
ЕКОНОМІКА. ЗЕМЕЛЬНІ ВІДНОСИНИ ТА АКТУАЛЬНІ ПРОБЛЕМИ ЗЕМЕЛЬНОЇ РЕФОРМИ

УДК 631.582:519.86:502:33 <http://dx.doi.org/10.31548/zemleustriy2024.01.06>

МЕТОДИЧНІ ПІДХОДИ ДО ЕКОНОМІКО- МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ЧЕРГУВАННЯ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ КУЛЬТУР (СІВОЗМІН) ПРИ РОЗРОБЦІ ПРОЕКТУ ЗЕМЛЕУСТРОЮ, ЩО ЗАБЕЗПЕЧУЄ ЕКОЛОГО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ СІВОЗМІНИ ТА ВПОРЯДКУВАННЯ УГІДЬ

Й.М. ДОРОШ,

доктор економічних наук, професор, член-кореспондент НААН,

Інститут землекористування НААН України

E-mail: landukrainenaas@gmail.com

Ш.І. ІБАТУЛЛІН,

доктор економічних наук, професор, академік НААН,

Інститут землекористування НААН України,

*Інститут розвитку села та сільського господарства Польської
академії наук (IRWiR PAN)*

E-mail: shamilibatullin@gmail.com

О.С. ДОРОШ,

доктор економічних наук, професор,

Національний університет біоресурсів і природокористування України,

м. Київ,

E-mail: dorosh_o@nubip.edu.ua

А.Й. ДОРОШ,

PhD з економіки

E-mail: doroshandriy1@gmail.com

Інститут землекористування НААН України

О.В. САКАЛЬ,

доктор економічних наук, старший науковий співробітник,
Інститут землекористування НААН України,
Інститут розвитку села та сільського господарства Польської
академії наук (IRWiR PAN)
E-mail: o_sakal@ukr.net

Анотація. У пропонованій науковій праці здійснено систематизацію методичних підходів до оптимізаційного та динамічного моделювання чергування сільськогосподарських культур (сівозмін) при розробленні проектів землеустрою, що забезпечують еколого-економічне обґрунтування сівозміни та впорядкування угідь, позаяк запропоновані до сьогодні моделі сівозмін вирішують поставлену задачу не в загальному вигляді, а лише у певних конкретних випадках або її складових. У цій відповідності обґрунтовано потребу в розробленні повноцінних програмних продуктів із користувацьким інтерфейсом, інтегрованих до існуючих інформаційно-облікових баз даних сільськогосподарських формувань.

Доведено, що економіко-математичне моделювання сівозмін необхідно розвивати шляхом удосконалення методології динамічних сівозмін, які дадуть змогу аграріям аналізувати економічну ефективність різних альтернативних варіантів чергування культур у конкретних природно-господарських умовах та обмеженнях, адже це перспективний інтерактивний інструмент обґрунтування управлінських виробничих рішень на основі оптимізаційних алгоритмів та аналізу великих обсягів накопичених ретроспективних даних.

Обґрунтовано підходи, критерій та обмеження економіко-математичної моделі чергування сільськогосподарських культур (сівозмін) при розробці проектів землеустрою, що забезпечують еколого-економічне обґрунтування сівозміни та впорядкування угідь.

Запропонована економіко-математична модель з її функцією мети, обмеженнями та алгоритмами спрямована на комплексне вирішення питань, пов'язаних із виробничим плануванням і раціональним землекористуванням. Представлена модель надає широкі можливості для подальшої оптимізації системи прийняття ефективних управлінських рішень в аграрній сфері та може слугувати базисом при вирішенні задач обґрунтування інвестицій і розвитку сільськогосподарського землекористування.

Ключові слова: сівозміна, проект землеустрою, економіко-математичне моделювання сівозмін, методичні підходи, динамічне моделювання, програмні продукти із користувацьким інтерфейсом, сільськогосподарське землекористування, землекористування, сільськогосподарські культури.

Актуальність

Сівозміна є важливою технологією в аграрному виробництві, що полягає в чергуванні різних культур

на одному полі протягом кількох років. Це допомагає зберегти родючість ґрунту, зменшити негативний вплив бур'янів, хвороб і шкідників сільськогосподарських культур, підви-

щити врожайність культур та знизити витрати на засоби захисту рослин й інші виробничі ресурси.

Законом України «Про землеустрій» передбачено розроблення «...проектів землеустрою, що забезпечують еколого-економічне обґрунтування сівозміни та впорядкування угідь» [1] згідно з пунктом «е» статті 25 Закону. Розроблення таких проектів спрямоване на «...організацію сільськогосподарського виробництва і впорядкування сільськогосподарських угідь у межах землеволодінь та землекористувань для ефективного ведення сільськогосподарського виробництва, раціонального використання та охорони земель, створення сприятливого екологічного середовища і покращання природних ландшафтів» [2]. Згідно з положеннями статті 52 Закону цей вид документації із землеустрою передбачає: - визначення місця розташування виробничих будівель і споруд; - організацію території землеволодінь та землекористувань з виділенням сівозміни, що базується на екологічних та економічних факторах, включаючи формування інфраструктури (інженерної та соціальної); - визначення типів і видів сівозміни передбаченої до запровадження на підставі спеціалізації сільськогосподарського виробництва; - проектування полів сівозміни; - складання схем чергування сільськогосподарських культур у сівозміні; - розроблення плану переходу до прийнятної сівозміни; - перенесення запроектованих полів сівозміни в натуру (на місцевість) [1, 2].

Задача економіко-математичного моделювання чергування сільськогосподарських культур включає велику кількість факторів і є надзвичайно складною з математичної та алгорит-

мічної точок зору, що певною мірою пояснює відсутність поширення її інтегрованих рішень як у літературі, так і на практиці.

