

## МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДИВЕРСИФІКАЦІЇ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ КУЛЬТУР В УКРАЇНІ: НАУКОВІ ПІДХОДИ ТА ЕМПІРИЧНІ РЕЗУЛЬТАТИ<sup>1</sup>

**Анотація.** Описано модель диверсифікації сільськогосподарських культур на основі імітаційного моделювання та робастних рішень, призначену для проєктування і розроблення оптимальної структури посівних площ для гармонійного поєднання сільськогосподарських культур з поступовим переходом на засади сталого господарювання у вітчизняному сільському господарстві. Виконано детальний аналіз сучасної практики монокультурного виробництва і на основі проведених розрахунків запропоновано його диверсифіковану структуру із 10 сільськогосподарських культур, що сприятиме посиленню внутрішньої продовольчої безпеки та гармонізації аграрного розвитку в екологічному, соціальному та економічному вимірах.

**Ключові слова:** стохастична модель оптимізації, модель диверсифікації сільськогосподарських культур, корпоративний сектор, структура посівних площ.

### ВСТУП. ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Відмітною особливістю аграрного виробництва України порівняно з європейськими країнами є його чітко виражена дуальна організаційна структура, представлена двома секторами: корпоративним (агрохолдинги, вертикально інтегровані структури, господарські товариства тощо) та індивідуальним (реальні фермери та господарства населення) [1]. За дуальністю приховується нерівноправність різних типів виробників. Привілейований статус виборов собі корпоративний сектор. Це проявляється у концентрації ним земельних ресурсів у надвеликих розмірах, а також монополізації ринків ресурсів та каналів збуту, вигідних цін, засобів державної підтримки для виробництва і сировинного експорту вузького спектру комерційних культур. У 2018 р. близько половини обсягу вітчизняного аграрного експорту становило зерно та насіння олійних, що зумовлює монокультурізацію вітчизняного сільського господарства. За нашими оцінками розподіл сільськогосподарських культур за посівними площами у підприємствах наразі не відповідає законодавчо встановленим в Україні і рекомендованим до застосування у господарській практиці нормам співвідношення культур у сівозмінах [2, 3].

В Україні понад 3.3 млн. га земель або 22 % загальної посівної площі засіває корпоративний сектор з порушенням граничних норм дотримання сівозміни. Найбільшу кількість порушень зафіксовано на підприємствах, що виробляють насіння сояшнику. Їхня чисельність в Україні становить понад 5.5 тис., тобто 69.1 % загальної кількості досліджуваних нами підприємств. При цьому загальна площа посівів насіння сояшнику у підприємствах, які порушили граничні норми, становить понад 2.1 млн. га, або майже 62 % загальної посівної площі культури у досліджуваних господарствах.

<sup>1</sup> Дослідження проведено в межах проєкту EU H2020 COACCH (776479), рамкової угоди «Ecosystems Support for COPERNICUS and EU Space Policy» GRO/COPE/18/10725, а також спільного проєкту ПАСА та національної членської організації ПАСА від України (НАН України) «Інтегроване робастне управління взаємозв'язків між галузями продовольства, енергетики, водних ресурсів, землекористування для стійкого розвитку», схваленого ПАСА та НАН України на 2017–2021 рр.

Стратегія диверсифікації сільськогосподарських культур, що ґрунтується на застосуванні економіко-математичного апарату, надає змогу розробляти робастні рішення для розв'язання проблеми монокультуризації та сприяє переходу до господарювання згідно з принципами сталого розвитку. Диверсифікація вирощування сільськогосподарських культур є екологічно безпечним і економічно обґрунтованим механізмом підвищення їхньої врожайності. Це механізм, здатний протистояти мінливим кліматичним умовам і сприяти підвищенню ефективності використання земельних ресурсів. Його суть полягає в тому, що кожна культура має готувати сприятливі умови для інших культур, поліпшуючи якісні характеристики ґрунту, посилюючи здатність культур протистояти шкідникам, хворобам та ін. Переваги диверсифікації ґрунтуються на основних засадах сталого розвитку, оскільки забезпечують досягнення економічних, соціальних та екологічних цілей сільськогосподарського виробництва.

Математичне моделювання диверсифікації сільськогосподарських культур надає змогу приймати рішення, які є стійкими до невизначеностей різного походження: економічних (волатильність цін, інфляція тощо), екологічних (несприятливі кліматичні умови, природні катаклізми), соціальних (безробіття, депопуляція, доходи селян) та ін. Застосування оптимізаційного моделювання для диверсифікації культур дасть можливість розрахувати найбільш оптимальну структуру посівних площ різних культур, що певною мірою відповідатиме потребам і засадам сталого розвитку сільського господарства, а саме таким: підвищення продуктивності рослин з урахуванням їхньої природної гармонії; підвищення здатності рослин протистояти хворобам, шкідникам та екологічним катаклізмам; зменшення використання ресурсів (пестициди, добрива та ін.); урізноманітнення виробництва безпечної продукції для населення.

