

УДК 330.4:[338.33:631.58]

О.М. Бородіна, С.В. Киризиук, О.В. Фраєр, Ю.М. Єрмольєв, Т.Ю. Єрмольєва, П. С.Кнопов, В.М.Горбачук

## **Математичне моделювання диверсифікації сільськогосподарських культур в Україні: наукові підходи та емпіричні результати**

**Анотація.** Дана стаття описує модель диверсифікації сільськогосподарських культур на основі імітаційного моделювання та робастних рішень, призначену для проектування і розроблення оптимальної структури посівних площ для гармонійного поєднання сільськогосподарських культур з поступовим переходом на засади сталого господарювання у вітчизняному сільському господарстві. Проведено детальний аналіз сучасної практики монокультурного виробництва і на основі проведених розрахунків запропоновано його диверсифіковану структуру із 10 сільськогосподарських культур, що дозволяє забезпечити продовольчий суверенітет та гармонізацію аграрного розвитку у екологічному, соціальному та економічному вимірах.

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

### **1. ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ**

Відмінною особливістю аграрного виробництва України у порівнянні з європейськими країнами є його чітко виражена дуальна організаційна структура, яка представлена двома секторами: корпоративним (агрохолдинги, вертикально інтегровані структури, господарські товариства тощо) та індивідуальним (реальні фермери та господарства населення) [1]. За дуальністю приховується нерівноправне становище різних типів виробників. Привілейоване місце виборів собі корпоративний сектор, що проявляється у концентрації ним земельних ресурсів у надвеликих розмірах, монополізації ринків ресурсів та каналів збуту; вигідних цін; засобів державної підтримки для виробництва і сировинного експорту вузького спектру комерційних культур. У 2018 році біля половини вітчизняного аграрного експорту становило зерно та насіння олійних, що обумовлює монокультуризацію 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 господарську практику нормам співвідношення культур у сівоzmінах (Постанова Кабінету Міністрів України від 11 лютого 2010 року № 164 «Про затвердження нормативів оптимального співвідношення культур у сівоzmінах в різних природно-сільськогосподарських регіонах») [2].

В Україні понад 3.3 млн га земель, або 22 % від загальної посівної площі, засівається корпоративним сектором з порушенням граничних норм дотримання сівоzmіни. Найбільше порушень спостерігається на підприємствах, що виробляють насіння соняшника, яких нараховується в Україні понад 5.5 тис, що становить 69.1 % від загальної кількості досліджуваних нами підприємств. При цьому загальна площа посівів насіння соняшника у підприємствах, які порушили граничні норми, складає понад 2.1 млн га, або майже 62 % від загальної посівної площі культури у досліджуваних господарствах.

Стратегія диверсифікації сільськогосподарських культур, що базується на застосуванні економіко-математичного апарату дозволяє розробляти робастні рішення щодо вирішення проблеми монокультуризації і сприяє переходу до сталого господарювання. Диверсифікація вирощування сільськогосподарських культур є екологічно безпечним і економічно обґрунтованим механізмом підвищення їх урожайності. Це механізм, здатний протистояти мінливим кліматичним умовам і сприяти покращенню ефективності використання земельних ресурсів. Її суть полягає в тому, щоб кожна культура готувала сприятливі умови для інших культур, покращуючи якісні характеристики ґрунту, посилюючи здатність культур протистояти шкідникам, хворобам та ін. Переваги диверсифікації базуються на основних засадах сталості, оскільки забезпечують досягнення економічних, соціальних та екологічних цілей сільськогосподарського виробництва.

Математичне моделювання диверсифікації сільськогосподарських культур дозволяє приймати рішення, які є стійкими до невизначеностей

різного роду походження: економічні (волатильність цін, інфляція тощо), екологічних (несприятливі кліматичні умови, природні катаклізми), соціальні (безробіття, депопуляція, доходи селян) та ін. Застосування оптимізаційного моделювання для диверсифікації культур дозволить розрахувати найбільш оптимальну структуру посівних площ різних культур, що в певній мірі відповідатиме потребам і засадам сталого розвитку сільського господарства, а саме: підвищення продуктивності рослин на основі їх природної гармонії; покращення спроможності рослин протистояти хворобам, шкідникам та екологічним катаклізмам; зменшення використання ресурсів (пестициди, добрива та ін.); урізноманітнення виробництва безпечної продукції для населення.

## **2. Математичне моделювання диверсифікації сільськогосподарських культур**

Для проектування і розроблення оптимальної структури посівних площ з метою гармонійного поєднання сільськогосподарських культур і для поступового переходу на засади сталого господарювання у вітчизняному сільському господарстві Міжнародним інститутом прикладного і системного аналізу (IIASA) і Інститутом економіки та прогнозування НАН України була розроблена дворівнева стохастична модель оптимізації виробничої діяльності сільськогосподарських підприємств на основі диверсифікації сільськогосподарських культур. Її модельна основа використовувалась вітчизняними і зарубіжними вченими для пошуку оптимальних рішень щодо забезпечення продовольчої безпеки в умовах соціоекономічних ризиків [3]; [4], забезпечення сталого розвитку в умовах ряду соціоекономічних ризиків у сільському господарстві [5], сталого розвитку в умовах торгової лібералізації [6], страхування ризиків сільськогосподарських товаровиробників [7]. Автор підходу стохастичного моделювання для пошуку робастних рішень Єрмольєв Ю. М. разом із групою науковців з Інституту прикладного системного аналізу (IIASA) у співпраці із Національною академією наук України в рамках проекту “Комплексне моделювання управління безпечним

використанням продовольчих, водних і енергетичних ресурсів з метою сталого соціального, економічного і екологічного розвитку” активно його використовують для пошуку робастних рішень у землекористуванні (Ermolieva et al., 2016a). Слід згадати про глобальну модель управління біосферою (стохастичний GLOBIOM), де на основі даного підходу вирішується робастне (з визначенням робастності можна ознайомитись в роботі (Ermoliev and Hordjik, 2006) раціональне виробництво у сільському господарстві, лісництві та біоенергетиці і базується на множинних взаємозв'язках між ними [8; 9].