Проблему розробки ефективної сівозміни неможливо вирішити без належної методології моделювання, яка повинна включати взаємопов'язані блоки: земельних ресурсів; технологій вирощування сільськогосподарських культур; моделей програмування урожайності сільськогосподарських культур; спеціалізації та масштабів господарства; обмежень щодо наявних матеріально-технічних, фінансових, кадрових, інформаційних, організаційних та інших ресурсів господарства; кон'юнктури ринку та економічного середовища підприємства; просторового моделювання розміщення культур по полях сівозмін (на основі ГІС-технологій); оптимізації складу машино-тракторного парку і виконання технологічних процесів; інвестиційного обґрунтування проектних рішень; комплексного врахування економічних та екологічних критеріїв оптимальності моделі тощо.

На даний момент українські й зарубіжні вчені розробили численні економіко-математичні моделі для побудови сівозмін [3, 4, 5]. Найбільш поширеними на сьогодні є моделі лінійного програмування структури посівних площ сільськогосподарських підприємств за критеріями максимуму чистого доходу.

На жаль, запропоновані до сьогодні моделі сівозмін вирішують поставлену задачу не в загальному вигляді, а лише у певних конкретних випадках або її складових: проектування ґрунтозахисних сівозмін чи сівозмін на еродованих або сильно змитих землях; врахування економічних норма-

тивів у лінійних моделях структури виробництва; врахування екологічних обмежень. При цьому відсутня загальна методологія комплексного програмування та проектування системи сівозмін з урахуванням усіх її окремих підзадач. Однак на практиці потрібні не тільки ефективні оптимізаційні, пошукові алгоритми для розв'язання зазначених задач із відповідними структурами даних, але й повноцінні програмні продукти з користувацьким інтерфейсом, інтегровані до існуючих інформаційно-облікових баз даних сільськогосподарських формувань.

Також відмітимо, що відсутність сівозмін в аграрних підприємствах у сучасних умовах пов'язано зі складністю довгострокового виробничого планування: сьогодні швидко змінюються економічні, організаційні, правові та інституційні засади господарювання; пришвидшуються та змінюються логістичні процеси в галузі, щороку відбуваються кон'юнктурні коливання ринків; внаслідок земельної реформи в Україні відбулось подрібнення землеволодінь і землекористувань, і більшість сільськогосподарських земель перебувають у коротко- та середньостроковій оренді, що ускладнює розробку довготермінових планів щодо землекористування.

Проблема виробничого планування загострюється у зв'язку із втратами сільського господарства внаслідок збройної агресії росії, зростає роль факторів зовнішнього середовища.

Економіко-математичне моделювання сівозмін, на нашу думку, необхідно розвивати шляхом удосконалення методології динамічних сівозмін, які дадуть змогу аграріям аналізувати економічну ефективність різних альтернативних варіантів чергування

культур у конкретних природно-господарських умовах та обмеженнях, адже це перспективний інтерактивний інструмент обґрунтування управлінських виробничих рішень на основі оптимізаційних алгоритмів та аналізу великих обсягів накопичених ретроспективних даних.

Мета дослідження. Обґрунтувати підходи, критерій та обмеження економіко-математичної моделі чергування сільськогосподарських культур (сівозмін) при розробці проекту землеустрою, що забезпечують еколого-економічне обґрунтування сівозміни та впорядкування угідь.

Методичні підходи

Виходячи із проведеного нами дослідження для економіко-математичного моделювання сівозмін пропонуємо використовувати лінійне програмування (лінійну оптимізацію) із формуванням системи змінних у вигляді орієнтованого графу.

Окреслимо основні групи факторів, які доцільно врахувати в моделі сівозміни. Ці фактори необхідно формалізувати через встановлення відповідних нормативів, обмежень, а також критеріїв оптимальності моделювання сівозміни. До таких факторів відносимо:

1) агрономічні фактори, включаючи аналіз ґрунтів, кліматичних умов, гідрології та інших фізичних чинників, які впливають на вирощування сільськогосподарських рослин. Характер впливу цих факторів залежить від відповідності конкретних умов потребам окремих культур, наприклад, за показниками рівня вологості, рН ґрунту, наявністю необхідних поживних речовин, рельєфом, родючістю ґрунту, впливом культур-по-

передників на рівень урожайності наступних культур, розвитком негативних явищ і процесів щодо засмічення бур'янами, шкідниками, хворобами тощо;

2) економічні фактори, включаючи аналіз: виробничих витрат на вирощування культур, урожайності культур залежно від рівня інтенсивності технології вирощування, очікуваного чистого доходу (прибутків), мінімальних та максимальних економічно обґрунтованих обсягів виробництва сільськогосподарської продукції за її видами, наявних виробничих ресурсів за їх видами;

3) екологічні фактори, включаючи оцінку впливу на навколишнє середовище, збереження ґрунтів і баланс гумусу, біорізноманіття, забруднення земельних і водних ресурсів;

4) соціальні фактори, включаючи аналіз потреб місцевого населення та соціальних аспектів, забезпечення продовольчої безпеки регіону, робочих місць для місцевого населення;

5) інженерно-технічні фактори, враховуючи аналіз доступності та ефективності використання енергетичних машин, сільськогосподарської техніки, машино-тракторних агрегатів, інженерних систем і мереж, джерел електроенергії, меліорації;

6) просторові та транспортно-складські фактори, включаючи просторовий аналіз земельних ресурсів та маршрутів руху техніки полями сівозмін, місцезонашування виробничих ресурсів, складів, наявних автотранспортних можливостей.

Усі показники, які розраховуються у моделі сівозмін, характеризують економічну ефективність поточної виробничої діяльності і не враховують капітальні вкладення або довготермінові інвестиції.

На основі просторового аналізу необхідно визначити межі масивів сільськогосподарських земель і межі та площі полів всередині них. Для кожного поля визначатиметься ймовірний пул можливих варіантів їх подальшого використання для вирощування тих чи інших сільськогосподарських культур.

