

УДК: [330.322:338.43]:519.8
JEL Classification: C65, C02, H54, Q01, R11

НЕЧІТКО-ТЕНЗОРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РИЗИКІВ ПРОЄКТІВ ПУБЛІЧНО-ПРИВАТНОГО ПАРТНЕРСТВА ДЛЯ СТАЛОГО СІЛЬСЬКОГО РОЗВИТКУ

ГУТОРОВ Андрій¹, ЦЕНТИЛО Костянтин²

¹ ННЦ «Інститут аграрної економіки»

<https://orcid.org/0000-0002-6881-4911>

e-mail: Gutorov.Andrew@gmail.com

² ННЦ «Інститут аграрної економіки»

<https://orcid.org/0009-0006-5603-0112>

e-mail: Tsentylo.Kostiantyn@gmail.com

Метою статті є розробка та апробація багатовимірної нечітко-тензорної моделі оцінювання і прогнозування сукупних ризиків проєктів публічно-приватного партнерства для сталого сільського розвитку на основі інтеграції природно-кліматичних, ринкових, фінансових, інституційно-правових та технологічних чинників з урахуванням їх кореляційної взаємодії, регіональної асиметрії та сценарної динаміки. У статті досліджено проблематику оцінювання та управління ризиками проєктів публічно-приватного партнерства для сталого сільського розвитку в умовах високої невизначеності, кліматичних змін, ринкової волатильності та інституційної нестабільності. Обґрунтовано обмеженість традиційних лінійних і детермінованих підходів до аналізу ризиків, які не враховують багатовимірний і кумулятивний характер взаємодії природно-кліматичних, фінансово-економічних, ринкових, інституційно-правових і технологічних чинників. Запропоновано нечітко-тензорну модель оцінювання сукупного ризикового середовища, що поєднує інструменти економіко-математичного моделювання, теорії нечітких множин і сценарного аналізу. Розроблено інтегральний індекс ризику, що дає змогу здійснювати порівняльну оцінку інвестиційної прийнятності проєктів публічно-приватного партнерства з урахуванням регіональної асиметрії, кореляційної взаємодії окремих груп ризиків та нелінійних ефектів їх сукупного впливу на фінансову результативність. Емпіричну базу дослідження сформовано на основі статистичних даних кліматичного реаналізу ERA5, показників цінної, валютної та інфляційної динаміки, а також експертних оцінок інституційного і ринкового середовища аграрної сфери України. Проведено сценарне моделювання для типових проєктів інфраструктурного, логістичного, переробного та зрошувального спрямування, що дало змогу кількісно визначити очікувані втрати ефективності та критичні зони ризику. Результати дослідження підтверджують доцільність застосування диференційованих механізмів розподілу ризиків між державним і приватним партнерами, посилення ролі страхових і гарантійних інструментів, а також інтеграції кліматоадаптаційних і фінансово-стабілізаційних заходів у контрактну архітектуру публічно-приватного партнерства сталого сільського розвитку.

Ключові слова: публічно-приватне партнерство; сталий сільський розвиток; моделювання ризиків; нечітка логіка; тензорний аналіз; інтегральний індекс ризику.

<https://doi.org/10.31891/mdes/2026-19-41>



This Is An Open Access Article Distributed Under The Terms Of The [Creative Commons CC-BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Стаття надійшла до редакції / Received 20.12.2025

Прийнята до друку / Accepted 14.01.2026

Опубліковано / Published 29.01.2026

© Гуторов Андрій, Центило Костянтин

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ У ЗАГАЛЬНОМУ ВИГЛЯДІ ТА ЇЇ ЗВ'ЯЗОК ІЗ ВАЖЛИВИМИ НАУКОВИМИ ЧИ ПРАКТИЧНИМИ ЗАВДАННЯМИ

Реалізація проєктів публічно-приватного партнерства у сфері сталого сільського розвитку характеризується підвищенням рівнем багатовимірних ризиків, що охоплюють фінансово-економічну, інституційно-правову, соціальну, екологічну, технологічну та просторово-інфраструктурну складові. Традиційні підходи до оцінювання ризиків, засновані на лінійних моделях і детермінованих показниках, не забезпечують адекватного відображення складної взаємодії між заінтересованими сторонами, зовнішнім середовищем та внутрішніми параметрами проєкту. Це зумовлює потребу у застосуванні інструментарію економіко-математичного моделювання, здатного враховувати невизначеність, нечіткість експертних оцінок та багатовекторний характер впливу ризиків на результативність публічно-приватного партнерства.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Проблематиці ризиків і механізмів функціонування публічно-приватного партнерства у сфері сталого та сільського розвитку присвячено значний обсяг наукових досліджень вітчизняних і зарубіжних учених. Теоретико-методологічні засади розвитку публічно-приватного партнерства, його інституційне середовище, правові механізми та фінансово-економічні інструменти висвітлено у працях І. Запатріної, Н. Гражевської, А. Кредісова, Л. Федулової, Т. Лозинської, О. Липинської, В. Круглова, І. Брайловського, О. Малін. Методологічні основи кількісної оцінки ризиків, сценарного аналізу та економіко-математичного моделювання розкрито у працях В. Вітлінського, О. Величка,

В. Гесця, О. Черняка, що заклали підґрунтя для застосування стохастичних, імовірнісних та багатовимірних підходів в аналізі складних соціально-економічних систем.

Серед іноземних дослідників слід відзначити праці Е. Мамдані, Л. Заде, Г. Кліра і Б. Юаня, які сформуливали теоретичні засади нечіткої логіки та її прикладного використання в задачах прийняття рішень за умов невизначеності. У працях М. Ферроні, А. Уллаха, Р. Кьолача розглядаються питання сталості публічно-приватних партнерств у контексті досягнення цілей сталого розвитку, управління екологічними та соціальними ризиками, а також адаптації проєктів до кліматичних викликів.

Результати досліджень зазначених учених формують концептуальну основу інституційного, фінансово-економічного та управлінського аналізу публічно-приватного партнерства, узагальнюють підходи до оцінювання ефективності і ризиків таких проєктів, а також вказують на важливість збалансованого розподілу відповідальності між державою і приватним сектором у реалізації програм розвитку сільських територій.

ВИДІЛЕННЯ НЕВИРІШЕНИХ РАНІШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ, КОТРИМ ПРИСВЯЧУЄТЬСЯ СТАТТЯ

Незважаючи на значний науковий доробок у сфері публічно-приватного партнерства, сталого та сільського розвитку, у наявних дослідженнях недостатньо розкрито питання формалізації багатовимірної взаємодії ризиків у довгострокових проєктах аграрної та сільсько-інфраструктурної спрямованості. Більшість наукових праць зосереджуються на якісному аналізі окремих груп ризиків або застосуванні лінійних і детермінованих моделей, що не дає змоги повною мірою врахувати кореляційні, кумулятивні та нелінійні ефекти їх взаємного впливу на фінансову результативність і інституційну стійкість проєктів. Обмеженою є також кількість досліджень, у яких застосовуються інструменти нечіткої логіки та тензорного аналізу для обробки експертних і статистичних даних у середовищі високої невизначеності, характерної для аграрної сфери в умовах воєнних і кліматичних викликів.

ФОРМУЛЮВАННЯ ЦІЛЕЙ СТАТТІ

Метою статті є розробка та апробація багатовимірної нечітко-тензорної моделі оцінювання і прогнозування сукупних ризиків проєктів публічно-приватного партнерства для сталого сільського розвитку на основі інтеграції природно-кліматичних, ринкових, фінансових, інституційно-правових та технологічних чинників з урахуванням їх кореляційної взаємодії, регіональної асиметрії та сценарної динаміки.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Ризики проєктів публічно-приватного партнерства в аграрному секторі економіки мають специфічну структуру, обумовлену біологічним циклом виробництва, сезонністю, залежністю від природно-кліматичних факторів та високою ступеню невизначеності ринкових умов.