Розроблена модель включає широкий спектр індикаторів щодо господарської діяльності корпоративного сектора в сільському господарстві, користування природними ресурсами, демографічних показників, та ін. Так, дані стосовно демографічної ситуації в країні, баланс та споживання основних продовольчих товарів населенням України, статистика рослинництва України 2005-2015 рр., внесення мінеральних та органічних добрив сільськогосподарськими підприємствами за 2005-2015 рр. і обсяги продаж та ціни на сільськогосподарські товари на рику отримані з статистичних щорічників Державної служби статистики за відповідні роки. Економічні і соціальні індикатори були взяті із бази даних форми 50-с.г. «Основні економічні показники сільськогосподарських підприємств» за 2005-2015 рр. [10]. Решта даних були отримані із доступних географічно-інформаційних систем, даних міністерства аграрної політики України, міністерства фінансів України та міжнародних організацій FAO, USDA, Світового банку, OECD.

Цільове призначення моделі полягає у тому, щоб розробити робастні рішення при прийнятті управлінських рішень на державному і регіональному рівнях щодо підвищення ефективності використання природних ресурсів у сільському господарстві України. Модель враховує можливості агропродовольчих систем забезпечувати сталий розвиток сільського

господарства через зниження впливу на природні ресурси (наприклад ґрунти, воду), які також серйозно залежать від кліматичних умов і мінливості погоди.

Модель має просторове вираження на регіональному рівні. Для визначення робастної диверсифікованої структури посівних площ, в модель закладено 10 основних культур (пшениця, жито, гречка, ячмінь, кукурудза, горох, овес, насіння соняшника, соя, ріпак), що вирощуються корпоративним сектором. Результати моделювання слугуватимуть основою для розробки оптимальних і робастних рішень щодо формування портфелю культур з метою мінімізації різниці між фактичною і потенційною урожайністю у регіоні. В моделі аналізуються можливості зменшення розриву в урожайностях із мінімальними витратами для товаровиробників, разом з тим забезпечуючи сталість аграрного виробництва, дотримуючись ресурсних обмежень та сільськогосподарських норм (наприклад, збалансоване удобрення).

В розрахунках закладені ресурсні обмеження, що обумовлюють раціональне використання природних ресурсів. Виробничі витрати враховують 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). У разі дотримання засад сталого сільськогосподарського виробництва, модель дозволяє розраховувати фінансову допомогу у разі відхилення від очікуваної урожайності. Формується дана допомога за рахунок платежів товаровиробників до створюваного ними компенсаційного фонду, що сприяє управлінню ризиками для сталого розвитку.

Беручи до уваги вищенаведене, структура запропонованої моделі виглядає наступним чином. Виробництво основних сільськогосподарських культур розташоване за областями. Під  $x_{ij} \geq 0$  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, яка містить максимізацію функціоналу ( $I_j$ ), має такий вигляд:

$$\begin{aligned}
 I_j = & \sum_{i=1}^n P_{ij} a_{ij}(\omega) x_{ij} - \sum_{i=1}^n C_{ij} x_{ij} - \sum_{i=1}^n q_{ij} + \\
 & \sum_{i=1}^n \varphi_{ij} x_{ij} \max\{0, a_{ij}^* - a_{ij}(\omega)\} P_{ij} + \\
 & \sum_{k,i} P_{kji} Z(\omega)_{kji} - \sum_{k,i} P_{jki} Z(\omega)_{jki}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 I_j = & \sum_{i=1}^n P_{ij} a_{ij}(\omega) x_{ij} - \sum_{i=1}^n C_{ij} x_{ij} - \sum_{i=1}^n q_{ij} + \\
 & \sum_{i=1}^n \varphi_{ij} x_{ij} \max\{0, a_{ij}^* - a_{ij}(\omega)\} P_{ij} + \\
 & \sum_{k,i} P_{kji} Z(\omega)_{kji} - \sum_{k,i} P_{jki} Z(\omega)_{jki},
 \end{aligned} \tag{1}$$

де  $I_j$  – прибуток, отриманий в результаті вирощування сільськогосподарських культур у  $j$ -му регіоні (області),  $j = \overline{1:n}$ ;

$P_{ij}$  – ціна реалізації  $i$ -ої сільськогосподарської продукції у  $j$ -ому регіоні;

$a_{ij}^*$  – ймовірна (згідно з експертними оцінками) урожайність  $i$ -ої сільськогосподарської культури у  $j$ -ому регіоні;

$a_{ij}(\omega)$  – урожайність  $i$ -ої сільськогосподарської культури у  $j$ -ому регіоні у базовому році;

$x_{ij}$  – посівна площа  $i$ -ої сільськогосподарської культури у  $j$ -ому регіоні;

$C_{ij}$  – витрати на виробництво  $i$ -ої сільськогосподарської продукції у  $j$ -ому регіоні;

$q_{ij}$  – платежі товаровиробників до компенсаційного фонду на виробництво  $i$ -ої сільськогосподарської продукції у  $j$ -ому регіоні;

$\varphi_{ij}$  – виплати з компенсаційного фонду на виробництво  $i$ -ої сільськогосподарської продукції у  $j$ -ому регіоні;

$Z(\omega)_{kji}$  – обсяг сільськогосподарської продукції, імпортованої в регіон  $k$ ;

$Z(\omega)_{jki}$  – обсяг 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 (надходження 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, при якій рівень виробництва  $a_{ij}(\omega)x_{ij}$  нижчий ніж необхідний рівень  $a_{ij}^*x_{ij}$ , відповідно до якого, наприклад, забезпечуються норми споживання продовольства для різних груп населення.