Для цього необхідно побудувати орієнтований граф можливих варіантів чергування сільськогосподарських культур по полях сівозмін. Граф – це сукупність вершин (вузлів) та зв'язків (ребер) між ними. У нашому випадку вершинами графу є площі конкретних культур (з числа тих, які включено до моделювання), а ребрами – еколого-економічний ефект (чистий дохід), що зумовлюється вирощуванням даної культури на даному полі з урахуванням її попередників. Задача моделювання сівозмін пов'язана із ще однією науковою проблемою – моделюванням урожайності кожної сільськогосподарської культури залежно від великої кількості факторів.

У вершинах графа помістимо змінні, які визначають площу i -ої культури в j -ому році урожаю для h -ого поля. Ребрами графу виступатимуть вектори чергування культур, а їх значення характеризуватимуть чистий дохід, обумовлений зміною культур з одного року до наступного року.

Звичайно, граф є орієнтованим, і після культури 2-го року може йти лише культура 3-ого року і так далі. Це дозволяє сформувати спочатку граф для усіх можливих варіантів чергування для всіх культур на всіх полях на усі заплановані роки. А потім відкинути ті вершини і ребра графу, що не відповідають обмеженням, які ми повинні сформувати.

Чим жорсткішими є обмеження, тим меншим стає граф і менше варіантів залишитися. З іншого боку, обмеження не мають бути занадто суворими, аби залишити простір для достатньої кількості варіантів сівозміни.

За алгоритмом ведеться пошук «найдовшого» шляху по графу сівозмін, тобто найбільшої суми чистого доходу з врахуванням усіх економічних, екологічних, технологічних та інших обмежень:

$$\sum_{n=1}^N E_{n(n-1)} \rightarrow \max ,$$

де: $E_{n(n-1)}$ – чистий дохід культури n після культури $(n-1)$.

У класичній задачі площі всіх полів є приблизно однаковими, й визначення загальної площі сівозміни розраховується через суму площ усіх полів. Змінна набуває лише натуральних (булевих) значень, та існує або одне поле (кілька полів) під дану культуру за рік, або жодного (рис. 1).

Наступного року набір культур залишається, змінюється лише їх розташування на полях.

У моделі сівозміни, яку ми пропонуємо, кількість змінних зростає у прогресії із збільшенням тривалості планування та кількості полів і культур (рис. 2). І якщо розрахувати такі змінні для кожного поля, враховуючи його ґрунтові та агроекологічні особливості, то чергування культур може бути індивідуальним для кожного року і кожного поля. Тобто, кожного року набір культур може бути різним, що дозволяє врахувати динаміку змін у зовнішньому та внутрішньому середовищі аграрного підприємства.

Виходячи з вищенаведеної схеми, можна представити як формуються змінні в такій моделі, якими є площі для кожної культури для кожного року після кожного попередника (рис. 3). Для цілей моделювання можна обрати булеву змінну, яка може приймати два значення: 0 (нуль) або 1 (один). Так, якщо для якоїсь змінної в результаті розрахунку моделі отри-



Рис. 1. Умовна схема традиційної форми сівозміни п'яти сільськогосподарських культур на п'яти полях на п'ять років

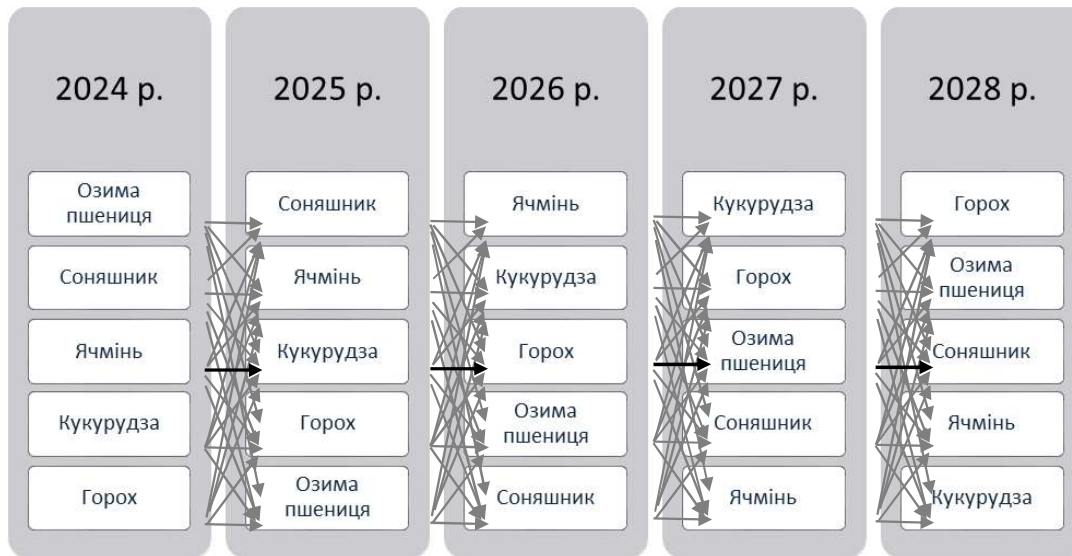


Рис. 2. Умовна схема усіх можливих варіантів моделі сівозміни п'яти сільськогосподарських культур на п'ять років для одного поля