За даними кліматичного профілю України (RCCC/IFRC) частота екстремальних погодних явищ за 1990–2010 рр. зросла у 1,5–2 рази, а періодичність посух подвоїлась у 1989–2010 рр. і поширилась на території, які раніше не вважались посушливими [1, с. 4]. За оцінкою експертів «Met Office», середньорічна температура повітря в регіоні Центрально-Східної Європи (включно з Україною) зросла майже на 1,5°C за останні 30 років, із прискоренням потепління в останнє десятиріччя [2, с. 10].

З метою формування масиву даних індикаторів для оцінювання сільськогосподарських ризиків проведено реаналіз Copernicus Climate Change Service / ECMWF, зокрема баз даних ERA5-Land Monthly Aggregated та ERA5 Hourly. Територіальну агрегацію виконано для України в цілому в середовищі Google Earth Engine шляхом просторового усереднення значень у межах національного полігона (GAUL рівня «0») за 1990–2024 рр. за допомогою спеціально розроблених скриптів на JavaScript. Температури, подані в Кельвінах, переведено в °C, а водні величини в метрах водного шару – у міліметри.

За 1990–2024 рр. показник суми активних температур вище +10 °C показав статистично виражений висхідний тренд із середнім темпом +14,47 °C днів/рік. Середні значення у 1990–1999 рр. становило 1159,0 °C днів, тоді як у 2015–2024 рр. – 1507,6 °C днів, або на 30,1 % більше. Мінімум зафіксовано у 1993 р. (979,2 °C днів), максимум – у 2024 р. (1817,3 °C днів), що вказує на істотне нарощування теплових ресурсів активної вегетації. Середня температура вегетаційного періоду (за місяці з середньодобовою температурою ≥ 5 °C) також зростала із темпом +0,062 °C/рік. Середній

рівень у 1990–1999 рр. становив 14,72 °С, а у 2015–2024 рр. – 16,26 °С. Найнижче значення спостерігалось у 1990 р. (12,67 °С), найвище – у 2024 р. (18,49 °С), що узгоджується з інтенсифікацією теплового режиму вегетації.

Стандартизацію показників водного балансу та стоку виконано відносно кліматичної норми 1991–2020 рр., відповідно до рекомендацій Всесвітньої метеорологічної організації [3]. Додатково проведено аналіз чутливості з використанням розширеного базового періоду 1991–2024 рр., що відображає сучасну «адаптовану» кліматичну норму в умовах поточного кліматичного тренду.

Динаміка проксі-індексів посухи (дефіцит вологи в ґрунті за стандартизованим кліматичним водним балансом за 6 місяців активної вегетації [4]) характеризується помірним підвищенням (менш негативні екстремуми) із темпом +0,0138 од./рік. Середнє мінімальне значення у 1990–1999 рр. становило –1,60, а у 2015–2024 рр. – (–1,26) од. Слід зазначити, що 34 із 35 років (97,1 %) досліджуваного періоду характеризувались помірною посушливістю, зокрема 10 років (28,6 %) – сильною посушливістю, 1 рік (2,9 %) – екстремальною посухою, що дає змогу формалізувати частоту подій сезонної посухи для подальшої оцінки ризиків у проєктах публічно-приватного партнерства сільського розвитку.

Середня тривалість вегетаційного періоду (з температурним порогом +5 °С) у 1990–2024 рр. була фактично стабільною. Середнє значення у 1990–1999 рр. становило 223,1 дня, у 2015–2024 рр. – 226,2 дня.

Кількість градо небезпечних днів за рік (за проксі-методикою ERA5) за досліджуваний період мала тенденцію до помірного зменшення за рахунок глобального потепління. Середній рівень у 1990–1999 рр. становив 213,6 дня, тоді як у 2015–2024 рр. – 205,8 дня. Водночас середній добовий максимум, як сезонний індикатор конвективної активності, був стабільним у часі із середнім значенням на рівні 45,51 од.

Для паводково-повеневого ризику подієвий індикатор наявності у році принаймні одного місяця з одночасним перевищенням екстремальних порогів опадів і поверхневого стоку спрацьовував у 9 роках із 35, що відповідає частоті 25,7 % на рік. При цьому у 1990–1999 рр. подія фіксувалась 4 рази з 10 (40,0 %), тоді як у 2015–2024 рр. – лише 1 раз з 10 (10,0 %).

Річна сума опадів показала слабкий низхідний тренд на рівні приблизно –2,07 мм/рік, при цьому міжрічна мінливість була суттєвою. Середній рівень опадів у 1990–1999 рр. становив 680,5 мм/рік, тоді як у 2015–2024 рр. – 625,4 мм/рік, або на 8,1 % менше. Згідно з даними вчених Інституту агроєкології і природокористування НААН, в динаміці кількості опадів і температурного режиму є обернена спрямованість, яка посилюється із Заходу на Схід, набуваючи максимального значення на території західного Лісостепу України [5, с. 30–31].

Показники інтенсивності паводкового режиму (максимальний місячний поверхневий стік, мм), аналогічно до середньорічних сум опадів, також показали виразну низхідну динаміку. Водночас ризик повеней в Україні є відносно незначним.

Дослідження вчених показують, що за сильних і тривалих посух (за підходом FAO-56, який є «золотим стандартом» для оцінки евапотранспірації й водних потреб культур [6]) потенційні втрати врожайності можуть становити 30–70 %, залежно від культури, фази вегетації, ґрунтово-кліматичної зони та наявності зрошення [4, 6, 7]. Лише за 2000–2010 рр. в Україні сталося п'ять випадків посух, від кожного з яких постраждали до 80 % площ зернових культур [13, с. 11]. Град може спричиняти 50–90 % (а інколи і 100 %) втрати врожаю на уражених ділянках, оскільки механічне пошкодження листя, стебел і генеративних органів безпосередньо знижує фотосинтетичну здатність рослин [8, 9, 10]. За умов тривалого або глибокого затоплення втрати можуть досягати 80–100 % для посівів та пов'язаних активів, особливо коли затоплення припадає на чутливі фази росту або супроводжується руйнуванням дренажних, складських і транспортних елементів сільськогосподарської інфраструктури [11, 12].

У результаті застосування інтервального підходу нами одержано очікувані середньорічні втрати врожаю сільськогосподарських культур в Україні за умов природно-кліматичних ризиків (табл. 1), які є базою для моделювання ризиків публічно-приватних проєктів сталого сільського розвитку.

Ринкові ризики проєктів публічно-приватного партнерства пов'язані з коливаннями цін на сільськогосподарську продукцію, волатильністю валютних курсів та змінами попиту на світових і внутрішніх ринках. Оскільки сільськогосподарська продукція характеризується високою еластичністю цін, то для проєктів з тривалими циклами окупності це створює значні загрози фінансової стійкості (табл. 2).

Таблиця 1

Очікувані середньорічні втрати врожаю сільськогосподарських культур в Україні за умов природно-кліматичних ризиків

Ризик	Ймовірність на рік, %		Період повторюваності, років	Очікувані втрати врожаю, %		Очікувані середньорічні втрати врожаю, %
	Мінімальна	Максимальна		Мінімальні	Максимальні	
Посуха	14,3	22,9	7,0	30,0	70,0	4,3 – 16,0
Градобиття	8,6	11,4	11,7	50,0	90,0	4,3 – 10,3
Повінь / паводок	2,9	5,7	35,0	80,0	100,0	2,3 – 5,7

Джерело: розраховано авторами за даними Google Earth Engine (ERA5).

Таблиця 2

Оцінки цінових, валютних та інфляційних ризиків для проєктів публічно-приватного партнерства в аграрній сфері України (за 1996–2024 рр.)