Необхідна ймовірність для випадку  $a_{ij}^*x_{ij} - a_{ij}(\omega)x_{ij} \geq 0$  визначена з умов оптимальності  $F_{x_{ij}}(x) = 0$  для стохастичних моделей (див. Ermoliev and Wets 1988; Ermoliev and Norkin 1997) та визначена рівнянням  $Prob\{a_{ij}^*x_{ij} - a_{ij}(\omega)x_{ij} \geq 0\} = P_{ij} / b_{ij}$  [10]. Зокрема через чистий прибуток від виробництва одиниці продукції  $i$  за місцем  $j$  або/та імпорتنі ціни на одиницю продукції  $i$  за місцем  $j$ . Для більш детального ознайомлення

щодо умов оптимальності, див. Ermoliev and Wets 1988 і зазначені літературні джерела.

Витрати складаються із 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  $\sum_{k,i} P_{kji} Z(\omega)_{kji}$ , придбаної в регіоні  $k$ , та вартістю експортованої продукції  $\sum_{k,i} P_{jki} Z(\omega)_{jki}$  з регіону  $j$ . Торгівля розподіляє продовольство між виробниками і споживачами та задовольняє регіональну і національну продовольчу безпеку із урахуванням мінімізації витрат.

В моделі введено ресурсне обмеження, згідно якого площа під посів окремої культури не повинна перевищувати загальну площу в регіоні. Обмеження має наступне математичне вираження:

$$\sum_{ij} \delta_i x_{ij} \geq b_j, \quad (4)$$

У даному випадку ми припускаємо, що умови диверсифікації виробництва сільськогосподарських культур забезпечується при відповідній роботі компенсаційного фонду. Діяльність такого фонду обумовлюється наявністю фінансового резерву. Стабільність роботи фонду базується на основі балансу (5), який виникає в результаті урахування платежів від товаровиробників до фонду та виплаченої фінансової допомоги:

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

Умова (6) накладає «колективний ризик» або обмеження на фінансування, суть якого полягає у тому, що вартість виплаченої допомоги товаровиробникам повинна бути меншою ніж загальна сума внесків від товаровиробників із визначеною ймовірністю  $\gamma$ :



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

$$j = \overline{1:m}$$

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

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

де  $P_{ij}(\omega)$  ціна на культуру  $i$  та  $q_{ij}$  загальна сума платежів товаровиробників у  $j$ -му регіоні до фонду для культури  $i$ . Рівняння (7) забезпечує належний рівень фінансової підтримки.

Обмеження на продовольчу безпеку полягає у тому, щоб задовольнити певний рівень попиту на сільськогосподарську продукцію. Продовольче самозабезпечення у регіоні  $j$  може бути досягнуто через аграрне виробництво  $a_{ij}(\omega)x_{ij}$  культури  $i$  у регіоні  $j$  та/або через міжрегіональну торгівлю  $\sum_k Z_{kji}(\omega) - \sum_k Z_{jki}(\omega)$ . Якщо рівень виробництва занадто низький або виробничі витрати занадто високі, товаровиробник отримує фінансову допомогу у вигляді компенсації. Наприклад, коли фактична урожайність культури  $a_{ij}(\omega)$  нижче очікуваної або потенційної  $a_{ij}^*$ , тобто коли  $\max\{0, a_{ij}^* - a_{ij}(\omega)\} > 0$ . Отже, обмеження на продовольчу безпеку у моделі виглядає наступним чином:

$$a_{ij}(\omega)x_{ij} + \varphi_{ij} x_{ij} \max\{0, a_{ij}^* - a_{ij}(\omega)\} + \quad (8)$$

$$\sum_k Z_{kji}(\omega) - \sum_k Z_{jki}(\omega) \geq d_{ij},$$

Для усіх сценаріїв  $\omega$  рівень фінансової допомоги визначається за допомогою  $\varphi_{ij}$ .

Загальна мета моделі полягає у максимізації очікуваних прибутків з урахуванням обмежень (4), (6), (7), (8):

$$\max \sum_j EI_j, \quad (9)$$

Проблема може бути переформульована наступним чином:

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

Так, для обмеження щодо продовольчої безпеки (8), де

$$\sum_{ij} E \min \{ 0, P_{ij} \varphi_{ij} x_{ij} \max \{ 0, a_{ij}^* - a_{ij}(\omega) \} - q_{ij} \}, \quad (11)$$

та

$$E \min \left\{ 0, \sum_{ij} q_{ij} - \sum_{ij} P_{ij} \varphi_{ij} x_{ij} \max \{ 0, a_{ij}^* - a_{ij}(\omega) \} \right\}, \quad (12)$$

визначають очікувані платежі товаровиробників та очікуваний дефіцит фонду відповідно. Функція (9) є стохастичним вираженням скаляризованої функції що використовується у мультикритеріальному аналізі. Формально, скаляризована функція (10) кореспондує до мультикритеріальної стохастичної моделі мінімізації із критеріальною функцією (10) і критеріальними функціями (11)-(12). Коефіцієнти  $\alpha_j$  та  $\lambda$  відповідають за

ціну умовної фінансової допомоги, яку фонд (інвестор) нестиме, якщо фінансовий резерв опуститься нижче прийнятного рівня.