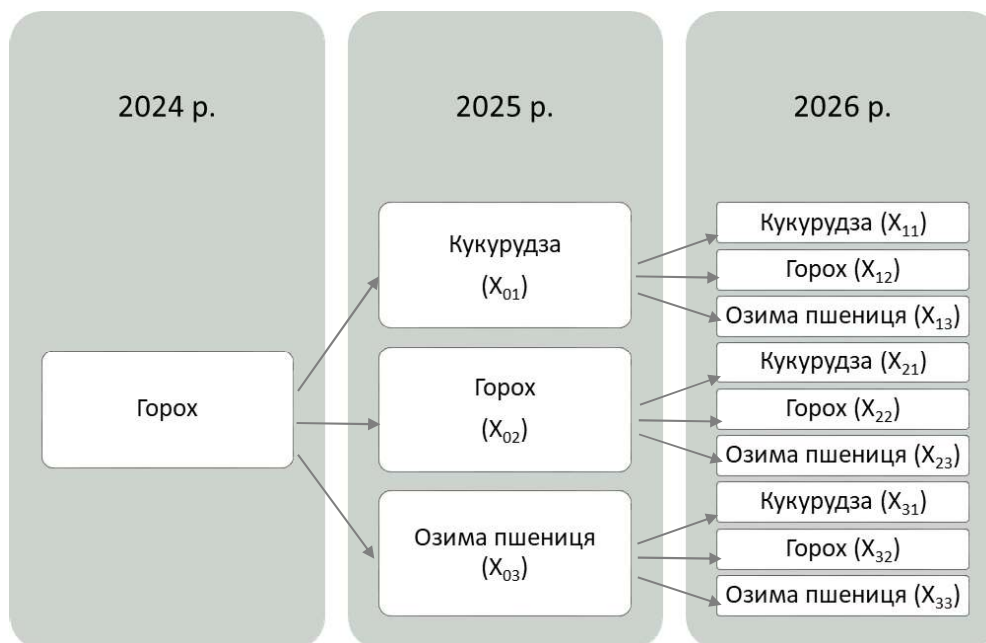


Рис. 3. Умовна схема формування змінних моделі сівозміни на прикладі трьох сільськогосподарських культур на два роки для одного поля

мано нульове значення, то культура, яка відповідає даній змінній, не потрапляє до сівозміни на даному полі в певний рік після певної культури. І навпаки, змінна, значення якої дорівнює 1, буде включена до сівозміни.

Якщо необхідно запланувати чергування для 10 культур та 7 полів, то

кількість змінних комбінаторної задачі на 10 років складе 77,8 мільярдів. Це можна розрахувати за наступною формулою:

$$y = \sum_{n=0}^N a_n c^n$$

де: y – загальна кількість змінних (усіх варіантів культур за їх площами);

n – рік сівозміни,

N – тривалість сівозміни (наприклад, 10 років);

an – кількість полів в n -ному році (наприклад, щороку 7 полів);

c – перелік сільськогосподарських культур (наприклад, щороку 10 культур).

Розрахунок загальної кількості змінних такої моделі за вищенаведеною формулою показано у таблиці 1.

1. Розрахунок загальної кількості змінних моделі за комбінаторною задачею для 10 культур та 7 полів на 10 років

Рік моделювання	Кількість змінних у даному році
0	7
1	70
2	700
3	7 000
4	70 000
5	700 000
6	7 000 000
7	70 000 000
8	700 000 000
9	7 000 000 000
10	70 000 000 000
Всього	77 777 777 777

Таким чином, навіть невелика задача перетворюється на таку, яку неможливо ні сформулювати, ні розрахувати за сучасними розрахунковими можливостями персональних комп'ютерів чи серверів. На практиці кількість полів і культур є значно більшими, що додатково ускладнює модель. Тому необхідно при формуванні орієнтованого графу моделі сівозмін на кожному полі для кожного року вводити обмеження, які доз-

волять суттєво скоротити усі можливі комбінації культур. Але спочатку визначимось із функцією мети, або критерієм оптимальності.

Функцією мети даної задачі (або критерієм оптимальності розв'язку задачі про сівозміни), як було обґрунтовано вище, пропонується визначати максимум суми чистого доходу за весь період, на який планується сівозміна:

$$\sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^n \sum_{y=1}^t \sum_{j=1}^l (U_i B_{ji} V_{ki} K_{ji} P_{iy} - C_{iy}) X_{kiyj} \rightarrow \max$$

де: U_i – розрахункова урожайність i -ої культури за найоптимальніших умов (на найкращих ґрунтах із найкращим попередником), т/га;

B_{ji} – бал оцінки земель (наприклад, бал бонітету ґрунтів) на j -ому полі по i -ій культурі, $B \in [0,0; 1,0]$;

V_{ki} – коефіцієнт впливу k -ої культури-попередника на урожайність i -ої культури-наступника, $V \in [0,0; 1,0]$;

K_{ji} – коефіцієнт можливості розміщення i -ої культури на j -ому полі з урахуванням біологічних особливостей культури, екологічного стану ґрунту, інших обмежень. Зокрема, ґрунтові відмінності та природно-сільськогосподарські умови визначають рівень придатності ґрунтів земельної ділянки для вирощування тих чи інших культур, $K \in [0,0; 1,0]$;

P_{iy} – розрахункова ціна продукції по i -ій культурі в y -ому році, грн./т;

X_{kiyj} – площа i -ої культури на j -ому полі в y -ому році після k -ого попередника, га;

k – номер культури-попередника ($k = 1, 2, \dots, m$);

i – поточний номер культури ($i = 1, 2, \dots, n$);

y – рік вирощування культури ($y = 1, 2, \dots, t$);

j – поточний номер поля ($j = 1, 2, \dots, l$).

У цій формулі площі культур (X_{kij}) є невідомими, змінними моделі, які необхідно розрахувати. Площа культури по цій змінній визначається площею поля.

Обмеження моделі складаються з наступних елементів.

1. Початкові обмеження доступної площі по кожному полю (S_j) під культурами, тобто станом на нульовий рік моделі:

$$X_{K00j} = S_j$$

де: $K0$ – початкові культури в нульовому році, які виступають попередниками для культур першого року, $K0 \in \{1, 2, \dots, m\}$;

k – попередники для культур нульового року відсутні, $k = \emptyset$;

0 – індикатор нульового року;

j – номер поля;

S_j – площа j -ого поля в нульовий рік.