#### **МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДИВЕРСИФІКАЦІЇ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ КУЛЬТУР**

Для проектування і розроблення оптимальної структури посівних площ з метою гармонійного поєднання сільськогосподарських культур, а також для здійснення поступового переходу до засад сталого господарювання у вітчизняному сільському господарстві Міжнародним інститутом прикладного і системного аналізу (IIASA) та Інститутом економіки та прогнозування НАН України була розроблена дворівнева стохастична модель оптимізації виробничої діяльності сільськогосподарських підприємств на основі диверсифікації сільськогосподарських культур. Її модельною основою скористалися вітчизняні та зарубіжні вчені для пошуку оптимальних рішень щодо гарантування продовольчої безпеки в умовах соціо-економічних ризиків [4, 5], сталого розвитку в умовах низки соціо-економічних ризиків у сільському господарстві [6] та в умовах торговельної лібералізації [7], страхування ризиків сільськогосподарських товаровиробників [8]. Один з авторів роботи розробив підхід стохастичного моделювання до пошуку робастних рішень [9] і застосував його для пошуку таких рішень у землекористуванні [10] у співпраці з групою науковців Інституту прикладного системного аналізу (IIASA) та Національної академії наук України в межах проекту «Комплексне моделювання управління безпечним використанням продовольчих, водних і енергетичних ресурсів з метою сталого соціального, економічного і екологічного розвитку». Слід згадати про глобальну модель управління біосферою (стохастичний GLOBIOM), де з використанням цього підходу знаходять робастне рішення, яке забезпечує раціональне виробництво у сільському господарстві, лісництві та біоенергетиці на основі множинних взаємозв'язків між ними.

Розроблена модель включає широкий спектр показників, що характеризують господарську діяльність корпоративного сектору в галузі сільського господарства, користування природними ресурсами, демографічні показники та ін. Дані щодо демографічної ситуації в країні, балансу та споживання основних продовольчих товарів населенням України, статистики рослинництва України 2005–2015 рр., внесення мінеральних та органічних добрив сільськогосподарськими підприємствами за 2005–2015 рр. і обсягів продажу та цін на сільськогосподарські товари на ринку отримано зі статистичних щорічників Державної служби статистики за відповідні роки. Економічні та соціальні показники взято з бази даних форми № 50-сг «Основні економічні показники роботи сільськогосподарських підприємств» за 2005–2015 рр. [11]. Решту даних отримано з доступних географічно-інформаційних систем, даних Міністерства аграрної політики України, Міністерства фінансів України та міжнародних організацій (FAO, USDA, Світовий банк, OECD).

Цільове призначення моделі — забезпечити розроблення робастних рішень під час прийняття управлінських рішень на державному і регіональному рівнях щодо підвищення ефективності використання природних ресурсів у сільському господарстві України. Модель враховує можливості агропродовольчих систем щодо забезпечення сталого розвитку сільського господарства шляхом зниження впливу на природні ресурси (наприклад, ґрунти, воду) з урахуванням кліматичних умов і мінливості погоди.

Рішення моделі представлено у просторовому вигляді у розрізі регіонів. Для визначення робастної диверсифікованої структури посівних площ у модель закладено 10 основних культур (пшениця, жито, гречка, ячмінь, кукурудза, горох, овес, соняшник, соя, ріпак), що вирощуються корпоративним сектором. Результати моделювання слугуватимуть основою розроблення оптимальних і робастних рішень для формування портфелю культур з метою мінімізації різниці між фактичною і потенційною врожайністю в регіоні. У межах моделі виконується аналіз можливостей зменшення розриву в цих урожайностях із мінімальними витратами для товаровиробників одночасним забезпеченням сталості аграрного виробництва та дотримання ресурсних обмежень і сільськогосподарських норм (наприклад, збалансованого режиму удобрення).

У розрахунках закладено ресурсні обмеження, що зумовлюють раціональне використання природних ресурсів. У виробничих витратах враховано орендні платежі, витрати на насіння, добрива, паливо-мастильні матеріали та ін. Ми допускаємо, що виробничі функції товаровиробників залежать від портфелю культур і фінансової допомоги (кредити, субсидії). За дотримання засад сталого сільськогосподарського виробництва модель надає змогу розрахувати фінансову допомогу у разі відхилення від очікуваної врожайності. Формування цієї допомоги відбувається за рахунок платежів товаровиробників до створюваного ними компенсаційного фонду, що сприяє управлінню ризиками з метою забезпечення сталого розвитку.

З урахуванням викладеного вище структура запропонованої моделі має такий вигляд. Виробництво основних сільськогосподарських культур розташоване за областями. Як  $x_{ij} \geq 0$  ми визначаємо площу, відведену під вирощування культури  $i$  у регіоні  $j$  для задоволення попиту  $d_{ij}$  на культуру  $i$ . У моделі закладено виконання трьох критеріїв: продовольче самозабезпечення, мінімізація виробничих витрат та екологічні (ресурсні) обмеження.

Формалізація моделі, що містить максимізацію функціоналу ( $I_j$ ), має такий вигляд:

$$I_j = \sum_{i=1}^n P_{ij} a_{ij}(\omega) x_{ij} - \sum_{i=1}^n C_{ij} x_{ij} - \sum_{i=1}^n q_{ij} + \sum_{i=1}^n \varphi_{ij} x_{ij} \max \{0; a_{ij}^* - a_{ij}(\omega)\} P_{ij} + \\ + \sum_{k,i} P_{kji} z_{kji}(\omega) - \sum_{k,i} P_{jki} z_{jki}(\omega), \quad (1)$$