Група ризику	Формула розрахунку	Узагальнене інтервальне значення по продукції
Коефіцієнт варіації реальних цін реалізації сільгосппродукції	$CV_i^{real} = s(P_{i,t}^{real}) / \overline{P_{i,t}^{real}}$	0,171 – 0,464
Волатильність річних реальних змін цін реалізації сільгосппродукції	$Vol_i^{Preal} = s(\ln(P_{i,t}^{real} / P_{i,t-1}^{real}))$	0,149 – 0,321
Валютний ризик (кореляція змін цін реалізації сільгосппродукції і курсу гривні до долара США)	$\rho_i^{EX} = \text{corr}(r_{i,t}^{Pnom}, r_t^{EX})$	0,012 – 0,430
Валютна чутливість номінальних цін реалізації сільгосппродукції до змін курсу гривні до долара США	$r_{i,t}^{Pnom} = \alpha_i + \beta_i^{EX} r_t^{EX} + \varepsilon_{i,t}$	0,010 – 0,540
Інфляційний ризик (кореляція змін цін і інфляційного множника)	$\rho_i^{CPI} = \text{corr}(r_{i,t}^{Pnom}, r_t^{CPI})$	0,255 – 0,523
Інфляційна чутливість номінальних цін реалізації сільгосппродукції	$r_{i,t}^{Pnom} = \alpha_i + \beta_i^{CPI} r_t^{CPI} + \varepsilon_{i,t}$	0,566 – 1,308
Волатильність індексу споживчих цін	$Vol^{CPI} = s(\ln(\pi_t))$	0,082
Волатильність середньорічного курсу гривні до долара США	$Vol^{EX} = s(\ln(FX_t / FX_{t-1}))$	0,178

Примітки: $P_{i,t}^{nom}$ – номінальна ціна i -го виду сільгосппродукції в t -му році, грн/т (яйця – грн за 1000 шт.); $P_{i,t}^{real} = P_{i,t}^{nom} / D_t$ – реальна ціна i -го виду сільгосппродукції в t -му році, грн/т (яйця – грн за 1000 шт.); $D_{1996} = 1$; $D_t = D_{t-1} \cdot \pi_t$ – кумулятивний дефлятор (база – 1996 р.); $\pi_t = CPI_t / 100$ – річний коефіцієнт інфляції; CPI_t – індекс споживчих цін у t -му році (січень–грудень до січня–грудня попереднього року, %); $r_{i,t}^{Pnom} = \ln(P_{i,t}^{nom} / P_{i,t-1}^{nom})$, $r_{i,t}^{Preal} = \ln(P_{i,t}^{real} / P_{i,t-1}^{real})$ – річна логарифмічна зміна номінальної і реальної ціни реалізації сільгосппродукції відповідно; $r_t^{EX} = \ln(FX_t / FX_{t-1})$ – річна логарифмічна дохідність курсу гривні до долара США; $r_t^{CPI} = \ln(\pi_t)$ – річна логарифмічна зміна інфляційного мультиплікатора; $s(\cdot)$ – вибіркове стандартне відхилення; FX_t – середньорічний курс НБУ гривні до долара США (грн/дол. США); $\overline{(\cdot)}$ – середнє значення за період спостереження; i – індекс виду сільгосппродукції (насіння зернових та зернобобових культур; насіння олійних культур; овочі; плоди і ягоди; тварини сільськогосподарські живі; молоко; яйця), $i = 1, \dots, 7$; t – рік спостереження, $t = 1996, \dots, 2024$.

Джерело: розраховано автором за даними Держстату і НБУ.

Так, коефіцієнт варіації реальних цін реалізації сільськогосподарської продукції сільськогосподарськими підприємствами за 1996–2014 рр. становив 0,171–0,464, показуючи найвищу нестабільність під час збуту овочів, а найвищу стабільність – для яєць та живих тварин.

Валютний ризик за цей період оцінюється на рівні 0,012–0,430 із чутливістю реалізації сільськогосподарської продукції до змін валютного курсу долара США – 0,010–0,540. При цьому більш валютно-чутливими є експортно-орієнтовані види продукції (насамперед, насіння олійних та зернових культур), фактично не чутливі до змін курсу валюти – овочі і молоко.

Інфляційний ризик, за рівнем волатильності інфляційного множника, становить 0,082. Водночас кореляція річних логарифмічних дохідностей номінальних цін реалізації сільгосппродукції із змінами інфляційного множника коливається в межах 0,255–0,523, а інфляційна чутливість – 0,566–1,308, що показує наявність механізму трансмісії інфляційного впливу в процесі ціноутворення.

Ризик втрати доступу до ринків являє собою імовірність та очікувані економічні втрати, пов'язані з обмеженням/перериванням експорту внаслідок логістичних, регуляторних, геополітичних, торговельно-політичних, санітарно-фітосанітарних та фінансово-контрагентських чинників. Його визначають пропускну спроможність портів/коридорів, дні простою, страхові премії судноплавства, транзитні заборони; квоти, мита, антидемпінг, національні обмеження імпорту, торгові спори; відповідність стандартам ЄС чи інших країн, частота відмов на кордоні, сертифікаційні затримки; ризик неплатежів, гарантії, доступ до експортного фінансування, валютні обмеження; волатильність цін, концентрація ринків збуту, еластичність попиту на продукцію; інфраструктурні обмеження товаропотоків, особливо під час дії правового режиму воєнного стану в Україні. Так, експорт зернових культур нині характеризується високим рівнем ризику втрати доступу до ринку, що зумовлено домінуванням геополітично-логістичних та регуляторних чинників, зокрема залежністю від морських коридорів і транзитних обмежень. Для олійних культур та продуктів їх переробки ризик також є високим, однак більшу роль відіграють торговельно-політичні бар'єри та обмежена портова перевалочна спроможність України. Продукція тваринного походження характеризується середнім рівнем ризику, коли визначальними є санітарно-фітосанітарні та технічні вимоги, що обмежують доступ до окремих товарних ринків. Для продукції глибокої переробки ризик є середнім і формується переважно фінансово-контрагентськими факторами та концентрацією ринків збуту.

У зв'язку із воєнними діями і мілітарними загрозами, а також нестабільністю портової логістики Чорноморські експортні коридори характеризуються найвищим рівнем ризику. Сухопутні коридори до країн ЄС також мають високий рівень ризику, що обумовлено національними торговельними обмеженнями, квотуванням та інфраструктурними вузькими місцями на прикордонних переходах, блокуванням транспортних коридорів з боку Польщі тощо. Дунайські порти забезпечують середній рівень ризику завдяки відносній стабільності маршруту, проте залишаються обмеженими за пропускну спроможністю.

Інституційно-правові ризики проєктів публічно-приватного партнерства охоплюють зміни податкового, земельного та аграрного законодавства, якість правозастосування, захист прав інвесторів, а також політичні та воєнні чинники.

Згідно з даними «The Heritage Foundation», рівень економічної свободи в Україні протягом 2022–2025 рр. істотно погіршився. Безумовно, це пов'язано передусім із запровадженням воєнного стану, однак при цьому дуже негативну динаміку мають захищеність прав власності, ефективність судової системи, чесність і прозорість влади, сприйняття корупції, дотримання прав людини тощо. Відтак, згідно з оцінками експертів експортного кредитного агентства «Credendo» [15], у 2025 р. Україна мала найвищі бали ризиків за всіма індикаторами і групами. Такі самі оцінки надані й ОЕСР. Як зазначили у своїй аналітичній доповіді вчені Національного інституту стратегічних досліджень, рівень інвестиційної привабливості і кредитних рейтингів України в 2023–2025 рр. є низьким. При цьому міжнародні рейтингові агентства, поряд із ризиком війни, фіксують «високі ризики корупції, політичної нестабільності, недостатньої інституційної спроможності, слабкості розвитку правової системи та верховенства права» [16, с. 25]. Водночас суверенний кредитний рейтинг України агентства «Standard & Poor's», «Rating and Investment Information, Inc.», «Fitch Ratings» та «Moody's Investors Service» у 2023–2024 рр. оцінили як «клас дефолту з малою вірогідністю зростання» із негативним прогнозом [17], що істотно ускладнює реалізацію проєктів публічно-приватного партнерства не лише в довгостроковій, а й в короткостроковій перспективі.