У моделі припускається, що для кожної території  $j$  у нас є  $N$  сценаріїв (спостережень) із випадковою мінливістю  $\omega$  (погодні умови), тобто  $\omega_j^k$ ,  $k = \overline{1:N}$ , що впливає на випадкові урожайності  $a_{ij}(\omega_j^k)$  культур  $i$  (наприклад, у несприятливі роки). Розподіл  $a_{ij}(\omega_j^k)$  отримується за допомогою поєднання інформації про історичну мінливість урожайності згідно експертних оцінок. Використання  $N$  сценаріїв (або історичних спостережень), рівняння (11) та (12) можна замінити емпіричними очікуваннями:

$$\frac{1}{N} \sum_{ijk} \min \{0, P_{ij} \varphi_{ij} x_{ij} \max \{0, a_{ij}^* - a_{ij}(\omega_j^k)\} - q_{ij}\}, \quad (13)$$

та

$$\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \min \left\{ 0, \sum_{ij} q_{ij} - \sum_{ij} P_{ij} \varphi_{ij} x_{ij} \max \{0, a_{ij}^* - a_{ij}(\omega_j^k)\} \right\}, \quad (14)$$

Лінеріалізація (10)-(14) визначає наступну проблему:

$$\max \sum_{j=1}^m w_j \left[ y_j + \beta_j \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N v_k^j \right] + \sum_{j=1}^m \alpha_j \left( \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N t_k^j \right) + \lambda \left( \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \varphi_k \right), \quad (15)$$

де,

$$v_k^j \leq 0,$$

$$v_k^j \leq I_j(a(\omega_k^j), x, z, q) - y_j,$$

$$t_k^j \leq 0,$$

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

$$\varphi_k \leq 0,$$

$$\varphi_k \leq \sum_{ij=1}^{n,m} q_{ij} - \sum_{ij=1}^{n,m} P_{ij} \varphi_{ij} x_{ij} a_{ijk},$$

$$\text{gamma}_{jki} \leq \max\{0, a_{ij}^* - a(\omega_k^j)\},$$

$$\text{gamma}_{jki} \geq 0,$$

$$a_{ijk} x_{ij} + \varphi_{ij} x_{ij} \text{gamma}_{jki} + \sum_k z_{kji}(\omega) - \sum_k z_{jki}(\omega) \geq d_j$$

Для усіх сценаріїв  $k$ ,  $\omega_k \in \Omega$ ,  $j = \overline{1:m}$ ,  $i = \overline{1:n}$ , де  $i$  відповідає за культуру та  $j$ - за виробників (області).

### 3. РЕЗУЛЬТАТИ

Результати моделювання відображають необхідність просторового перерозподілу видів та площ виробництва сільськогосподарських культур з врахуванням їх гармонійного поєднання у відповідності до принципів гарної сільськогосподарської практики. Отримані результати представлено просторово на обласному рівні (24 області). Посівні площі під сільськогосподарські культури і запропоновані результати моделювання наведені у додатках А та Б. Нижче наведено візуальне відображення відношення посівних площ відповідних культур, сформованих після моделювання у порівнянні до базового 2015 року.

У результаті запровадження пропонованого розподілу площ посівів можливе збільшення виробництва пшениці у центральному і західному регіонах, зокрема у Вінницькій, Житомирській, Київській, Кіровоградській, Чернігівській, Полтавській, Рівненській, Хмельницькій та Закарпатській областях (рис.1.).

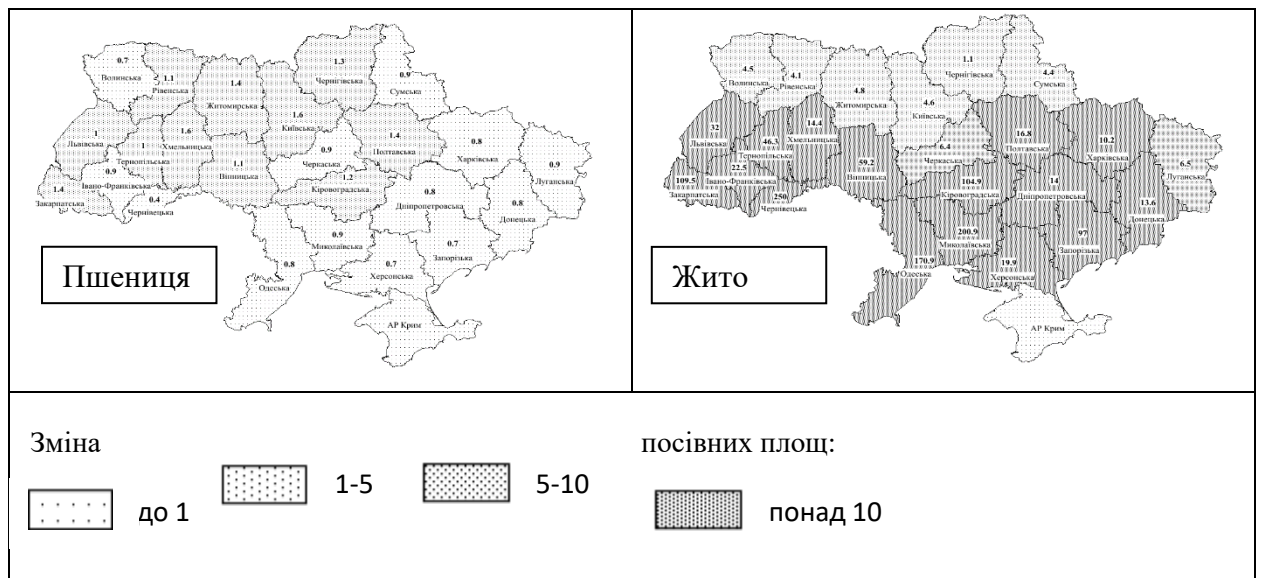


Рис. 1. Відношення площ посіву пшениці та жита після моделювання до базового року

Області, 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 пропонується незначне зменшення посівів пшениці. Областями із 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).

Різде збільшення посівних площ жита подекуди в 100 і 200 разів (Миколаївська, Кіровоградська, Чернівецька, Закарпатська області) пояснюється тим, що наразі дана культура вирощується у занадто малих обсягах або не вирощується взагалі (рис. 1). Так, згідно статистичних даних, у 2015 році 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 пропонується збільшити посівні площі жита по всій Україні, зосереджуючи виробництво у західному і центральному регіонах.

