в южной степи УССР. *Почвоведение*. 1970. № 9. С. 44-53.
11. Овсинский И.Е. Новая система земледелия. К 110-летию первого издания и к 100-летию второго издания. Киев: Зерно, 2010. 331 с.
12. Белоліпський В.О. Ґрунтоводоохоронна оптимізація агроландшафтів: Навчальний посібник. Суми: Університетська книга, 2012. 399 с.
13. Белоліпський В.О., Полулях М.М. Оцінка функціонування агроландшафту за показниками вологозабезпеченості та параметри його оптимізації (методичні рекомендації). За ред. доктора с.-г. наук В.О. Белоліпського. Харків, 2015. 74 с.

UDC 631.421:57.087

### Analysis of the soil hydrological function of steppe agrolandscapes: mathematical models of migration processes

V.O. Belolipskiy<sup>1\*</sup>, O.P. Druhova<sup>2</sup>, O.N. Druhov<sup>2\*\*</sup><sup>1</sup>NSC "Institute for Soil Science and Agrochemistry Research named after O.N. Sokolovsky", Kharkiv, Ukraine<sup>2</sup> Land management company "Lan", Starobilsk, Ukraine

E-mail: \*belolipskiy-42@ukr.net; \*\*drugov-a.n@ukr.net

Mathematical models of the processes of migration and accumulation of moisture in the soils of steppe agrolandscapes were developed according to the results of the analysis of soil hydrological function. As an example, chernozem ordinary was taken on the territory of the experimental field of the Sinelnikovskiy experimental station in a typical steppe agrolandscape with a periodically leaching water regime. Methodical approaches. Mathematical modeling for hydrological processes of migration and accumulation of moisture in different layers of soil to a depth of 1000 cm. A square matrix of analysis was used. The calculations were performed using archival and published results of studies and observations conducted from 1967 to 2000. According to the results of field determination of moisture balance in chernozem ordinary with periodically leaching water regime, it was found: in a soil layer 0-10 cm from 497 mm of precipitation 33.5 % (240 mm) consumed for evaporation from the soil surface; 5.5 % (37 mm) go to stock; 23.7 % (160.4 mm) - for transpiration by plants; 8.8 % (59.6 mm) - filtered in deep layers. Mathematical-statistical models of moisture accumulation were developed for four vertical zones (layers) of the studied soil under black fallow: (1) zone of formation of the main root mass (0-150 cm); (2) zone of the soil texture weighting (150-320 cm); (3) zone of low moisture content (320-500 cm); (4) capillary moisture area (deeper than 500 cm). For a layer of 0-150 cm, the leading factors are established and the share of their participation in the soil moisture balance is calculated: soil bulk density (57.2 %); the content of particle size fraction <0,001 mm (26.8 %); total content of fractions <0.01 mm (9.1 %); soil porosity (5.6 %); field water capacity (1.3 %). Based on the research results, practical recommendations for land users were formulated: improvement of the soil hydrological regime and creation of reserves for moisture accumulation in the deeper layers can be achieved by forming a wide range of ecological niches with leaching water regime on arable lands (for example, a system of reclamation forest belts). Thus, the efficiency of moisture accumulation in the agrolandscape was achieved by ensuring the interaction of various agricultural backgrounds with forest-reclamation methods.

**Keywords:** hydrological function; soil; agrolandscape; matrix; model; factors.

*Citing:* Belolipskiy V.O., Druhova O.P., Druhov O.N. 2019. Analysis of the soil hydrological function of steppe agrolandscapes: a mathematical model of migration processes. *Agrochemistry and Soil Science*. Collected papers. No. 88. Kharkiv: NSC ISSAR, P. 12-21. (Ukr.). DOI: <https://doi.org/10.31073/acss88-02>.