Технологічні та операційні ризики пов'язані із застосуванням новітніх технологій, можливістю технічних відмов, недостатньою кваліфікацією персоналу та організаційними проблемами управління спільною діяльністю. У проєктах публічно-приватного партнерства це доповнюється ризиками невідповідності стандартів якості надання послуг, визначених у договорі партнерства, а також ризиками розподілу відповідальності між партнерами (угоди про рівень сервісу, ключові показники ефективності, технічне обслуговування, доступ до даних тощо [18]).

Фінансові ризики охоплюють недостатність грошових потоків для обслуговування боргових зобов'язань, ризики рефінансування, інфляційні ризики та ризики ліквідності. Для проєктів із тривалістю 15–25 років (типовою для інфраструктурної складової публічно-приватного

партнерства у сільському господарстві), ключовими є коректна структура тарифів/платежів, індексація, валютна структура фінансування та механізми державних гарантій і розподілу ризиків.

Зведена класифікація ризиків публічно-приватних проєктів сталого сільського розвитку наведена в табл. 3.

Таблиця 3

Зведена класифікація ризиків публічно-приватних проєктів сталого сільського розвитку

Категорія ризику	Субкатегорія ризику	Ймовірність, %			Максимальні збитки для проєкту, %
		Мінімальна	Базова	Максимальна	
Природно-кліматичні	Посуха	14,3	19,5	22,9	70,0
	Градобиття	8,6	10,3	11,4	90,0
	Повінь / паводок	2,9	4,6	5,7	100,0
Ринкові	Цінова волатильність	33,0	40,2	45,0	35,0
	Валютний ризик	45,0	57,0	65,0	25,0
	Втрата доступу до ринків	90,0	93,0	95,0	40,0
Інституційно-правові	Зміна податків і законодавства	40,0	49,0	55,0	20,0
	Захист прав інвесторів	40,0	52,0	60,0	50,0
	Воєнні дії	70,0	79,0	85,0	100,0
Технологічні	Технічні відмови	25,0	34,0	40,0	18,0
	Кадровий дефіцит	33,0	43,2	50,0	15,0
	Організація управління спільною діяльністю	20,0	29,0	35,0	12,0
Фінансові	Рефінансування	33,0	46,2	55,0	30,0
	Інфляція	33,0	43,2	50,0	22,0
	Ліквідність	25,0	37,0	45,0	30,0

Джерело: складено і розраховано авторами.

Базова ймовірність настання ризику визначається як зважене середнє між мінімальною та максимальною оцінками з використанням асиметричного трикутного розподілу ($P_{\text{base}} = 0,4 \cdot P_{\text{min}} + 0,6 \cdot P_{\text{max}}$), що відображає структурну схильність аграрних проєктів публічно-приватного партнерства до реалізації високих сценаріїв ризику в умовах воєнної та інституційної нестабільності.

Взаємозв'язок між різними категоріями ризиків проявляється в їхній кумулятивній дії на ключові показники ефективності проєктів. Природно-кліматичні ризики посилюють ринкові ризики через зниження пропозиції продукції, інституційно-правові ризики можуть трансформуватися в фінансові через зміну умов державної підтримки тощо.

Для кількісної оцінки цих взаємозв'язків застосовано тензорний аналіз, який дає змогу представити багатовимірний факторний простір ризиків у вигляді тензорів різного рангу й аналізувати їх взаємодію через операції тензорного добутку і згортки [19]. Матриця парних кореляцій між категоріями ризиків формується як тензор 2-го рангу $\mathbb{C}$, де кожен елемент обчислюється за формулою (1).

$$c_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^n (x_{ik} - \bar{x}_i)(x_{jk} - \bar{x}_j)}{\sqrt{\sum_{k=1}^n (x_{ik} - \bar{x}_i)^2 \sum_{k=1}^n (x_{jk} - \bar{x}_j)^2}}, \quad (1)$$

де x_{ik} – інтегральна оцінка i -го ризику в k -му періоді.

Аналіз даних виявив сильну кореляцію (0,71) між ринковими і фінансовими ризиками, що пояснюється прямим впливом цінової волатильності на грошові потоки проєктів. Середня кореляція (0,62) між природно-кліматичними і ринковими ризиками пов'язана із дефіцитом продукції після екстремальних погодних явищ, що призводить до цінових стрибків.

Вплив ризиків на показники ефективності проєктів можна змоделювати через функцію втрати ефективності $L(R)$, яка являє собою тензорну функцію від вектора ризиків $R = (r_1, r_2, \dots, r_n)$ і є змогу враховувати не лише прямий, а й нелінійний кумулятивний ефект реалізації ризиків:

$$L(R) = \sum_{i=1}^n w_i r_i + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} r_i r_j + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n w_{ijk} r_i r_j r_k, \quad (2)$$

де w_i – лінійні ваги; w_{ij} – ваги парної взаємодії; w_{ijk} – ваги трійної взаємодії ризиків.

Очікувані середньорічні збитки (EL) для кожної субкатегорії ризиків (i) можна визначити за формулою (3).

$$EL_i = P_i \times L_i, \quad (3)$$

де P_i – базова ймовірність i -го ризику; L_i – максимальні збитки для проекту за умови настання i -го ризику.

Якщо прийняти, що лінійні ваги, ваги парної і трійної взаємодії однакові і рівні одиниці, то для кожної категорії ризику (j) розраховується сумарний очікуваний збиток (за принципом незалежності подій):

$$EL_j = 1 - \prod_{i=1}^3 (1 - EL_i). \quad (4)$$

Тоді загальний очікуваний вплив усіх ризиків на проект публічно-приватного партнерства оцінюється як згортка за формулою (5).

$$EL = 1 - \prod_{j=1}^5 (1 - EL_j). \quad (5)$$

На основі агрегованих очікуваних збитків побудовано три сценарії (табл. 4). Можна стверджувати, що, за умов 2025 р., без активного управління ризиками лише 35 % проектів публічно-приватного партнерства в аграрній сфері досягнуть прийнятного рівня рентабельності, а 15 % проектів – матимуть ймовірність на рівні 97,1 % одержати критичні збитки, що призведе до їх припинення.

Таблиця 4

Сценарний аналіз впливу ризиків на проект публічно-приватного партнерства в аграрній сфері (для умов 2025 р.)

Сценарій	Ймовірність, %	Очікувані середньорічні збитки, %	Внутрішня норма дохідності, %	Рішення про проект
Оптимістичний (з управлінням ризиками)	35,0	18,2	10,1	Прийнятний
Базовий (базові ймовірності)	50,0	42,3	7,1	Прийнятний із застереженнями
Песимістичний (кореляційний шок)	15,0	97,1	0,4	Неприйнятний

Джерело: розраховано авторами.

Нечітка логіка, запропонована Л. Заде, розширює класичну двозначну логіку шляхом введення нечітких множин та функцій належності, що дає змогу працювати з лінгвістичними змінними й інтервальними оцінками. У контексті аналізу ризиків публічно-приватного партнерства її застосування є доцільним з огляду на такі чинники:

- Невизначеність вихідних даних – статистичні ряди щодо ймовірності настання багатьох ризиків у сільському господарстві є фрагментарними або мають значні часові розриви.
- Експертна природа оцінок – значна частина індикаторів формулюється у лінгвістичній формі («низька ймовірність», «значні збитки», «критичний вплив»).
- Нелінійність впливів – вплив ризиків на економічні результати проекту має пороговий і кумулятивний характер.