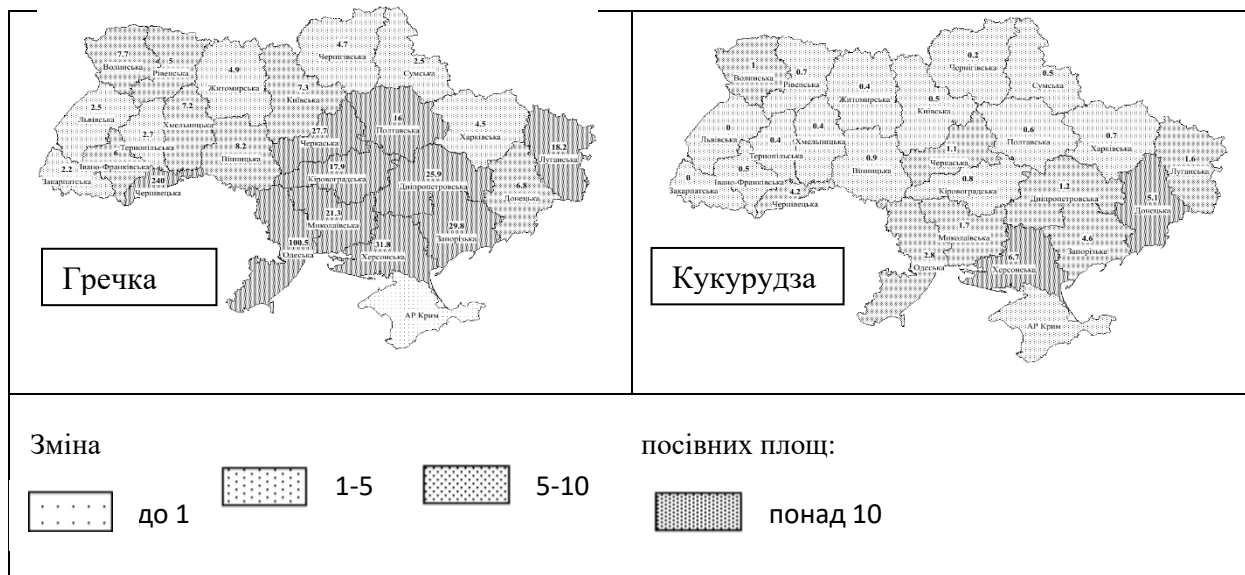


Рис. 2. Відношення площ посіву гречки та кукурудзи після моделювання до базового року

Збільшення виробництва гречки у корпоративному секторі вимагає розширення посівних площ (рис. 2). Площа посіву цієї культури у ряді областей не перевищує 3-4 тис. га. Найменша частка посівних площ під дану культуру припадає на Чернівецьку (0.02 %), Одеську (0.04 %) і Черкаську (0.15 %) області. Модель пропонує збільшити посіви гречки у Чернівецькій області до 3.6 тис. га, Одеській – 39 тис. га, Черкаській – 30.4 тис. га, Херсонській – 23.5 тис. га, Дніпропетровській – 37 тис. га, Запорізькій – 33 тис. га тощо.

В переважній більшості західних, центральних і південних областей пропонується скорочення виробництва кукурудзи (рис. 2). Зокрема у Львівській, Тернопільській, Хмельницькій, Житомирській, Київській, Чернігівській та Сумській областях можливе значне скорочення посівних площ під дану культуру. Серйозних змін до частки кукурудзи в сівозміні таких областей як: Волинська, Вінницька, Черкаська, Дніпропетровська не запропоновано. Проте, можливе серйозне збільшення посівних площ у Херсонській (87.6 тис. га), Запорізькій (97.8 тис. га), Чернівецькій (19.8 тис. га) та інших областях центрального і південного регіонів.

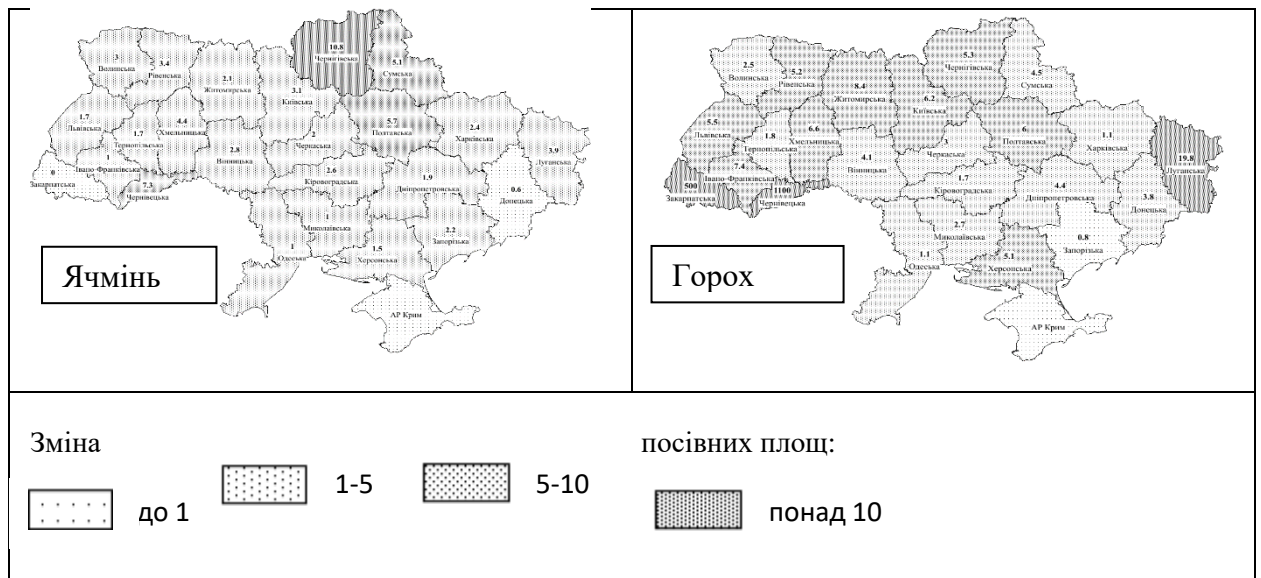


Рис. 3. Відношення площ посіву ячменю та гороху після моделювання до базового року