де  $I_j$  — прибуток, отриманий в результаті вирощування сільськогосподарських культур у  $j$ -му регіоні (області),  $j = \overline{1, n}$ ;  $P_{ij} = P_{ij}(\omega)$  — ціна реалізації  $i$ -ї сільськогосподарської продукції у  $j$ -му регіоні;  $\omega$  — випадковий фактор (сценарій);  $a_{ij}^*$  — ймовірна (згідно з експертними оцінками) урожайність  $i$ -ї сільськогосподарської культури у  $j$ -му регіоні;  $a_{ij}(\omega)$  — урожайність  $i$ -ї сільськогосподарської культури у  $j$ -му регіоні у базовому році;  $x_{ij}$  — посівна площа  $i$ -ї сільськогосподарської культури у  $j$ -му регіоні;  $C_{ij}$  — витрати на виробництво  $i$ -ї сільськогосподарської продукції у  $j$ -му регіоні;  $q_{ij}$  — загальна сума платежів товаровиробників до компенсаційного фонду на виробництво  $i$ -ї сільськогосподарської продукції у  $j$ -му регіоні;  $\varphi_{ij}$  — виплати з компенсаційного фонду на виробництво  $i$ -ї сільськогосподарської продукції у  $j$ -му регіоні;  $z_{kji}(\omega)$  — обсяг сільськогосподарської продукції, імпортованої в регіон  $k$ ;  $z_{jki}(\omega)$  — обсяг сільськогосподарської продукції, експортованої з регіону  $j$ ;  $P_{kji}$  — ціна сільськогосподарської продукції, імпортованої в регіон  $k$ ;  $P_{jki}$  — ціна сільськогосподарської продукції, експортованої з регіону  $j$ .

У формулі (1) прибуток товаровиробників визначається як різниця між валовим доходом і загальними витратами. Валовий дохід складається з доходу від реалізації продукції

$$\sum_{i=1}^n P_{ij} a_{ij}(\omega) x_{ij} \quad (2)$$

та фінансової допомоги (надходжень з компенсаційного фонду)

$$\sum_{i=1}^n \varphi_{ij} x_{ij} \max \{0; a_{ij}^* - a_{ij}(\omega)\} P_{ij}. \quad (3)$$

Варто зауважити, що такі показники, як (3), визначають рівень продовольчої безпеки або ймовірність, за якої рівень виробництва  $a_{ij}(\omega)x_{ij}$  є нижчим, ніж необхідний рівень  $a_{ij}^*x_{ij}$ ; відповідно до цього, наприклад, забезпечуються норми споживання продовольства для різних груп населення.

Ймовірність випадку

$$Prob \{a_{ij}^* x_{ij} - a_{ij}(\omega) x_{ij} \geq 0\} \quad (4)$$

визначається з необхідних умов оптимізації для стохастичних задач [12–15] з використанням ресурсного обмеження, за яким площа під посів окремої культури не повинна перевищувати загальну площу в регіоні.

Витрати складаються з виробничих витрат  $\sum_{i=1}^n C_{ij} x_{ij}$  і платежів товаровиробників до компенсаційного фонду  $\sum_{i=1}^n q_{ij}$ .

Міжрегіональні торговельні операції визначаються як різниця між вартістю імпортованої продукції  $\sum_{k,i} P_{kji} z_{kji}(\omega)$ , придбаної в регіоні  $k$ , та вартістю експортованої продукції  $\sum_{k,i} P_{jki} z_{jki}(\omega)$  з регіону  $j$ . Торгівля розподіляє продовольство між виробниками і споживачами та задовольняє регіональну і національну продовольчу безпеку з урахуванням мінімізації витрат.

Припустимо, що умови диверсифікації виробництва сільськогосподарських культур забезпечуються у разі відповідної роботи компенсаційного фонду. Діяльність цього фонду залежить від наявності фінансового резерву. Стабільність роботи фонду забезпечується балансом (5), який виникає в результаті врахування платежів товаровиробників до фонду та виплаченої фінансової допомоги:

$$R = \sum_{i,j} q_{ij} - \sum_{i,j} \varphi_{ij} x_{ij} \max \{0; a_{ij}^* - a_{ij}(\omega)\} P_{ij}(\omega). \quad (5)$$

Наведена нижче умова накладає «колективний ризик» або обмеження на фінансування, суть якого полягає у тому, що вартість виплаченої товаровиробникам допомоги повинна бути меншою, ніж загальна сума внесків від товаровиробників із визначеною ймовірністю  $\gamma$ :

$$\text{Prob} \left[ \sum_{i,j} q_{ij} - \sum_{i,j} \varphi_{ij} x_{ij} \max \{0; a_{ij}^* - a_{ij}(\omega)\} P_{ij}(\omega) \geq 0 \right] \geq \gamma, \quad j = \overline{1, m}. \quad (6)$$

Умова, що регулює попит на фінансову допомогу товаровиробнику, виконується на засадах рівності згідно з надходженнями платежів до фонду:

$$\text{Prob} [\varphi_{ij} x_{ij} \max \{0; a_{ij}^* - a_{ij}(\omega)\} P_{ij}(\omega) - q_{ij} \geq 0] \leq \nu_i, \quad (7)$$

де  $\nu_i$  — деякий рівень ймовірності. Умова (7) забезпечує належний рівень фінансової підтримки.