З метою формування і реалізації нечітко-тензорної моделі оцінювання ризиків публічно-приватного партнерства сталого сільського розвитку нами розроблено її архітектуру (рис. 1). Програмна реалізація запропонованої моделі виконана мовою Python з використанням бібліотек NumPy, Pandas та PyTorch.

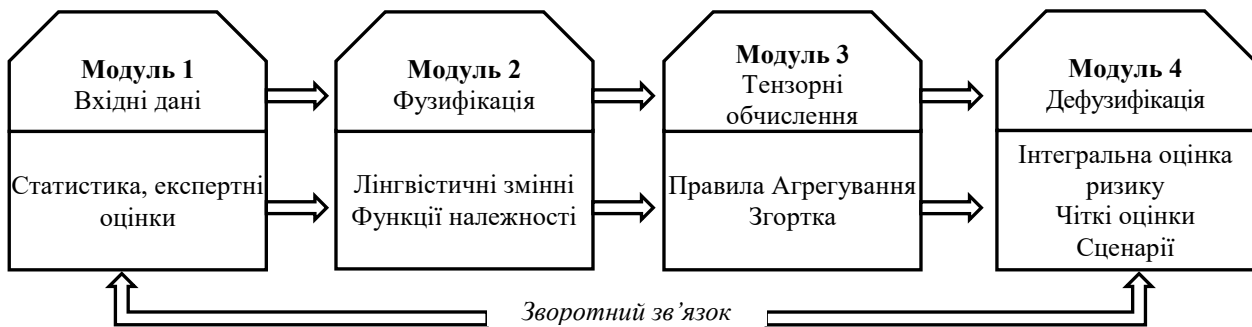


Рис. 1. Архітектура нечітко-тензорної моделі оцінювання ризиків публічно-приватного партнерства сталого сільського розвитку

Джерело: розроблено авторами.

Для формалізації експертних оцінок використано триангулярні нечіткі числа (*Triangular Fuzzy Numbers*), які подаються у вигляді $\tilde{a}_i = (a_1, a_2, a_3)$, де a_1 – песимістична оцінка рівня ризику, a_2 – найбільш імовірне значення, a_3 – оптимістична оцінка.

Основні операції над триангулярними нечіткими числами визначаються таким чином [20]:

$$\begin{aligned} (a_1, a_2, a_3) \oplus (b_1, b_2, b_3) &= (a_1 + b_1, a_2 + b_2, a_3 + b_3); \\ (a_1, a_2, a_3) \otimes (b_1, b_2, b_3) &= (a_1 b_1, a_2 b_2, a_3 b_3). \end{aligned} \quad (6)$$

Для переходу до чітких значень, які використовуються у кількісній тензорній моделі, застосовується метод центру ваги:

$$COG(\tilde{a}_i) = \frac{a_2 + a_3}{3}. \quad (7)$$

Якісна оцінка ризиків здійснюється відповідно до методики Мінекономрозвитку України [21], згідно з якою кожен виявлений ризик реалізації публічно-приватного партнерства характеризується за двома ключовими критеріями: ймовірністю настання та ступенем впливу на досягнення цілей проєкту.

Відтак інтегральна оцінка рівня i -го ризику (R_i) обчислюється як добуток відповідних класів (8).

$$R_i = P_i^{(class)} \cdot I_i^{(class)}, \quad (8)$$

де $P_i^{(class)}$ – клас ймовірності; $I_i^{(class)}$ – клас ступеня впливу.

Одержані за формулою (8) значення використовуються як вхідні параметри для фузифікації (*fuzzyfication*) та подальшого формування елементів тензора ризиків у кількісному блоці моделі.

У нашому випадку сукупність ризиків проєктів публічно-приватного партнерства сталого сільського розвитку представлено у вигляді тензора четвертого порядку:

$$\mathfrak{R} = \{r_{c,s,k,z}\}, \quad (9)$$

де: c – індекс категорії ризику; s – індекс субкатегорії ризику в межах категорії c ; k – тип параметра («1» – ймовірність, «2» – очікувані збитки, «3» – період повернення інвестицій); z – регіональна зона реалізації проєкту («Південь України», «Центр і Схід України», «Захід і Північ України»).

Кожен елемент тензора $\mathfrak{R}$ відображає кількісно дефузифіковане значення відповідного показника ризику, скориговане з урахуванням регіональних вагових коефіцієнтів.

Для врахування територіальної асиметрії ризиків введено систему зональних коефіцієнтів чутливості. Скоригована ймовірність ризику розраховується за формулою (10).

$$P_{i,z} = P_i \cdot w_{c,z}, \quad (10)$$

де $w_{c,z}$ – ваговий коефіцієнт категорії ризику c для регіональної зони z .

Для порівняльної оцінки типових проєктів публічно-приватного партнерства використано інтегральний індекс ризику (IRI), який враховує максимальний, середній та варіативний рівні ризику у межах тензорного простору S .

$$IRI = \alpha \cdot \max(S_{jk}) + \beta \cdot \text{avg}(S_{jk}) + \gamma \cdot \text{var}(S_{jk}), \quad (11)$$

де S_{jk} – елементи тензора узагальнених оцінок після згортки; α , β , γ – вагові коефіцієнти, що відображають пріоритетність екстремальних, середніх та дисперсійних характеристик ризику.

При цьому індекс інтегрального ризику є безрозмірним композитним показником інтенсивності сукупного ризикового середовища реалізації проєктів, нормований на шкалі [0;10].

Агрегування здійснюється через систему правил Мамдані [22] або за допомогою нечіткого інтеграла Чокета, що враховує взаємозалежність між індикаторами. Результат дефuzифікується методом центроїда.

На основі отриманих оцінок побудовано три сценарії розвитку подій: оптимістичний – за умови реалізації заходів з мінімізації ключових ризиків (зниження вагових коефіцієнтів на 30–40%); базовий – поточний рівень управління ризиками без додаткових заходів антикризового менеджменту; песимістичний – кумулятивна реалізація критичних ризиків з ймовірністю $> 0,7$.

Візуалізація тензорних зрізів у вигляді теплових карт показала наявність виразної регіональної асиметрії ризиків у реалізації проєктів публічно-приватного партнерства в аграрній сфері України. Так, для Півдня України характерна підвищена концентрація природно-кліматичних ризиків, що зумовлює доцільність застосування інструментів агрострахування та зрошувальної інфраструктури у межах партнерських угод. У Центрі та Сході України домінують ринкові та інституційно-правові ризики, що свідчить про високу залежність інвестиційних рішень від стабільності регуляторного та безпекового середовища. Для Західної та Північної України відносно вищими є технологічні та організаційні ризики, пов'язані з кадровим потенціалом і якістю управління спільною діяльністю, а також ризики паводків і підтоплень територій.

Для моделювання впливу ризиків на ефективність проєктів публічно-приватного партнерства сталого сільського розвитку використано дані проєктних пропозицій: «Зерновий термінал» – будівництво річкового зернового терміналу для перевалки зерна на території територіальної громади м. Вознесенська Миколаївської області; «Переробка» – будівництво Astarta Holding N.V. заводу з переробки олійних культур, зокрема сої та ріпаку, у Хмельницькій області; «Зрошення» – реконструкція Білгород-Дністровської зрошувальної системи (Одеська область); створення логістичного парку у Львівській, Київській і Харківській областях.

Результати моделювання свідчать, що за оптимістичного сценарію для всіх типів проєктів спостерігається зниження значень інтегрального індексу ризику (рис. 2). Найвищі ризики характерні для проєктів зрошення через екологічну невизначеність та дефіцит водних ресурсів, тоді як переробні підприємства мають ліпші показники управління ризиками завдяки можливості диверсифікації сировинних потоків.