2. Обмеження за загальною площею полів між культурами-попередниками і культурами-наступниками:

$$\sum_{k=K}^K \sum_{i=1}^n \sum_{y=Y}^Y \sum_{j=1}^l X_{kij} = \sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^K \sum_{y=Y-1}^{Y-1} \sum_{j=1}^l X_{kij}$$

де: K – культура-попередник, $K \in \{1, 2, \dots, m\}$;

Y – поточний рік. Відповідно ($Y - 1$) – попередній рік, $Y \in \{1, 2, \dots, t\}$.

За цим обмеженням площа кожної культури буде дорівнювати площі безпосереднього її попередника.

3. Обмеження обсягів виробництва продукції рослинництва по кожній культурі за плановими роками:

$$\sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^n \sum_{y=1}^t \sum_{j=1}^l U_i B_{ji} V_{ki} K_{ji} X_{kij} \geq W_{iy}$$

де: $U_i B_{ji} V_{ki} K_{ji} X_{kij}$ – розрахунковий обсяг виробництва продукції рослинництва по i -ій культурі в y -ому плановому році, t ;

W_{iy} – мінімальний обсяг продукції рослинництва по i -ій культурі в y -ому році, який необхідно отримати для забезпечення виробничої програми, у тонах. Наприклад, ці мінімальні вимоги можуть бути передбачені за довгостроковими контрактами, необхідними потребами у кормовиробництві для галузей тваринництва тощо.

4. Обмеження за обсягами виробничих ресурсів за роками:

$$\sum_{s=1}^r \sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^n \sum_{y=1}^t \sum_{j=1}^l A_{siyj} X_{kij} \leq R_{sy}$$

де: A_{siyj} – норма витрат s -ого виду виробничих ресурсів на j -тому полі по i -ій культурі в y -ому році у розрахунку на 1 га (грн./га, люд.-год./га, ум.га/га, кг д.р./га та ін.). Це можуть бути критично важливі види ресурсів, за якими можливі обмеження за: потужностями тракторів, машин та комбайнів, обсягами робочої сили, добрив, насіння, засобів захисту рослин, пального, електроенергії тощо. Норми витрат зазначених ресурсів орієнтовані на досягнення розрахункової урожайності U_i .

R_{sy} – максимальний обсяг s -ого виду виробничих ресурсів, які можливо використати в господарстві в y -ому році (грн., люд.-год., ум.га, кг д.р. і т.д.).

5. Обмеження невід'ємності змінних:

$$X_{kij} \geq 0$$

Це обмеження зумовлене обраним методом для розв'язання поставленої задачі – лінійне програмування, для якого змінні мають отримати невід'ємне значення.

6. Обмеження моделі за сумою площ: площа під усіма культурами кожного року повинна дорівнювати загальній площі доступних земельних ресурсів:

$$\sum_{j=1} X_{ijy} = S_{iy}$$

де: X_{ijy} – площа i -ої культури для j -ої ділянки (поля) в рік y (n – кількість ділянок);

S_{iy} – площа j -ого поля.

Отже, для формування економіко-математичної моделі сівозмін доцільно використовувати комплекс обмежень сільськогосподарського виробничого планування, включаючи фактори програмування урожайності та економічної ефективності використання виробничих ресурсів.

Виділяємо такі обмеження моделі сівозмін: дотримання обсягу загальної земельної площі; не перевищення обсягів наявних ресурсів (щодо затрат праці, грошово-матеріальних витрат, механізованих і транспортних робіт); оптимальні розміри та конфігурація полів; роки повернення (ротації) кожної культури; невід'ємність змінних; загальна кількість змінних (не більше 500 тис.).

Практичне застосування наведеної вище моделі показало, що, навіть з урахуванням обмежень задачі, метод повного лексичного перебору часто виявляється нераціональним для великої кількості культур, оскільки його розрахунок займає багато часу [6, 7, 8]. Із збільшенням кількості варіантів культур складність моделі зростає за експонентою. Враховуючи інші параметри моделі, тривалість планового періоду, кількість полів, розрахунок оптимального плану може тривати багато годин чи навіть

тижнів. Іноді рішення неможливо отримати через велику складність сформованої моделі.

Тому для оптимізації формування та розв'язку моделі пропонуємо використовувати модифікатори моделі, пов'язані з формуванням графу змінних, оскільки вони дозволять відкидати наперед відомі неправильні рішення (гілки графу). Слід обмежити кількість сільськогосподарських культур, полів, попередників, інших параметрів моделі, виходячи із спеціалізації, потреб господарства, наявних ресурсів тощо.

Пропонуємо наступні напрями модифікації та скорочення графу змінних:

1. Слід відсіювати неперспективні гілки графу для випадків, де конкретна культура є непридатною для вирощування на конкретному полі для відповідної агровиробничої групи ґрунтів. Це перше, що дозволить суттєво скоротити кількість неоптимальних напрямів пошуку рішення.

2. Слід відсіювати неперспективні гілки графу для випадків, де конкретна культура не має прийнятних попередників для даного поля в даному році планування. Це також дозволить додатково зменшити модель, відкинувши неоптимальні варіанти.

3. Слід відсіювати неперспективні гілки графу для випадків, де конкретна культура не повинна повернутися на це поле раніше, ніж через певну кількість років ротації. Це має як економічні, так і екологічні причини. Так, для озимих жита і ячменю, ячменю ярого, вівса, гречки норматив періодичності вирощування культури на одному і тому самому полі становить не менше ніж через один рік. Озима пшениця, картопля, просо мають повернутися на це поле не рані-

ше ніж через два роки. Для кукурудзи в сівозміні або на тимчасово виведеному із сівозміни полі періодичність ротації становить два-три роки поспіль. Для соняшника повернення рекомендується не раніше ніж через сім років. Аналогічно слід встановити обмеження з ротації для усіх культур, які включені до моделі [9, 10, 11].