Обмеження на продовольчу безпеку полягає в тому, щоб задовольнити певний рівень попиту  $d_{ij}$  на сільськогосподарську продукцію. Продовольче самозабезпечення у регіоні  $j$  може бути досягнуто за рахунок аграрного виробництва  $a_{ij}(\omega)x_{ij}$  культури  $i$  у регіоні  $j$  та/або міжрегіональної торгівлі  $\sum_k z_{kji}(\omega) - \sum_k z_{jki}(\omega)$ . Якщо

рівень виробництва є надто низьким або виробничі витрати є надто високими, товаровиробник отримує фінансову допомогу у вигляді компенсації. Це відбувається, наприклад, тоді, коли фактична врожайність культури  $a_{ij}(\omega)$  є нижчою, ніж очікувана або потенційна  $a_{ij}^*$ , тобто коли  $\max \{0; a_{ij}^* - a_{ij}(\omega)\} > 0$ . Отже, обмеження щодо продовольчої безпеки у моделі має такий вигляд:

$$a_{ij}(\omega)x_{ij} + \varphi_{ij} x_{ij} \max \{0; a_{ij}^* - a_{ij}(\omega)\} + \sum_k z_{kji}(\omega) - \sum_k z_{jki}(\omega) \geq d_{ij}. \quad (8)$$

Для всіх сценаріїв  $\omega$  рівень фінансової допомоги визначається за допомогою  $\varphi_{ij}$ . Загальна мета полягає у максимізації очікуваних прибутків

$$\sum_j E(I_j) \quad (9)$$

з урахуванням умов (6)–(8). Цю задачу можна переформулювати як задачу безумовної максимізації

$$\sum_j \left[ w_j E(I_j) + \alpha_j \sum_i E \min \{0; P_{ij} \varphi_{ij} x_{ij} \max \{0; a_{ij}^* - a_{ij}(\omega)\} - q_{ij} \} \right] + \lambda E \min \left\{ 0; \sum_{i,j} q_{ij} - \sum_{i,j} P_{ij} \varphi_{ij} x_{ij} \max \{0; a_{ij}^* - a_{ij}(\omega)\} \right\}, \quad (10)$$

де  $w_j$  — вагові коефіцієнти,  $\alpha_j$  — множники при ймовірних платежах товаровиробників до компенсаційного фонду,  $\lambda$  — множник при ймовірному дефіциті фонду. Множники  $\alpha_j$  та  $\lambda$  відповідають за розмір умовної фінансової допомоги з компенсаційного фонду, якщо її розмір буде перевищувати фінансовий резерв цього фонду.

Функція (10) є стохастичним вираженням скаляризованої функції, що використовується у багатокритерійному аналізі та відповідає багатокритерійній стохастичній моделі мінімізації з критеріями очікуваних прибутків, очікуваних платежів до компенсаційного фонду, очікуваного дефіциту фонду.

У моделі зроблено припущення, що для кожної території  $j \in N$  сценаріїв (спостережень)  $\omega$  з випадковою мінливістю (погодних умов):  $\omega = \omega_j^k, k = 1, \overline{N}$ . Погодні умови впливають на випадкові врожайності  $a_{ij}(\omega_j^k)$  культур  $i$  (скажімо, у несприятливі роки). Розподіл  $a_{ij}(\omega_j^k)$  отримують за допомогою поєднання фактичних історичних значень рівня врожайності з її прогнозними експертними оцінками. З використанням  $N$  сценаріїв (або історичних спостережень) функцію очікуваних платежів товаровиробників можна виразити через емпіричні сподівання:

$$\frac{1}{N} \sum_{i,k} \min \{0; P_{ij} \varphi_{ij} x_{ij} \max \{0; a_{ij}^* - a_{ij}(\omega_j^k)\} - q_{ij} \}.$$

Аналогічно через емпіричні сподівання можна виразити функцію очікуваних платежів до компенсаційного фонду:

$$\frac{1}{N} \sum_k \min \left\{ 0; \sum_{i,j} q_{ij} - \sum_{i,j} P_{ij} \varphi_{ij} x_{ij} \max \{0; a_{ij}^* - a_{ij}(\omega_j^k)\} \right\}.$$

Лінеаризація функції (10) дає формулу у скінченних сумах, придатну для комп'ютерної реалізації:

$$\sum_{j=1}^m w_j \left[ y_j + \frac{\beta_j}{N} \sum_{k=1}^N v_k^j \right] + \sum_{j=1}^m \alpha_j \left( \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N t_k^j \right) + \frac{\lambda}{N} \sum_{k=1}^N \varphi_k,$$

де  $y_j$  — оцінка очікуваного прибутку,  $\beta_j$  — вага відхилення від очікуваного прибутку,

$$v_k^j \leq \min \{0; I_j(a(\omega_k^j), x, z, q) - y_j\},$$

де  $x, y, q$  — відповідні вектори,

$$t_k^j \leq \min \{0; P_{ij} \varphi_{ij} a(\omega_k^j) - q_{ij}\},$$

$$\varphi_k \leq \min \left\{ 0; \sum_{i,j=1}^{n,m} q_{ij} - \sum_{i,j=1}^{n,m} P_{ij} \varphi_{ij} x_{ij} a_{ij}(\omega_j^k) \right\};$$

при цьому обмеження (8) зводиться до нерівності

$$a_{ij}(\omega_k^j) x_{ij} + \varphi_{ij} x_{ij} \eta_{jki} + \sum_k z_{kji}(\omega_k^j) - \sum_k z_{jki}(\omega_k^j) \geq d_{ij},$$

де  $0 \leq \eta_{jki} \leq \max \{0; a_{ij}^* - a_{ij}(\omega_j^k)\}$ ,  $j = \overline{1, m}$ ,  $i = \overline{1, n}$ ,  $k = \overline{1, N}$ .

#### РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ

Результати моделювання відображають потребу в просторовому перерозподілі видів та площ виробництва сільськогосподарських культур з урахуванням їхнього гармонійного поєднання відповідно до принципів належної сільськогосподарської практики. Отримані результати представлено просторово на обласному рівні (24 області). Посівні площі під сільськогосподарські культури і запропоновані результати моделювання наведено у додатках А та Б.