Логістичні й інфраструктурні проєкти показали вищу чутливість до сценарних змін, що підтверджує доцільність застосування диференційованих механізмів розподілу ризиків між державним та приватним партнерами, залежно від типу проєкту публічно-приватного партнерства.

До того ж інвестиції в управління ризиками (2–4 % загального обсягу капіталовкладень) дають змогу знизити інтегральний індекс ризику на 15–30 процентних пунктів, що особливо важливо для прийнятності проєктів у воєнний час.

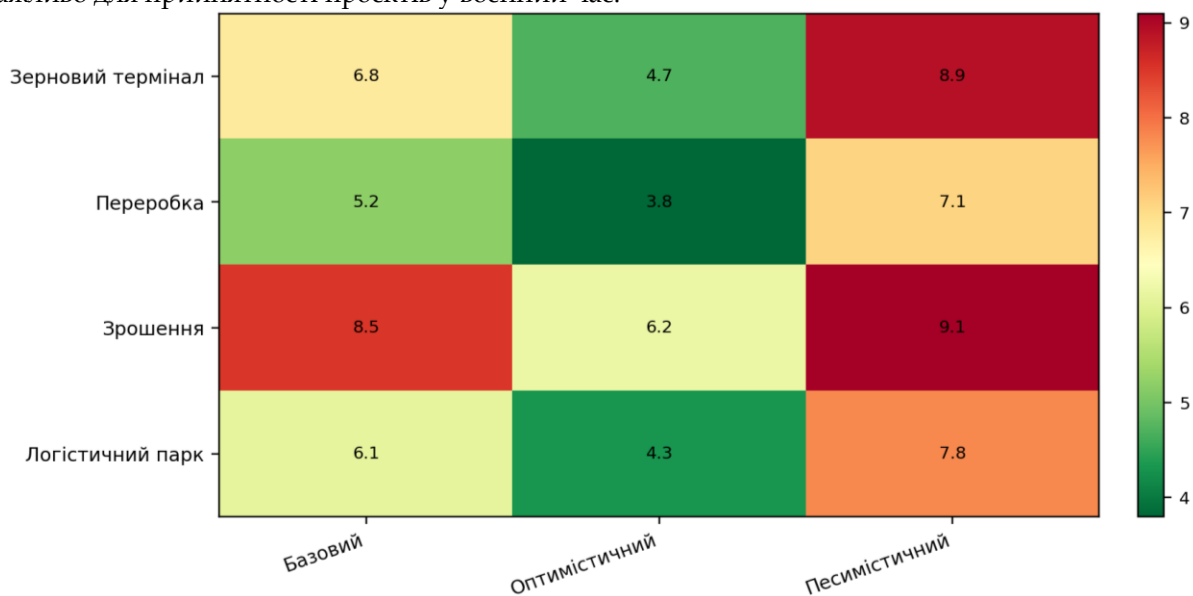


Рис. 2. Інтегральний індекс ризику за окремими проєктами публічно-приватного-партнерства в аграрній сфері та різними сценаріями розвитку подій

Джерело: розраховано авторами.

Інтегральний річний індекс ризику (IRI_t) портфеля проєктів публічно-приватного-партнерства обчислюється як зважене математичне сподівання сценарно-залежних значень IRI за всіма проєктами:

$$IRI_t = \sum_{i=1}^N w_i \sum_{s=1}^S p_s \cdot IRI_{i,s,t}, \quad (12)$$

де $IRI_{i,s,t}$ – індекс ризику i -ї групи за сценарієм s у періоді t ; w_i – ваговий коефіцієнт економічної значущості i -го проєкту; p_s – імовірність реалізації сценарію; i – індекс груп ризиків; s – індекс сценаріїв.

Прогнозні оцінки індексу інтегрального ризику свідчать про нелінійну траєкторію зміни сукупного ризикового середовища реалізації проєктів сталого сільського розвитку в Україні у 2023–2035 рр. (рис. 3).

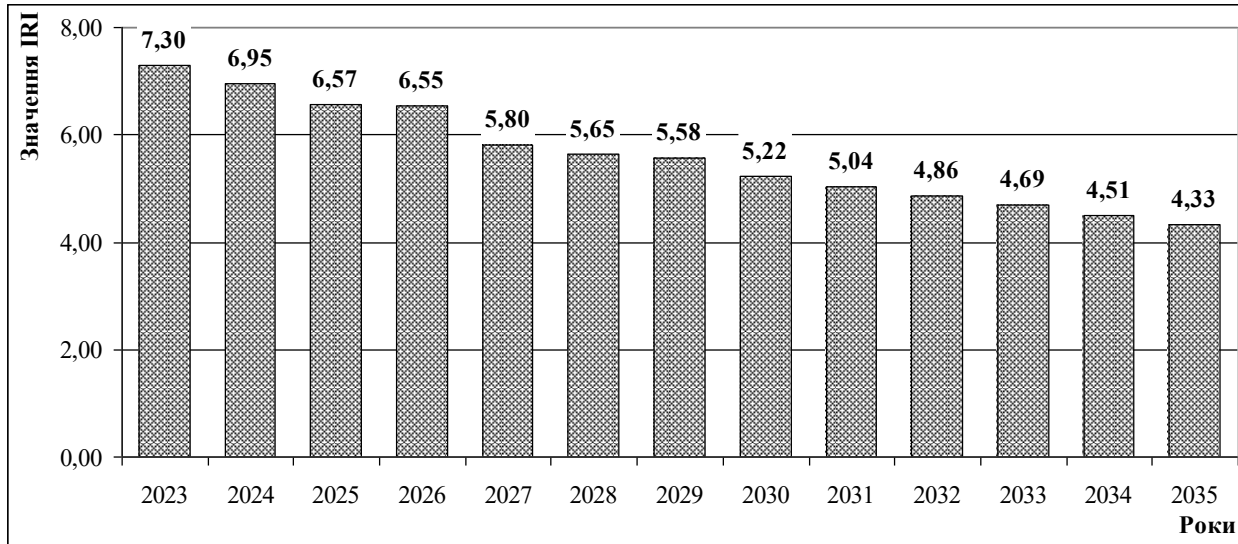


Рис. 3. Прогнозна динаміка інтегрального річного індексу ризику (IRI) портфеля проєктів публічно-приватного-партнерства сталого сільського розвитку в Україні

Джерело: розраховано авторами.

Загалом екстрапольовані значення IRI_t відображають перехід від домінування екзогенних безпеково-інституційних шоків у короткостроковому періоді до ендогенних структурних викликів, насамперед кліматичного й фінансово-інвестиційного характеру, у довгостроковій перспективі. Своєю чергою це обумовлює доцільність диференційованого підходу до управління ризиками проєктів публічно-приватного партнерства сталого сільського розвитку, який поєднує інструменти державних гарантій і міжнародної фінансової підтримки на етапі відновлення з поступовим переходом до ринкових механізмів страхування й розподілу кліматичних ризиків у фазі стабілізації [23]. Відтак сукупний рівень ризику стабілізується в межах верхньої зони помірного ризику, що вказує на необхідність довгострокової інтеграції кліматоадаптаційних та страхових механізмів у контрактну архітектуру публічно-приватного партнерства.

ВИСНОВКИ З ДАНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ РОЗВІДОК У ДАНОМУ НАПРЯМІ

У результаті проведеного дослідження встановлено, що ризикове середовище реалізації публічно-приватних проєктів сталого сільського розвитку в Україні має виражений багатовимірний і нелінійний характер, зумовлений кумулятивною дією природно-кліматичних, ринкових, фінансових, інституційно-правових та технологічних чинників.