За рахунок введення цих модифікаторів графу, жорсткість яких можна регулювати за певними коефіцієнтами, вдається отримати розмір моделі, який повно характеризує об'єкт дослідження і водночас є придатним для обчислення на сучасних комп'ютерах чи серверах.

Ще одне обмеження моделі може врахувати нормативи оптимального співвідношення культур у сівозмінах у різних природно-сільськогосподарських регіонах [12, 13, 14]. Це передбачено чинною Постановою КМУ від 11 лютого 2010 р. №164, за якою необхідно врахувати рекомендовані співвідношення культур у сівозмінах за видами культур. Наприклад, частка площі зернових і зернобобових

культур кожного року в господарстві на Поліссі слід обмежити в діапазоні від 35% до 80% [15]. Й такі обмеження добре вкладаються в нашу модель з формальної точки зору. Це додатковий важливий критерій, який допоможе забезпечити оптимізацію чергування культур та їх структуру в сівозміні.

Для пришвидшення пошуку рішення моделі додатково можна використовувати евристичні методи, які не гарантують знаходження найоптимальнішого «шляху», але такі методи дозволяють задати бажане значення й допустиме відхилення від нього, що суттєво скоротить тривалість пошуку рішення, при цьому без значного впливу на результат.

Також евристичні методи застосовуються для оптимізації уже наявних «шляхів» із можливістю пошуку оптимальнішої заміни для певних ланок, а не «шляху» в цілому, що дозволить оптимізувати його до бажаного результату, при цьому затративши значно менше часу. До таких методів можна віднести генетичний (еволю-



Рис. 4. Взаємопов'язані задачі виробничо-господарського планування у рослинництві

ційний) алгоритм, імітаційне моделювання тощо.

Слід зазначити, що проблему обґрунтування сівозмін можна і доцільно вирішувати у комплексі з іншими задачами планування, зокрема щодо економічного обґрунтування технологічних процесів у рослинництві та складання системи операційних і фінансових бюджетів підприємства (рис. 4).

Тому інформаційна система підтримки прийняття управлінських рішень щодо розміщення сільськогосподарських культур, їх чергування і планування напрямів ефективного землекористування повинна спиратись на дані облікової системи підприємства, включаючи просторові дані у динаміці: межі та площі полів і посівів, історію кожного поля щодо посівів культур, агрохімічного аналізу ґрунтів, застосованих технологій вирощування культур, фактичної урожайності кожної культури на полі, норми внесених добрив та інші дані про землекористування і його еколого-економічні параметри.

Вважаємо, що сьогодні недоцільно скласти одну систему статичних сівозмін, а необхідно формувати динамічні сівозміни, що будуть постійно забезпечувати високий економічний ефект у волатильному соціально-економічному середовищі, в якому функціонують сьогоднішні аграрні товаровиробники. Відповідно, необхідні гнучкі інструменти інтегрованих управлінських рішень для рівнів стратегічного, тактичного і оперативно-календарного планування, і система чергування культур повинна стати їх невід'ємною складовою.

Сівозміна не має бути задачею, вирішення якої відокремлене від

проблем комплексного управління виробництвом. Разом з сівозмінами необхідно планувати і враховувати велику кількість інших параметрів як ендогенних, так і екзогенних по відношенню до сільськогосподарського підприємства.

Визначення усіх аспектів чергування культур має бути імплементаційним у всіх видах виробничого і управлінського планування, обліку, контролю, аналізу, які проводяться в системах інформаційної підтримки прийняття управлінських рішень. Структура виробництва і черговість посівів, зрештою, безпосередньо впливають на економічну ефективність та грошові потоки як у короткотерміновій, так і у довготерміновій перспективах.

Таким чином, запропонована нами економіко-математична модель з її функцією мети, обмеженнями та алгоритмами спрямована не лише на визначення складу сільськогосподарських культур і порядку їх чергування у плановому періоді. Ми вважаємо, що в такій моделі необхідно комплексно вирішувати й інші аспекти виробничого планування і раціонального землекористування. Мова йде про стратегічне і тактичне планування й нормування оптимальної структури виробництва, включаючи моделювання відповідних виробничих процесів та використання виробничих ресурсів.

Представлена модель надає широкі можливості для подальшої оптимізації системи прийняття ефективних управлінських рішень в аграрній сфері та може слугувати за основу при вирішенні задач обґрунтування інвестицій і розвитку сільськогосподарського землекористування.

Висновки

У дослідженні здійснено систематизацію методичних підходів до оптимізаційного та динамічного моделювання чергування сільськогосподарських культур (сівозмін) при розробці проекту землеустрою, що забезпечують еколого-економічне обґрунтування сівозміни та впорядкування угідь.

Проблеми упорядкування структури посівних площ на сьогодні загострюються необхідністю збалансування експорту сільськогосподарської продукції в умовах частково заблокованих морських портів та інших пунктів пропуску для експорту продукції, втрачених через збройну агресію зерносховищ та елеваторів, а також доступністю продовольства для внутрішнього споживання в Україні. На структуру впливає й невизначеність аграрного бізнесу та скорочення його матеріально-технічної бази, значні коливання цін на внутрішніх і зовнішніх аграрних ринках, розподіл земель між землекористувачами.

Сівозміна не має бути задачею, вирішення якої відокремлене від проблем комплексного управління виробництвом, разом із сівозмінами необхідно планувати і враховувати велику кількість інших параметрів – як ендегенних, так і екзогенних стосовно сільськогосподарського підприємства.

Визначення усіх аспектів чергування культур має бути імплементованим у всіх видах виробничого і управлінського планування, обліку, контролю, аналізу, які проводяться в системах інформаційної підтримки прийняття управлінських рішень. Структура виробництва і черговість посівів, зреш-

тою, безпосередньо впливають на економічну ефективність та грошові потоки як у короткотерміновій, так і довготерміновій перспективі.