У результаті запровадження пропонованого розподілу площ посівів можна збільшити обсяг виробництва пшениці у Центральному і Західному регіонах, зокрема у Вінницькій, Житомирській, Київській, Кіровоградській, Чернігівській, Полтавській, Рівненській, Хмельницькій та Закарпатській областях.

Областями, де запропоновано суттєво збільшити посіви пшениці (понад 60 %) є Київська (на 143.8 тис. га) і Хмельницька (на 87 тис. га). На решті території країни запропоновано незначне зменшення посівів пшениці. Областями з найбільшими площами, відведеними під пшеницю, є Київська (387.9 тис. га), Вінницька (284 тис. га), Дніпропетровська (286 тис. га), Запорізька (293.5 тис. га), Одеська (316.6 тис. га), Полтавська (326.8 тис. га).

Різке збільшення посівних площ жита подекуди в 100 і 200 разів (Миколаївська, Кіровоградська, Чернівецька, Закарпатська області) пояснюється тим, що наразі цю культуру вирощують у надто малих обсягах або не вирощують взагалі. Згідно із статистичними даними у 2015 р. посівна площа жита у корпоративному секторі у Миколаївській області становила 0.2 тис. га, Кіровоградській — 0.4 тис. га, Одеській — 0.2 тис. га, Чернівецькій — 0.02 тис. га, Закарпатській — 0.02 тис. га, Тернопільській — 0.35 тис. га. Загалом запропоновано збільшити посівні площі жита по всій території України із зосередженням виробництва у Західному і Центральному регіонах.

Збільшення обсягів виробництва гречки у корпоративному секторі потребує розширення посівних площ. Площа посіву цієї культури у низці областей не перевищує 3–4 тис. га. Найменша частка посівних площ під цю культуру припадає на Чернівецьку (0.02 %), Одеську (0.04 %) і Черкаську (0.15 %) області. В результаті застосування моделі запропоновано збільшити площу посівів гречки у Чернівецькій області до 3.6 тис. га, Одеській — до 39 тис. га, Черкаській — до 30.4 тис. га, Херсонській — до 23.5 тис. га, Дніпропетровській — до 37 тис. га, Запорізькій — до 33 тис. га тощо.

У переважній більшості західних, центральних і південних областей запропоновано скоротити виробництво кукурудзи. Зокрема у Львівській, Тернопільській, Хмельницькій, Житомирській, Київській, Чернігівській та Сумській областях є можливість значного скорочення посівних площ, відведених під цю культуру. Суттєві зміни до частки кукурудзи в сівозміні таких областей, як Волинська, Вінницька, Черкаська, Дніпропетровська, не запропоновані. Проте можна суттєво збільшити посівні площі у Херсонській (87.6 тис. га), Запорізькій

(97.8 тис. га), Чернівецькій (19.8 тис. га) та інших областях Центрального і Південного регіонів.

Обсяги виробництва ячменю можна збільшити у 3–4 рази майже по всій території України. Найбільша частка у структурі посівних площ може бути відведена під цю культуру у Чернівецькій (31.3 %), Хмельницькій (32.9 %), Запорізькій (21.4 %) та Кіровоградській (20.8 %) областях. У східних і центральних областях є можливим збільшення посівних площ під ячмінь у понад п'ять разів (Чернігівська, Сумська, Полтавська області). Найбільші за розміром посівні площі можна забезпечити у Хмельницькій (206 тис. га), Полтавській (202.3 тис. га), Одеській (197.7 тис. га), Кіровоградській (190.7 тис. га) і Чернігівській (189.5 тис. га) областях.

В умовах диверсифікованого виробництва вирощування гороху поряд з іншими культурами відіграє у сівозміні важливу роль. Так, немає жодної області, де було б запропоновано зменшити виробництво гороху. Наразі посівні площі цієї культури у переважній більшості областей не перевищують 3 тис. га або 1 % у структурі виробництва сільськогосподарських культур. У західних областях, зокрема Чернівецькій і Закарпатській, останнім часом горох взагалі не вирощували. В цих областях є можливим збільшення посівних площ до 2.25 тис. га. Якщо питома вага цієї культури у структурі посіву в країні не перевищувала 1 %, то пропонується наростити її до 2–3 %, збільшуючи посівні площі у понад 5 разів у Хмельницькій, Житомирській, Київській, Чернігівській, Полтавській та інших областях. Так, у Полтавській області можна збільшити площі до 28.2 тис. га, Дніпропетровській — до 22.2 тис. га, Київській — до 25.5 тис. га, Одеській — до 23.4 тис. га, Харківській — до 22.4 тис. га.

Посівні площі під овес можна збільшити до значень від 2.3 тис. га у Волинській області до 18.8 тис. га у Полтавській області. У низці областей є можливим збільшення площ у понад 10 разів, зокрема у Вінницькій, Черкаській, Дніпропетровській, Миколаївській, Запорізькій та Чернівецькій.

Оскільки наразі вирощування соняшнику зосереджено на відкритих площах східної і центральної частин країни, запропоновано зменшити відповідні посівні площі у Центральному, Східному і Південному регіонах. Згідно з результатами моделювання слід розосередити його вирощування за областями в такий спосіб, щоб забезпечити зменшення навантаження на ґрунти Кіровоградської, Луганської, Одеської, Полтавської, Херсонської та інших областей. З огляду на те, що у Волинській та Рівненській областях соняшник майже не вирощували, тут можна збільшити посівні площі до 36 тис. га і 32 тис. га відповідно.