Обґрунтовано доцільність застосування тензорного підходу для формалізації взаємозв'язків між окремими категоріями ризиків, що дало змогу кількісно виявити сильні кореляційні залежності між ринковими та фінансовими ризиками, а також середній рівень взаємодії між природно-кліматичними і ціновими чинниками, які транслуються у грошові потоки проєктів.

Розроблена нечітко-тензорна архітектура моделі забезпечує інтеграцію статистичних і експертних оцінок у єдиному аналітичному просторі, що підвищує достовірність результатів в умовах фрагментарності даних і високого рівня невизначеності. Запропонований інтегральний

індекс ризику (IRI) дає змогу здійснювати порівняльну оцінку інвестиційної прийнятності проєктів різного типу та регіональної локалізації.

Сценарний аналіз підтвердив, що за умов 2025 р. без активного управління ризиками лише обмежена частка проєктів здатна забезпечити прийнятний рівень фінансової ефективності, тоді як реалізація кореляційного шоку формує критичні збитки з високою ймовірністю припинення проєктної діяльності. При цьому інвестиції в ризик-менеджмент на рівні 2–4 % загального обсягу капіталовкладень забезпечують суттєве зниження інтегрального ризику та підвищують стійкість проєктів у кризові періоди.

Перспективним напрямом подальших досліджень є розширення запропонованої нечітко-тензорної моделі шляхом інтеграції динамічних стохастичних процесів, зокрема марковських ланцюгів та байєсівських мереж, що дозволить формалізувати часову еволюцію ризиків і механізми їх каскадного поширення у довгострокових проєктах публічно-приватного партнерства. Перспективним також є поєднання розробленого підходу з моделями оцінювання соціально-економічного ефекту, зокрема мультиплікаторами зайнятості, валової доданої вартості та фіскальної віддачі, що забезпечить комплексну оцінку не лише ризиків, а й внеску проєктів у досягнення цілей сталого сільського розвитку.

ЛІТЕРАТУРА:

1. RCCC/IFRC. Country-level Climate Fact Sheet: Ukraine / Climate Centre. 2022. 12 p. URL: https://www.climatecentre.org/wp-content/uploads/RCCC-Country-profiles-Ukraine_2022-Final-V3.pdf
2. Wilson L., New S., Daron J., Golding N. Climate Change Impacts for Ukraine. Exeter: Met Office, 2021. 34 p. URL: https://www.metoffice.gov.uk/binaries/content/assets/metofficegovuk/pdf/services/government/met-office_climate-change-impacts-for-ukraine_report_08dec2021_english.pdf
3. WMO Guidelines on the Calculation of Climate Normals. WMO-No. 1203. Geneva: World Meteorological Organization, 2017. 29 p. URL: <https://library.wmo.int/idurl/4/55797>
4. Vicente-Serrano S.M., Begueria S., Lopez-Moreno J.I. A Multiscalar Drought Index Sensitive to Global Warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI). *Journal of Climate*. 2010. Vol. 23(7). Pp. 1696–1718. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1>
5. Тараріко О.Г., Ільєнко Т.В., Адамчук-Чала Н.І., Білокінь О.А., Шерстюк Д.М. Адаптація агроєкосистем Лісостепу України до змін клімату. Київ: Аграрна наука, 2025. 68 с. <https://doi.org/10.31073/978-966-540-664-8>
6. Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., Smith M. Crop Evapotranspiration – Guidelines for Computing Crop Water Requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56. Rome: FAO, 1998. xxvi, 300 p. URL: <https://www.fao.org/4/x0490e/x0490e00.htm>
7. Takacs G., Gergely I., Ordog V., Voros L., Ivancsics J. Approaches to Studying Wheat and Maize Drought Stress Responses. *Plant Soil*. 2025. Vol. 516. Pp. 115–132. <https://doi.org/10.1007/s11104-025-07789-6>
8. Lisboa I.P., Esker P.D., Lauer J.G. Evaluating the Yield of Surviving Plants from Early-Season Hail Damage. *Agrosystems, Geosciences & Environment*. 2024. Vol. 7. Issue 3. Article e20533. <https://doi.org/10.1002/agg2.20533>
9. Gobbo S., Ghiraldini A., Dramis A., Dal Ferro N., Morari F. Estimation of Hail Damage Using Crop Models and Remote Sensing. *Remote Sensing*. 2021. Vol. 13. Issue 14. Article 2655. <https://doi.org/10.3390/rs13142655>
10. Bielza M., Conte C., Dittmann Ch., Gallego J., Stroblmair J. Agricultural Insurance Schemes / European Commission. Ispra: Joint Research Centre, 2008. 320 p. URL: https://agriculture.ec.europa.eu/system/files/2020-02/ext-study-insurance-full-report-rev_2008_en_0.pdf
11. Huizinga J., De Moel H., Szweczyk W. Global Flood Depth-Damage Functions: Methodology and the Database with Guidelines. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2017. 114 p. <https://doi.org/10.2760/16510>
12. Molinari D., Scorzini A.R., Gallazzi A., Ballio F. AGRIDE-c, a Conceptual Model for the Estimation of Flood Damage to Crops: Development and Implementation. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2019. Vol. 19. Issue 11. Pp. 2565–2582. <https://doi.org/10.5194/nhess-19-2565-2019>
13. Walz Y., Dall K., Graw V., Villagran J.-C. de Leon, Kussul N., Jordaan A. Розуміння ризиків сільськогосподарської посухи та їх зниження: приклади Південної Африки й України [UNU-EHS

Publication Series Policy Report 2018 No.3]. Бонн: Університет Організації Об'єднаних Націй (UNU-EHS), 2018. 31 с. URL: https://www.preventionweb.net/files/62611_policyreport181213ukr.pdf

14. Index of Economic Freedom / The Heritage Foundation. 2025. URL: <https://www.heritage.org/index/pages/all-country-scores>

15. Country Risk – Ukraine / Credendo. 2025. URL: <https://credendo.com/en/country-risk/Ukraine>

16. Реалізація потенціалу промисловості й аграрного сектора економіки в умовах війни та повоєнного відновлення / за ред. Я.А. Жаліла. Київ: НІСД, 2025. 93 с. <https://doi.org/10.53679/NISS-analytrep.2025.09>

17. Кредитний рейтинг / Міністерство фінансів України. 2025. URL: <https://mof.gov.ua/uk/kreditnij-rejting-potochni-rejtingi-zagalna-informacija-istorichni-zmini>

18. Державно-приватне партнерство в системі регулювання економіки / за ред. Т.І. Єфименко. Київ: Ін-т екон. та прогнозув. НАН України, 2012. 372 с.

19. Kron G. Diakoptics: The Piecewise Solution of Large-Scale Systems. London: Macdonald, 1963. xvii, 166 p.

20. Klir G.J., Yuan B. Fuzzy Sets and Fuzzy Logic: Theory and Applications. Ahmedabad: Pearson, 2015. xv, 574 p.

21. Про затвердження Методичних рекомендацій щодо застосування Методики виявлення ризиків здійснення державно-приватного партнерства, їх оцінки та визначення форми управління ними: наказ Мінекономрозвитку України від 07.06.2016 р. № 944. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0944731-16>

22. Mamdani E.H., Assilian S. An Experiment in Linguistic Synthesis with a Fuzzy Logic Controller. *International Journal of Man-Machine Studies*. 1975. Vol. 7. Issue 1. Pp. 1–13. [https://doi.org/10.1016/S0020-7373\(75\)80002-2](https://doi.org/10.1016/S0020-7373(75)80002-2)

23. Lozynska T., Lypynska O., Havrysh K., Plotnikova M., Tsentylo K. Public-Private Partnership in the Context of Sustainable Development in Ukraine. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2025. No. 5. Pp. 252–260. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2025-5/252>