Таким чином, запропонована нами економіко-математична модель з її функцією мети, обмеженнями та алгоритмами спрямована не лише на визначення складу сільськогосподарських культур і порядку їх чергування у плановому періоді. Ми вважаємо, що в такій моделі необхідно комплексно вирішувати й інші аспекти виробничого планування і раціонального землекористування. Мова йде про стратегічне і тактичне планування структури виробництва, урожайності культур, економічної ефективності виробництва, а також моделювання відповідних виробничих процесів та використання виробничих ресурсів.

Частина цього дослідження виконана Ш. Ібатуллінім та О. Сакаль у проєкті "Substantiation and measures for implementation of a human rights-based integrated approach to rural development, food security and land policy in post-war rebuilding of Ukraine" (скор. «rUAr: Rebuild Rural Ukraine») фінансованому в рамках програми "Long-term program of support of the Ukrainian research teams at the Polish Academy of Sciences carried out in collaboration with the U.S. National Academy of Sciences with the financial support of external partners".

Список використаних джерел

1. Про землеустрій: Закон України. Відомості Верховної Ради України (ВВР). 2003. URL: <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/858-15>.
2. Довідник із землеустрою / за ред. Л.Я. Новаковського. – 4-те Д 58 вид., перероб. і доп. – К.: Аграр. Наука, 2015. – 492 с.

3. Барвінський А.В. Оптимізація структури посівних площ сільськогосподарських культур на регіональному рівні. *Земле-впорядний вісник*. 2013, № 5, с. 52-55.
4. Харченко О.В., Масик І.М., Міщенко Ю.Г., Давиденко Г.А. Екологічна оцінка різних сівозмін за балансом гумусу. *Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія «Агрономія і біологія»*, випуск 3 (29), 2015, с. 126-129.
5. Квасніцька Л.С. Ефективність сівозмін за різного насичення технічними культурами. *Аграрна наука та освіта в умовах євроінтеграції*. : збірник наукових праць між-нар. наук.-практ. конф. Ч.1. (20-22 березня 2018 р., м. Кам'янець-Подільський). – Тернопіль : Крок, 2018. с. 174-176.
6. U++ Cross-Platform App Development Framework. URL: <https://www.ultimatepp.org/>
7. SQL database engine. URL: <https://www.sqlite.org/>
8. LPSolve: Mixed Integer Linear Programming (MILP) solver. URL: <https://lpsolve.sourceforge.net/5.5/>
9. Ткаченко М. А. Продуктивність типових сівозмін Лісостепу залежно від інтенсивності агрохімічного навантаження / М. А. Ткаченко, Д. В. Літвінов // Наукові праці Інституту біоенергетичних культур і цукрових буряків. – 2014. – Випуск 22. – С. 100–106.
10. Габриель А.Й. Роль сівозмінного фактора в землеробстві західного Лісостепу / А.Й. Габриель, І.І. Петрунів, В.В. Сорочинський, В.С. Бульо, Ю.М. Оліфір // *Вісник Львівського державного аграрного університету: Агрономія*. – 2007. – № 11. – С. 170–177.
11. Бойко П.І., Коваленко Н.П., Дишлевський В.А., Шаповал І.С. Вплив попередників, способів основного обробітку ґрунту та добрив на забур'яненість посівів озимої пшениці. Матеріали 5-ї наук.-теор. конф. Укр. наук. тов. гербологів. Київ: Колобір, 2006. С. 201–210.
12. Про затвердження Методичних рекомендацій щодо оптимального співвідношення сільськогосподарських культур у сівозмінах різних ґрунтово-кліматичних зон України: Наказ Міністерства аграрної політики України від 18.07.2008 року № 440/71. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0440555-08#Text>
13. Про затвердження Методичних рекомендацій щодо розроблення проектів землеустрою, що забезпечують еколого-економічне обґрунтування сівозміни та впорядкування угідь: Наказ Державного агентства земельних ресурсів України від 02.10.2013 року № 396. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0396821-13#Text>.
14. Нормативи оптимального співвідношення культур у сівозмінах в різних природно-сільськогосподарських регіонах: Постанова Кабінету Міністрів України від 11.02.2010 р. №164. URL: <https://www.kmu.gov.ua/npas/243288952>.
15. Долженчук В.І., Крупко Г.Д., Глущенко М.К., Запасний В.С. Необхідність впровадження раціональної системи сівозмін для підвищення родючості ґрунтів зони Полісся. *Вісник Національного університету водного господарства та природокористування. Серія «Сільськогосподарські науки»*. Випуск 3(55). 2011. с. 39-45.

References

1. 1. Pro zemleustrii: Zakon Ukrainy. [On land management: The Law of Ukraine.] (2003). Bulletin of the Verkhovna Rada of Ukraine. Available at: <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/858-15>.
2. Novakovsky, L. (2015). Dovidnyk iz zemleustroi [Handbook on Land Management] 4th edition, revised and supplemented. Kyiv, Ahrarna Nauka, 492.
3. Barvinskyi, A. (2013). Optymizatsiia struk-