Є можливість скорочення посівних площ сої у Центральному, Північному і Західному регіонах та суттєвого збільшення посівних площ у Південному і Східному регіонах. Якщо частка посіву цієї культури у структурі посівних площ Донецької та Дніпропетровської областей становила 0.25 % і 0.77 %, то згідно із запропонованим розподілом частки посівів сої в цих областях можна збільшити до 1 % і 3 % відповідно. У таких областях як Миколаївська, Одеська, Дніпропетровська, Запорізька є можливим збільшення обсягу виробництва сої у понад 2–7 разів.

Що стосується насіння ріпаку, то лише у чотирьох областях (Закарпатська, Рівненська, Луганська, Донецька) є потенціал нарощування його виробництва. На решті території країни є можливим значне зменшення площ посіву цієї культури. У південних та західних областях (Одеська, Чернівецька, Івано-Франківська та ін.) запропоновано значно скоротити частку ріпаку в структурі посівних площ, а в деяких областях навіть повністю відмовитися від його вирощування. Так, усі області Центрального регіону та частина областей Західного



можуть скоротити виробництво ріпаку. Така зміна структури посівних площ під цю культуру та інші технічні культури надасть змогу створити сприятливі умови для відновлювальних процесів ґрунту.

Результатом здійсненого моделювання є зміна структури посівних площ під сільськогосподарські культури, в якій за рахунок скорочення частки товарних культур збільшується частка посіву інших, стратегічно важливих культур. Зокрема, на рівні країни є можливим зменшення посівних площ під насіння соняшнику на 4.1 %, кукурудзи — на 3.63 %, сої — на 7.79 %, ріпаку — на 3.08 %. Посівні площі під пшеницю майже не змінено. На вивільнених територіях запропоновано збільшити виробництво ячменю, жита, гороху, вівса, гречки.

Порівняння результатів моделювання і поточних даних свідчить про те, що домінування трьох культур у виробництві сільськогосподарської продукції корпоративним сектором може бути змінено за рахунок диверсифікації без суттєвих втрат.

#### **ВИСНОВКИ**

Поглиблена диверсифікація культур з відповідними сівозмінами є важливим інструментом підтримання родючості ґрунтів та підвищення продуктивності сільського господарства на засадах сталого розвитку. Вона:

1) сприяє зменшенню використання вхідних виробничих ресурсів — пестицидів, добрив, води і відповідно знижує екологічну шкоду внаслідок їхнього надмірного використання;

2) забезпечує посилення продуктивності рослин, їхню здатність протистояти захворюванням, шкідникам та екологічним катаклізмам;

3) сприяє виробництву безпечної для людини сільськогосподарської продукції і сировини.

Запропонована економіко-математична модель оптимізації враховує низку важливих у вітчизняних умовах критеріїв, зокрема таких:

— перехід до продовольчого самозабезпечення країни (особливо в частині споживання таких культур як жито, горох, гречка, овес тощо);

— гарантування можливих втрат у корпоративному секторі (шляхом фінансової підтримки товаровиробників, яка забезпечується створеним ними компенсаційним фондом);

— ресурсні обмеження (зокрема, надмірно інтенсивне використання земельних ресурсів).

Результати моделювання диверсифікації сільськогосподарських культур у корпоративному секторі засвідчують зміну структури їхніх посівних площ, а саме: за рахунок незначного зменшення посівних площ під товарні культури (кукурудза, пшениця, соняшник) збільшується виробництво ячменю, жита, гороху тощо. Диверсифікована структура посівних площ надасть змогу виробникам звести до мінімуму виробничі витрати у разі дотримання засад сталого сільськогосподарського виробництва. При цьому за рахунок уведення додаткових культур у сівозміну збереження природних ресурсів відбуватиметься в природний спосіб.

Водночас скорочення посівних площ під товарні культури може супроводжуватися незначним зменшенням валового прибутку підприємств, проте гарантуватиме беззбиткове виробництво. Цю умову закладено в оптимізаційній моделі диверсифікації сільськогосподарських культур.

## Додаток А

**Таблиця 1.** Посівні площі під сільськогосподарські культури перед моделюванням, тис. га

Регіони	Пшениця	Жито	Гречка	Кукурудза	Ячмінь	Горох	Овес	Соняшник	Соя	Ріпак
Вінницька	248846	397	3901	165403	53981	4631	1083	129899	145694	52300
Волинська	52451	4397	749	16032	7579	1427	4250	1949	38057	22486
Дніпропетровська	370651	1328	1431	93178	94875	4989	1108	348434	7379	36900
Донецька	237800	1551	2640	22516	48722	2876	2125	221444	1383	3873
Житомирська	72683	7624	3792	85744	13399	1282	7406	49222	99125	17281
Закарпатська	3957	21	202	5400	471	—	126	1184	4022	488
Запорізька	403188	400	1108	21467	85072	23787	1180	298793	13775	20553
Івано-Франківська	38542	510	1190	17377	8704	685	299	8959	14632	22112
Київська	244036	6530	5803	316094	46066	4112	7844	164737	191832	46483
Кіровоградська	211088	431	2145	197990	72353	9821	1203	310150	89317	18171
Луганська	169792	2083	1096	42676	24526	450	2800	203207	107	616
Львівська	78513	656	3231	24105	25365	870	1380	10165	30623	43596
Миколаївська	272111	227	1327	73755	124815	6202	404	259059	14926	16795
Одеська	378046	203	388	65724	204305	21947	3501	284559	6259	56321
Полтавська	227814	1868	2937	504421	35695	4736	2816	210234	156066	10551
Рівненська	49842	2488	1395	39597	12645	812	2278	2566	79396	21397
Сумська	191581	6925	11114	229849	31824	3720	6592	144058	77891	8907
Тернопільська	116097	356	5642	84753	38888	5276	1236	26402	80143	47147
Харківська	386606	3372	8361	133345	67588	20859	3470	281862	22760	7044
Херсонська	247188	949	738	13052	72922	2745	1048	148882	79202	22961
Хмельницька	151114	1219	3144	129410	46367	2068	1710	29174	207805	53577
Черкаська	172741	1611	1097	220499	35876	6157	970	144224	94252	31747
Чернівецька	24997	20	15	4683	3992	2	92	8056	44203	7065
Чернігівська	163033	17979	6587	326136	17551	3468	14468	146581	83090	12571
АР Крим	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