REFERENCES:

1. Red Cross Red Crescent Climate Centre & International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies. (2022). *Country-Level Climate Fact Sheet: Ukraine*. <https://www.climatecentre.org/wp-content/uploads/RCCC-Country-profiles-Ukraine-2022-Final-V3.pdf>

2. Wilson L., New S., Daron J., Golding N. (2021). *Climate change impacts for Ukraine*. Exeter: Met Office. https://www.metoffice.gov.uk/binaries/content/assets/metofficegovuk/pdf/services/government/met-office_climate-change-impacts-for-ukraine_report_08dec2021_english.pdf

3. World Meteorological Organization. (2017). *WMO Guidelines on the Calculation of Climate Normals* (WMO-No. 1203). <https://library.wmo.int/idurl/4/55797>

4. Vicente-Serrano S.M., Begueria S., Lopez-Moreno J.I. (2010). A Multiscalar Drought Index Sensitive to Global Warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI). *Journal of Climate*, 23(7), 1696–1718. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1>

5. Tarariko O.G., Iliencko T.V., Adamchuk-Chala N.I., Bilokin O.A., Sherstiuk D.M. (2025). *Adaptation of agroecosystems of the Forest-Step of Ukraine to Climate Change: Scientific Recommendations*. Kyiv: Agrarna Nauka. <https://doi.org/10.31073/978-966-540-664-8>

6. Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., Smith M. (1998). *Crop Evapotranspiration – Guidelines for Computing Crop Water Requirements* (FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56). Rome: FAO. <https://www.fao.org/4/x0490e/x0490e00.htm>

7. Takacs G., Gergely I., Ordog V., Voros L., Ivancsics J. (2025). Approaches to Studying Wheat and Maize Drought Stress Responses. *Plant and Soil*, 516, 115–132. <https://doi.org/10.1007/s11104-025-07789-6>

8. Lisboa I.P., Esker P.D., Lauer J.G. (2024). Evaluating the Yield of Surviving Plants from Early-Season Hail Damage. *Agrosystems, Geosciences & Environment*, 7(3), Article e20533. <https://doi.org/10.1002/agg2.20533>

9. Gobbo S., Ghiraldini A., Dramis A., Dal Ferro N., Morari F. (2021). Estimation of Hail Damage Using Crop Models and Remote Sensing. *Remote Sensing*, 13(14), Article 2655. <https://doi.org/10.3390/rs13142655>

10. Bielza M., Conte C., Dittmann C., Gallego J., Stroblmair J. (2008). *Agricultural Insurance Schemes*. Ispra: Joint Research Centre. https://agriculture.ec.europa.eu/system/files/2020-02/ext-study-insurance-full-report-rev_2008_en_0.pdf

11. Huizinga J., De Moel H., Szweczyk W. (2017). *Global Flood Depth-Damage Functions: Methodology and the Database with Guidelines*. Luxembourg: Publications Office of the European Union. <https://doi.org/10.2760/16510>

12. Molinari D., Scorzini A.R., Gallazzi A., Ballio F. (2019). AGRIDE-c, a Conceptual Model for the Estimation of Flood Damage to Crops: Development and Implementation. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 19(11), 2565–2582. <https://doi.org/10.5194/nhess-19-2565-2019>

13. Walz Y., Dall K., Graw V., de Leon Villagran J.-C., Kussul N., Jordaan A. (2018). *Understanding Agricultural Drought Risks and Their Reduction: Case Studies of South Africa and Ukraine* (UNU-EHS Publication Series, Policy Report No. 3). Bonn: United Nations University – Institute for Environment and Human Security (UNU-EHS). https://www.preventionweb.net/files/62611_policyreport181213ukr.pdf

14. The Heritage Foundation. (2025). *Index of Economic Freedom*. <https://www.heritage.org/index/pages/all-country-scores>

15. Credendo. (2025). *Country Risk – Ukraine*. <https://credendo.com/en/country-risk/Ukraine>

16. Zhalilo Ya.A. (Ed.). (2025). *Realisation of the Potential of the Industrial and Agricultural Sectors of the Economy under Conditions of War and Post-War Recovery*. Kyiv: National Institute for Strategic Studies. <https://doi.org/10.53679/NISS-analytrep.2025.09>
17. Ministry of Finance of Ukraine. (2025). *Credit Rating*. <https://mof.gov.ua/uk/kreditnij-rejting-potochni-rejtingi-zagalna-informacija-istorichni-zmini>
18. Yefymenko T.I. (Ed.). (2012). *Public-Private Partnership in the System of Economic Regulation*. Kyiv: Institute for Economics and Forecasting, National Academy of Sciences of Ukraine.
20. Kron G. (1963). *Diakoptics: The Piecewise Solution of Large-Scale Systems*. London: Macdonald.
21. Klir G.J., Yuan B. (2015). *Fuzzy Sets and Fuzzy Logic: Theory and Applications*. Ahmedabad: Pearson.
22. Ministry of Economic Development and Trade of Ukraine. (2016). *On Approval of the Methodological Recommendations for the Application of the Methodology for Identifying Public-Private Partnership Risks, Their Assessment and Determining the Form of Their Management* (Order No. 944, 7 June 2016). <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0944731-16>
23. Mamdani E.H., Assilian S. (1975). An Experiment in Linguistic Synthesis with a Fuzzy Logic Controller. *International Journal of Man-Machine Studies*, 7(1), 1–13. [https://doi.org/10.1016/S0020-7373\(75\)80002-2](https://doi.org/10.1016/S0020-7373(75)80002-2)
24. Lozynska T., Lypynska O., Havrysh K., Plotnikova M., Tsentylo K. (2025). Public-Private Partnership in the Context of Sustainable Development in Ukraine. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (5), 252–260. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2025-5/252>

FUZZY-TENSOR MODELLING OF RISKS IN PUBLIC-PRIVATE PARTNERSHIP PROJECTS FOR SUSTAINABLE RURAL DEVELOPMENT

HUTOROV Andrii, TSENTYLO Kostiantyn
NSC “Institute of Agrarian Economics”

The purpose of this article is to develop and validate a multidimensional fuzzy-tensor model for the assessment and forecasting of the aggregate risks of public-private partnership projects for sustainable rural development, based on the integration of natural and climatic, market, financial, institutional and legal, and technological factors, taking into account their correlation interaction, regional asymmetry, and scenario dynamics. The article examines the issues of risk assessment and management in public-private partnership projects for sustainable rural development under conditions of high uncertainty, climate change, market volatility, and institutional instability. The limitations of traditional linear and deterministic approaches to risk analysis are substantiated, as they fail to capture the multidimensional and cumulative nature of the interaction between natural and climatic, financial and economic, market, institutional and legal and technological factors. A fuzzy-tensor model for assessing the overall risk environment is proposed, combining tools of economic and mathematical modelling, fuzzy set theory, and scenario analysis. An integral risk index is developed, enabling a comparative assessment of the investment acceptability of public-private partnership projects with due regard to regional asymmetry, the correlation interaction among specific risk groups, and the non-linear effects of their combined impact on financial performance. The empirical basis of the study is formed using statistical data from the ERA5 climate reanalysis, indicators of price, exchange rate and inflation dynamics, as well as expert assessments of the institutional and market environment of Ukraine's agricultural sector. Scenario modelling is conducted for typical infrastructure, logistics, processing and irrigation projects, which makes it possible to quantify the expected losses in efficiency and identify critical risk zones. The findings confirm the expediency of applying differentiated mechanisms for risk allocation between public and private partners, strengthening the role of insurance and guarantee instruments, and integrating climate adaptation and financial stabilisation measures into the contractual architecture of public-private partnerships for sustainable rural development.

Key words: public-private partnership; sustainable rural development; risk modelling; fuzzy logic; tensor analysis; integral risk index.