Виробництво ячменю може бути збільшено у 3-4 рази майже по всій території України (рис. 3). Найбільша питома вага посівних площ під дану культуру у структурі посівних площ може бути відведена у Чернівецькій (31.3 %), Хмельницькій (32.9 %), Запорізькій (21.4 %) та Кіровоградській (20.8 %) областях. У східних і центральних регіонах можливе збільшення посівних площ під ячмінь - у понад 5 разів (Чернігівська, Сумська, Полтавська області). Найбільші посівні площі за розміром можливі 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 із іншими культурами відіграє важливу роль у сівозміні (рис. 3). Так, немає жодної області, де було б запропоновано зменшити виробництво гороху. Наразі посівні площі цієї культури у переважній більшості областей не перевищує 3 тис. га або 1 % у структурі виробництва сільськогосподарських культур. У західних областях, зокрема Чернівецькій і Закарпатській останнім часом горох взагалі не вирощувався. В цих областях можливе збільшення посівних площ до 2.25 тис. га. Якщо питома вага даної культури у структурі посіву у 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 можливе збільшення площ до 28.2 тис. га, Дніпропетровській – 22.2 тис. га, Київській – 25.5 тис. га, Одеській – 23.4 тис. га, Харківській – 22.4 тис. га.

Посівні площі під овес можуть бути збільшені від 2.3 тис. га у Волинській області до 18.8 тис. га у Полтавській області (рис. 4). Так, у ряді областей можливе збільшення площ у понад 10 разів, зокрема у Вінницькій, Черкаській, Дніпропетровській, Миколаївській, Запорізькій, Чернівецькій.

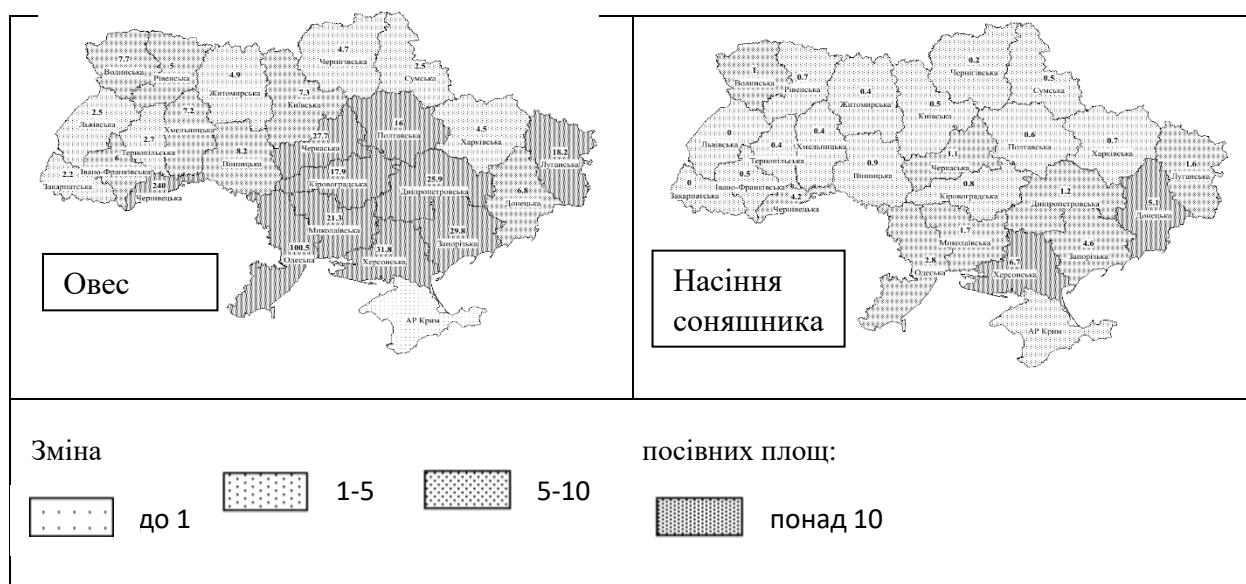


Рис. 4. Відношення площ посіву вівса та насіння соняшника після моделювання до базового року

Оскільки, наразі вирощування соняшнику сконцентровано на відкритих площах східної і центральної частини країни, пропонується зменшити посівні площі у центральному, східному і південному регіонах (рис. 4) Модель дає підстави пропонувати розосередження його вирощування за областями таким чином, щоб забезпечити зменшення навантаження на ґрунти Кіровоградської, Луганської, Одеської, Полтавської, Херсонської та інших областей. Зважаючи на те, що у Волинській та Рівненській областях соняшник майже не вирощувався, можливо збільшити тут посівні площі до 36 тис. га і 32 тис. га відповідно.

Можливе скорочення посівних площ сої у центральному, північному і західному регіонах та суттєве збільшення посіву у південному і східному



регіонах (рис. 5). Якщо частка посіву даної культури у структурі посівних площ Донецької та Дніпропетровської областей становила 0.25 % і 0.77 %, то згідно запропонованого розподілу дані посів сої у цих областях можна збільшити до 1 % і 3 % відповідно. У таких областях як Миколаївська, Одеська, Дніпропетровська, Запорізька можливе збільшення виробництва сої у понад 2-7 разів.