## Додаток Б

**Таблиця 2.** Посівні площі під сільськогосподарські культури за результатами моделюванням, тис. га

Регіони	Пшениця	Жито	Гречка	Кукурудза	Ячмінь	Горох	Овес	Соняшник	Соя	Ріпак
Вінницька	284	23.5	31.8	153.1	151.6	19.1	12.7	113.2	15.6	2.3
Волинська	36.6	19.7	5.8	16.1	22.6	3.5	2.3	36.3	3.4	3.1
Дніпропетровська	286.2	18.6	37	114.9	177	22.2	14.8	218.7	46.6	25.1
Донецька	186	21.1	17.9	114.2	29.5	10.8	7.2	99	53.3	5.8
Житомирська	103.4	36.8	18.6	36.4	28.6	10.8	7.8	100.5	7.2	7.5
Закарпатська	5.4	2.3	0.45	0	0	0.05	0.2	0	4.3	3.2
Запорізька	293.5	38.8	33	97.8	185.8	19.8	13.2	159.6	25.3	2.5
Івано-Франківська	33.7	11.5	7.1	8.8	9.1	5.1	2.4	26.6	3.4	5.1
Київська	387.9	30.1	42.5	167.4	143.4	25.5	17	181.6	35.1	3
Кіровоградська	256.9	45.2	38.4	153	190.7	17	11.4	183.2	16.8	0.9
Луганська	144.6	13.5	19.9	67	95.8	8.9	5.9	80.6	6	5.2
Львівська	77.3	21	8	0.2	41.9	4.8	3.2	49.2	9	4
Миколаївська	232.2	45.6	28.3	123.5	122.1	17	11.3	161.3	26.9	1.5
Одеська	316.6	34.7	39	183.8	197.7	23.4	15.6	143.4	44.6	23.5
Полтавська	326.8	31.4	47	318.7	202.3	28.2	18.8	161.4	20.2	2.2
Рівненська	52.6	10.3	7	28.2	43.1	4.2	2.8	32.6	4.5	27.4
Сумська	169.8	30.4	27.7	122.5	163.1	16.6	11.1	152.6	15.2	3.5
Тернопільська	112.8	16.5	15.5	36.9	65.6	9.3	6.2	109.2	33.1	0.8
Харківська	296	34.5	37.3	87.5	164.4	22.4	14.9	258.4	19.1	0.9
Херсонська	182.8	18.9	23.5	87.6	105.9	14.1	9.4	131.6	14.3	1.7
Хмельницька	238.3	17.6	22.6	52.4	206.2	13.6	9	65.3	0	1.2
Черкаська	155.9	10.3	30.4	243.8	70.7	18.2	12.2	135.9	30.3	0.7
Чернівецька	0.4	5	3.6	19.8	29.2	2.2	1.5	29.7	0	2
Чернігівська	209	20	30.7	74.8	189.5	18.4	12.3	212.3	22.3	2.3
АР Крим	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Геєць В.М., Бородіна О.М., Прокопа І.В. Українська модель аграрного розвитку та її соціо-економічна переорієнтація. Наукова доповідь. Київ: Ін-т економіки та прогнозування НАН України, 2012. 56 с.
2. Фраєр О.В. Тенденції в рослинництві та сталий розвиток сільського господарства в Україні — можливості для гармонізації. *Економіка АПК*. 2018. № 10. С. 117–125.
3. Про затвердження нормативів оптимального співвідношення культур у сівозмінах в різних природно-сільськогосподарських регіонах: Постанова Кабінету Міністрів України від 11.02.2010 № 164. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/164-2010-п>.
4. Borodina O., Borodina E., Ermolieva T., Ermoliev Yu., Fischer G., Makowski M., van Velthuisen H. Sustainable agriculture, food security, and socio-economic risks in Ukraine. In: *Managing Safety of Heterogeneous Systems*. Ermoliev Y., Makowski M., Marti K. (Eds.). Heidelberg: Springer, 2012. P. 169–185.
5. Киричук С.В., Ермольєва Т.Ю., Ермольєв Ю.М. Моделювання сталого агровиробництва в умовах зовнішніх викликів для забезпечення продовольчої безпеки. *Економіка АПК*. 2011. № 9. С. 145–151.
6. Borodina O. Food security and socioeconomic aspects of sustainable rural development in Ukraine. Interim Report IR-09-053. International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA). Laxenburg, 2009. 35 p.
7. Kyryzyuk S. Model-based risk-adjusted planning for sustainable agriculture under agricultural trade liberalization: Ukrainian case study. Interim Report IR-10-016. International Institute for Applied Systems Analysis. Laxenburg, 2010. 40 p.
8. Скрипниченко В. Стохастичні моделі оцінювання страхових ризиків. *Вісник Інституту економіки та прогнозування*. 2015. С. 60–66.
9. Ermolieva T., Havlík P., Ermoliev Y., Mosnier A., Obersteiner M., Leclère D., Khabarov N., Valin H., Reuter W. Integrated management of land use systems under systemic risks and security targets: A stochastic Global Biosphere Management Model. *Journal of Agricultural Economics*. 2016. Vol. 67, Iss. 3. P. 584–601.
10. Ermoliev Y., Hordijk L. Facets of robust decisions. In: *Coping with Uncertainty: Modeling and Policy Issue*. Marti K., Ermoliev Y., Makovskii M., Pflug G. (Eds.). Berlin; New York: Springer-Verlag, 2006. P. 3–24.
11. Основні економічні показники роботи сільськогосподарських підприємств за період 2005–2015 рр. Статистичні спостереження за формою 50-сг. Державна служба статистики України. URL: <http://ukrstat.gov.ua>.
12. Ermoliev Y., Wets R.J.-B. Numerical techniques for stochastic optimization. Berlin; Heidelberg; New York: Springer-Verlag, 1988. 571 p.
13. Ermoliev Y.M., Norikin V.I. On nonsmooth and discontinuous problems of stochastic systems optimization. *European Journal of Operational Research*. 1997. Vol. 101, Iss. 2. P. 230–244.
14. Ермольєв Ю.М. Методи стохастичного програмування. Москва: Наука, 1976. 276 с.
15. Ермольєв Ю.М., Ермольєва Т.Ю., Макдональд Г., Норкин В.И. Проблемы страхования катастрофических рисков. *Кибернетика и системный анализ*. 2001. Т. 34, № 2. С. 90–110.