- туры посівних площ сільськогосподарських культур на регіональному рівні [Optimisation of the structure of crop areas at the regional level]. *Land Management Herald*, 5, 52-55.
4. Kharchenko, O., Masyk, I., Mishchenko, Yu., Davydenko, H. (2015). Ekologichna otsinka riznykh sortiv za balansom humusu [Environmental assessment of different crop rotations on the balance of humus]. *Bulletin of Sumy National Agrarian University, Series "Agronomy and Biology"*, 3(29), 126-129.
 5. Kvasnitska, L. (2018). Efektyvnist sivozmin za riznogo nasychennia technichnymi kulturamy [Efficiency of crop rotations with different saturation with industrial crops]. *Agrarian science and education in the european integration context: collection of scientific papers of Intern. scient.-pract. confer. P.1. (March 20-22, 2018, Kamianets-Podilskyi)*, Ternopil: Krok, 174-176.
 6. U++ Cross-Platform App Development Framework. Available at: <https://www.ultimatepp.org/>
 7. SQL database engine. Available at: <https://www.sqlite.org/>
 8. LPSolve: Mixed Integer Linear Programming (MILP) solver. Available at: <https://lpsolve.sourceforge.net/5.5/>
 9. Tkachenko, M., Lytvynov, D. (2014). Produktivnist' typovykh sivozmin Lisostepu zalezno vid intensyvnosti ahrokhimichnogo navantazhennya [Productivity of the forest-steppe typical crop rotations depending on the intensity of the agrochemical load]. *Scientific papers of the Institute of Bioenergy Crops and Sugar Beet: Collected articles*, Kyiv, 22, 100-106.
 10. Habriel, A., Petruniv, I., Sorochnyskyi, V., Bul'ko, V., Olifir, Yu. (2007). Rol' sivozminnoho faktora v zemlerobstvi zakhidnoho Lisostepu [The role of crop rotation in agriculture of the western forest-steppe]. *Bulletin of Lviv National Agrarian University: Series "Agronomy"*, 11, 170-177.
 11. Boiko, P., Kovalenko, N., Dyshevskiy, V., Shapoval, I. (2006). Vplyv poperednykiv, sposobiv osnovnoho obrobittu hruntu ta dobryv na zaburianenist posiviv ozymoi pshenytsi [Influence of predecessors, methods of basic tillage and fertilisers on weed infestation of winter wheat crops]. *Proceedings of the 5th Scientific and Theoretical Conference of the Ukrainian Scientific Society of Herbologists*. Kyiv, Kolobih, 201-210.
 12. Pro zatverdzhennia Metodichnykh rekomendatsii shchodo optimalnoho spivvidnoshennia silskohospodarskykh kultur u sivozminakh riznykh hruntovo-klimatichnykh zon Ukrainy: Nakaz Ministstva aharnoi polityky Ukrainy vid 18.07.2008 roku No. 440/71 [On Approval of Methodological Recommendations on the Optimisation of Crop Rotations of Different Soil and Climate Zones of Ukraine: Order of the Ministry of Agrarian Policy of Ukraine dated 18.07.2008 No. 440/71]. Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0440555-08#Text>
 13. Pro zatverdzhennia Metodichnykh rekomendatsii shchodo rozroblennia proektiv zemleustroi, shcho zabezpechuiut ekolohe-ekonomichne obhruntuvannia sivozminy ta vporiadkuvannia uhid: Nakaz Derzhavnogo ahentstva zemelnykh resursiv Ukrainy vid 02.10.2013 roku No. 396 [On Approval of Methodological Recommendations for Development of Land Management Projects Providing Ecological and Economic Substantiation of Crop Rotation: Order of the State Agency of Land Resources of Ukraine of 02.10.2013 No. 396]. Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0396821-13#Text>.
 14. Normatyvy optimalnoho spivvidnoshennia kultur u sivozminakh v riznykh pryrodno-silskohospodarskykh rehionakh: Postanova Kabinetu Ministriv Ukrainy vid 11.02.2010 r. No. 164 [Standards for the optimal ratio of crops in crop rotations

- in different natural and agricultural regions: Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine of 11.02.2010 No. 164]. Available at: <https://www.kmu.gov.ua/npas/243288952>.
15. Dolzhenchuk, V., Krupko, H., Hlushchenko, M., Zapasnyi, V. (2011). Neobkhidnist vprovadzhennia ratsionalnoi systemy sivozmin dlia pidvyshchennia rodiuchosti hruntiv zony Polissia [The need to introduce a rational crop rotation system to improve soil fertility in the Polissya region]. Bulletin of The National University of Water and Environmental Engineering. Series "Agricultural Sciences", 3(55), 39-45.
-

Dorosh Y., Ibatullin Sh., Dorosh O., Dorosh A., Sakal O.

METHODOLOGICAL APPROACHES TO ECONOMIC AND MATHEMATICAL MODELLING OF CROP ROTATION IN THE DEVELOPMENT OF A LAND MANAGEMENT PROJECT THAT PROVIDES ECOLOGICAL AND ECONOMIC JUSTIFICATION FOR CROP ROTATION

LAND MANAGEMENT, CADASTRE AND LAND MONITORING 1'24: 66-81.

<http://dx.doi.org/10.31548/zemleustriy2024.01.06>

Abstract. The proposed research paper systemises methodological approaches to optimisation and dynamic modelling of crop rotation in the development of land management projects that provide ecological and economic justification of crop rotation, since the crop rotation models proposed to date do not solve the task in general, but only in certain specific cases. In this regard, the need to develop full-fledged software products with a user interface integrated into existing information and accounting databases of agricultural formations is substantiated.

It is proved that economic and mathematical modelling of crop rotations should be developed by improving the methodology of dynamic crop rotations, which will allow farmers to analyse the economic efficiency of various alternative options for crop rotation under specific natural and economic conditions and constraints, as it is a promising interactive tool for substantiating management production decisions based on optimisation algorithms and analysis of large amounts of accumulated retrospective data.

The approaches, criteria and limitations of the economic and mathematical model of crop rotation in the development of land management projects that provide ecological and economic justification of crop rotation are substantiated.

The proposed economic and mathematical model with its objective function, constraints and algorithms is aimed at a comprehensive solution of issues related to production planning and rational land use. The presented model provides ample opportunities for further optimisation of the system of making effective managerial decisions in the agricultural sector and can serve as a basis for solving the problems of investment justification and development of agricultural land use.

Key words: crop rotation, land management project, economic and mathematical modelling of crop rotation, methodological approaches, dynamic modelling, software products with user interface, agricultural land use, land use, crops.