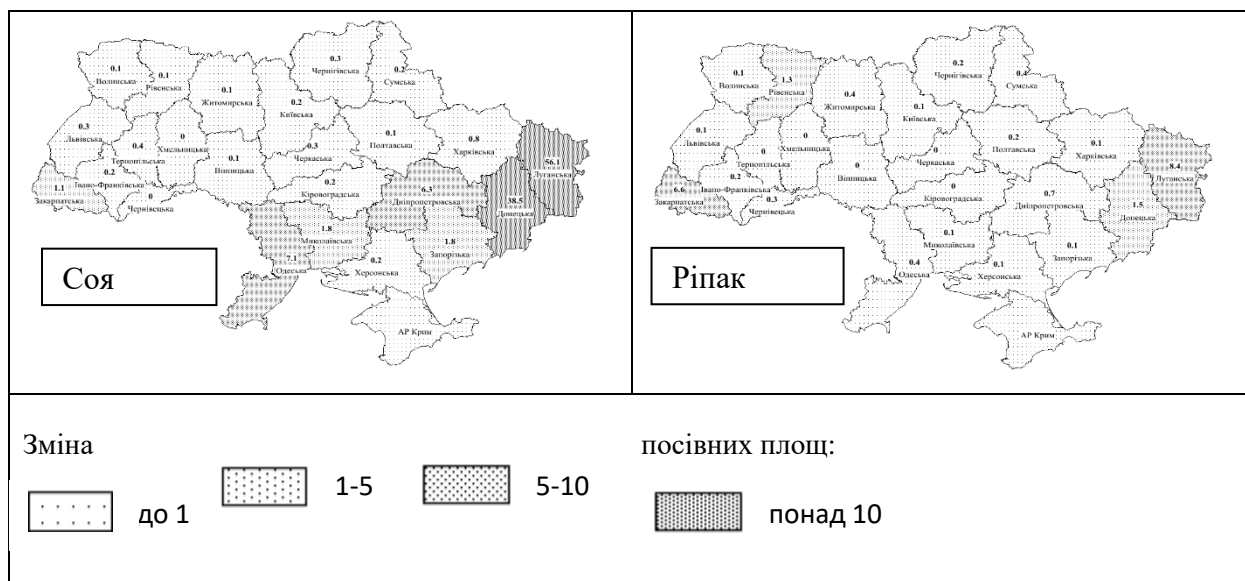


Рис. 5. Відношення площ посіву сої та ріпаку після моделювання до базового року

Що стосується насіння ріпаку, то лише у чотирьох областях (Закарпатська, Рівненська, Луганська, Донецька обл.) пропонується збільшити рівень його виробництва (рис. 5). На решті території країни можливе значне зменшення площ посіву під даною культурою. Так в південних та західних областях (Одеська, Чернівецька, Івано-Франківська та ін.) пропонується значне скорочення насіння ріпаку в структурі посівних площ, а в деяких областях навіть повністю припинити його вирощування. Так, усі області центрального регіону та частина областей західного можуть повністю скоротити виробництва ріпаку. Така зміна структури посівних площ під дану культури та інші технічні культури дозволить створити сприятливі умови для відновлювальних процесів ґрунту.

За результатами проведеного моделювання спостерігається зміна структури посівних площ під сільськогосподарські культури, в якій за рахунок скорочення частки товарних культур збільшується посів інших, стратегічно важливих культур (рис. 6). Зокрема, на рівні країни можливе зменшення посівних площ під насіння соняшника на 4.1 %, кукурудзи – 3.63 %, сої – 7.79 %, ріпаку – 3.08 %. Посівні площі під пшеницю майже не змінено. На вивільнених територіях запропоновано збільшити виробництво ячменю, жита, гороху, вівса, гречки.

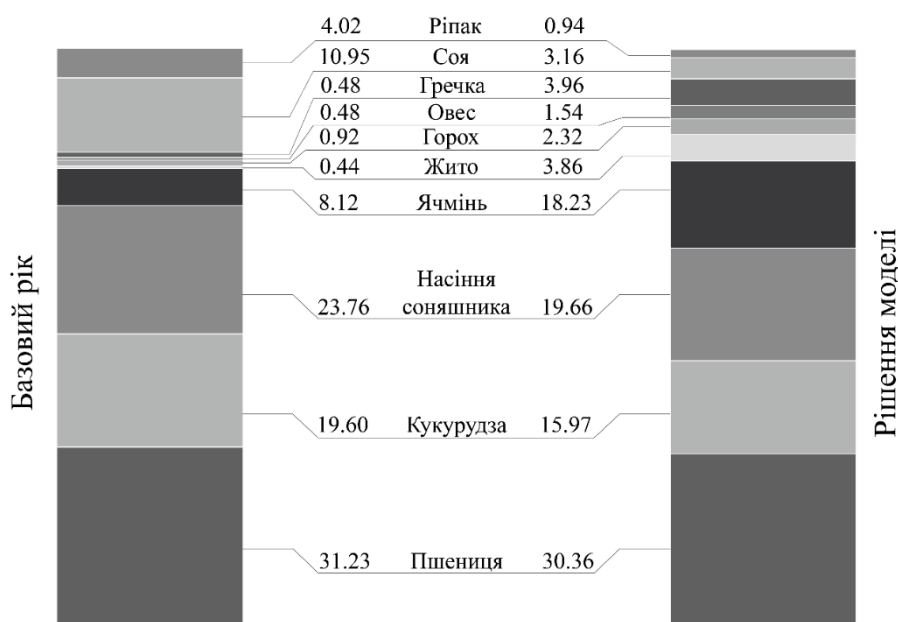


Рис. 6. Структура посівних площ сільськогосподарських культур в Україні відповідно до рішення моделі відносно базового року, %

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

#### 4. ВИСНОВКИ

Поглиблена диверсифікація культур з відповідними сівозмінами є важливим інструментом підтримки здоров'я ґрунтів та підвищення продуктивності сільського господарства на засадах сталості. Вона (І) сприяє зменшенню використання вхідних виробничих ресурсів – пестицидів,

добрив, води і, відповідно, знижує екологічну шкоду внаслідок їх надмірного використання; (II) забезпечує посилення продуктивності рослин, їх спроможність протистояти захворюванням, шкідникам та екологічним катаклізмам; (III) сприяє виробництву безпечної з точки зору фізіології людини сільськогосподарської продукції і сировини.