Надійшла до редакції 18.07.2019

**Е.Н. Бородина, С.В. Киризюк, А.В. Фраер, Ю.М. Ермольев,  
Т.Ю. Ермольева, П.С. Кнопов, В.М. Горбачук**

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИВЕРСИФИКАЦИИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ  
КУЛЬТУР В УКРАИНЕ: НАУЧНЫЕ ПОДХОДЫ И ЭМПИРИЧЕСКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ**

**Аннотация.** Описана модель диверсификации сельскохозяйственных культур на основе имитационного моделирования и робастных решений, предназначенная для проектирования и разработки оптимальной структуры посевных площадей для гармоничного сочетания сельскохозяйственных культур с постепенным переходом на принципы устойчивого хозяйствования в отечественном сельском хозяйстве. Проведен детальный анализ современной практики монокультурного производства и на основе проведенных расчетов предложена его диверсифицированная структура из 10 сельскохозяйственных культур, что будет способствовать усилению внутренней продовольственной безопасности и гармонизации аграрного развития в экологическом, социальном и экономическом измерениях.

**Ключевые слова:** стохастическая модель оптимизации, модель диверсификации сельскохозяйственных культур, корпоративный сектор, структура посевных площадей.

**O.M. Borodina, S.V. Kyryzyuk, O.V. Fraier, Y.M. Ermoliev,  
T.Y. Ermolieva, P.S. Knopov, V.M. Gorbachuk**

**MATHEMATIC MODELLING OF AGRICULTURAL CROP DIVERSIFICATION IN UKRAINE:  
SCIENTIFIC APPROACHES AND EMPIRICAL RESULTS**

**Abstract.** The paper describes the model of agricultural crop diversification, which is based on simulation modeling and robust solutions. The model is aimed at the design and development of the optimal structure of crop areas for a harmonious combination of these crops with a gradual transition to the principles of sustainable development in domestic agriculture. A detailed analysis of monocultural production in modern practice was conducted. Performed calculations allowed suggesting diversified crop structure consisting of 10 crops ensuring food sovereignty and harmonization of agricultural development in ecological, social and economic terms.

**Keywords:** stochastic model of optimization, model of agricultural crop diversification, corporate sector, structure of sown areas.

**Бородіна Олена Миколаївна,**

чл.-кор. НАН України, доктор екон. наук, професор, завідувач відділу Державної установи «Інститут економіки та прогнозування НАН України», Київ, e-mail: olena.borodina@gmail.com.

**Киризюк Сергій Вікторович,**

кандидат екон. наук, старший науковий співробітник Державної установи «Інститут економіки та прогнозування НАН України», Київ, e-mail: kyryzyuk.ief@gmail.com.

**Фраер Олексій Володимирович,**

кандидат екон. наук, молодший науковий співробітник Державної установи «Інститут економіки та прогнозування НАН України», Київ, e-mail: oleksiyvf@gmail.com.

**Єрмольєв Юрій Михайлович,**

академік НАН України, професор, науковий співробітник Міжнародного інституту прикладного системного аналізу, Лаксенбург, Австрія, e-mail: ermoliev@iiasa.ac.at.

**Єрмольєва Тетяна Юрївна,**

кандидат фіз.-мат наук, науковий співробітник програми Міжнародного інституту прикладного системного аналізу, Лаксенбург, Австрія, e-mail: ermol@iiasa.ac.at.

**Кнопов Павло Соломонович,**

чл.-кор. НАН України, доктор фіз.-мат. наук, завідувач відділу Інституту кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН України, Київ, e-mail: Knopov1@yahoo.com.

**Горбачук Василь Михайлович,**

доктор фіз.-мат. наук, провідний науковий співробітник Інституту кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України, Київ, e-mail: GorbachukVasyl@netscape.net.