Запропонована економіко-математична модель оптимізації враховує ряд важливих у вітчизняних умовах критеріїв, зокрема: 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 їх структури 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 дозволить виробникам мінімізувати виробничі витрати при дотриманні засад сталого сільськогосподарського виробництва. При цьому за рахунок введення додаткових культур у сівозміну збереження природних ресурсів відбуватиметься природнім шляхом.

Разом з тим скорочення посівних площ під товарні культури може супроводжуватися незначним зменшенням валового прибутку підприємств, але гарантуватиме беззбиткове виробництво. Дана умова закладена у оптимізаційній моделі диверсифікації сільськогосподарських культур.

## ПОДЯКА

Дослідження проводяться в рамках проекту EU H2020 COACSH (776479), рамкової угоди “Ecosystems Support for COPERNICUS and EU Space

Policy” GRO/COPE/18/10725, а також наукового проекту з розробки новаторських методологій і додатків, що досліджують робастні рішення для довгострокового узгодженого планування безпечного постачання продовольства, енергії, води, який проводиться разом із Міжнародним інститутом прикладного системного аналізу (Лаксенбург, Австрія) та Національною академією наук України.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ:

1. Геєць В.М., Бородіна О.М., Прокопа І.В. Українська модель аграрного розвитку та її соціоекономічна модернізація : наукова доповідь. Київ: Ін-т екон. та прогнозув. 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. 117-126.
3. Sustainable agriculture, food security, and socio-economic risks in Ukraine / Borodina O., Borodina E., Ermolieva T., et al. Managing Safety of Heterogeneous Systems. 2012. no. 4. P. 169-185.
4. Киризиук С. В., Єрмольєва Т. Ю., Єрмольєв Ю. М. Моделювання сталого агровиробництва в умовах зовнішніх викликів для забезпечення продовольчої безпеки. Економіка АПК. 2011. Вип. 9. С. 145-151.
5. 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.
6. 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.
7. Скрипниченко В. Стохастичні моделі оцінювання страхових ризиків. Вісник Інституту економіки та прогнозування. 2015. С. 60-67.

8. Ermoliev, Y. and L. Hordijk (2006). Facets of robust decisions. In: Marti, K., Ermoliev, Y., Makovskii, M., Pflug, G. (Eds.). *Coping with Uncertainty: Modeling and Policy Issue*, Springer Verlag, Berlin, New York. P. 3-24.
9. Ermolieva T., Havlík P., Ermoliev Y., Mosnier A., Obersteiner M., Leclère D., Khabarov N., Valin, H., Reuter, W. (2016a). Integrated management of land use systems under systemic risks and security targets: a stochastic Global Biosphere Management Model. *Journal of Agricultural Economics*. no. 67(3). P. 584-601.
10. Статистичні спостереження за формю 50 - с.г. «Основні економічні показники роботи сільськогосподарських підприємств» за період 2005 – 2015 рр. Київ : Державна служба статистики України».
11. Ermoliev, Y. and Wets, R. J.-B. *Numerical Techniques for Stochastic Optimization* (Heidelberg, Germany: Springer Verlag, 1988).
12. Ермольев Ю.М. Методи стохастичного програмування. Москва: Наука, 1976. 276 с.
13. Ермольев Ю.М., Ермольева Т.Ю., Макдональд Г., Норкин В.И. Проблемы страхования катастрофических рисков. *Кибернетика и системный анализ*. 2001. №2. С. 90-110.

## Додаток А

Посівні площі під сільськогосподарські культури перед моделюванням, тис, га

	Пшениця	Жито	Гречка	Кукурудза	Ячмінь	Горох	Овес	Насіння соняшника	Соя	Насіння ріпака
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

## Додаток Б

Посівні площі під сільськогосподарські культури за результатами моделюванням, тис, га

	Пшениця	Жито	Гречка	Кукурудза	Ячмінь	Горох	Овес	Насіння соняшника	Соя	Насіння ріпака
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

**Аннотация.** Данная статья описывает модель диверсификации сельскохозяйственных культур на основе имитационного моделирования и робастных решений, предназначенную 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 предложено его диверсифицированную структуру из 10 сельскохозяйственных культур, что позволяет обеспечить продовольственный суверенитет и гармонизацию аграрного развития в экологическом, социальном и экономическом измерениях.

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



**Annotation.** 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.

Автори:

**Єрмольєв Юрій Михайлович,**

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

**Єрмольєва Тетяна Юрїївна,**

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

**Бородїна Олена Миколаївна,**

доктор економічних наук, професор, член-кореспондент НАН України, завідувач відділу економіки і політики аграрних перетворень ДУ «Інститут економіки та прогнозування НАН України», Київ, Україна, e-mail: [olena.borodina@gmail.com](mailto:olena.borodina@gmail.com)

**Киризиук Сергїй Вікторович**

кандидат економічних наук, старший науковий співробітник відділу економіки і політики аграрних перетворень ДУ «Інститут економіки та прогнозування НАН України», Київ, Україна, e-mail: [kyryzyuk.ief@gmail.com](mailto:kyryzyuk.ief@gmail.com)

**Фраєр Олексїй Володимирович,**

кандидат економічних наук, молодший науковий співробітник відділу економіки і політики аграрних перетворень ДУ «Інститут економіки та прогнозування НАН України», Київ, Україна, e-mail: [oleksiyvf@gmail.com](mailto:oleksiyvf@gmail.com)

Кнопов Павло Соломонович, доктор фізико-математичних наук, член-кореспондент НАН України, завідувач відділу математичних методів дослідження операцій Інституту кібернетики імені В.М.Глушкова НАН України, [Knopov1@Yahoo.com](mailto:Knopov1@Yahoo.com)

Горбачук Василь Михайлович - доктор фізико-математичних наук, провідний науковий співробітник Інституту кібернетики імені В.М.Глушкова НАН України, [GorbachukVasyl@netscape.net](mailto:GorbachukVasyl@netscape.net)