

Мікуліна М.О.

кандидат економічних наук, доктор філософії фінансів,
доцент кафедри агроінжинірингу, заступник декана,
Сумський національний аграрний університет
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6918-5192>

Поливаний А.Д.

асистент кафедри агроінжинірингу,
Сумський національний аграрний університет
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8363-7186>

Mikulina Marina, Polyvany Anton

Sumy National Agrarian University

МОДЕЛЮВАННЯ ОПТИМАЛЬНИХ ЛОГІСТИЧНИХ МАРШРУТІВ ДЛЯ АГРОПРОДУКЦІЇ В УМОВАХ ОБМЕЖЕНОЇ ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ КОРДОНІВ

У статті досліджено проблеми функціонування експортної логістики агропродукції України в умовах обмеженої пропускної здатності прикордонної інфраструктури, зростання логістичних витрат та високого рівня невизначеності. Обґрунтовано, що блокування традиційних морських маршрутів і переорієнтація вантажопотоків на сухопутні кордони з країнами ЄС призвели до формування критичних «вузьких місць», що суттєво знижують ефективність експорту, особливо швидкокопсувної аграрної продукції. Проведено порівняльний аналіз альтернативних логістичних сценаріїв, що підтвердив переваги мультимодальних маршрутів для регіонів, віддалених від західних кордонів, навіть за умови більшої транспортної відстані. Доведено, що часовий фактор і вартість очікування є визначальними елементами сучасної логістичної оптимізації.

Ключові слова: аграрна логістика, пропускна здатність кордону, логістичні витрати, оптимізація маршрутів, стратегічне планування логістичних потоків, сталий розвиток агробізнесу.

Постановка проблеми. Актуальність теми зумовлена низкою критичних чинників, що визначають сучасний стан експортної логістики України. По-перше, обмеженість наявної інфраструктури на західних кордонах призводить до виникнення так званих «вузьких місць», де невідповідність технічних потужностей пунктів пропуску різкому зростанню трафіку спричиняє багатоденні черги та затримки. Це безпосередньо впливає на специфіку транспортування агропродукції, зокрема зернових та олійних культур, які вимагають чіткого дотримання графіків поставок. Для швидкокопсувних товарів кожна година простою на кордоні прямо конвертується у фінансові збитки, псування продукції та суттєве зниження конкурентоспроможності українських експортерів на світовому ринку.

Ситуація ускладнюється високим рівнем невизначеності та ризиків, серед яких динамічні зміни митних правил, страйки перевізників та технічні збої, що потребують впровадження гнучких інструментів моделювання, здатних враховувати імовірнісний характер процесів у реальному часі.

Сучасний стан агропромислового комплексу (АПК) України, який залишається фундаментом експортного потенціалу країни, зумовлює гостру потребу в транс-

формації логістичних підходів. У зв'язку з блокуванням традиційних морських шляхів та переорієнтацією вантажопотоків на сухопутні кордони з країнами ЄС, виник критичний дисбаланс між обсягами продукції та пропускною здатністю наявних пунктів пропуску. Це робить задачу моделювання оптимальних логістичних маршрутів не просто технічним питанням, а стратегічним пріоритетом для забезпечення економічної стійкості.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У сучасному взаємозалежному світі питання стабільності логістичних систем під час масштабних кризових явищ набуває критичного значення, що зумовлює підвищений інтерес до цієї теми в науковому середовищі. Вивченню механізмів адаптації ланцюгів постачання до дестабілізуючих факторів присвячено низку фундаментальних праць як українських, так і іноземних дослідників. Зокрема, вагомий внесок у розробку цієї проблематики зробили такі автори, як Х. І. Вуек, З. П. Двудіт, А. С. Завербний [1], А. М. Євтушенко С. І. Терещенко [3], а також зарубіжні фахівці Б. Керстен, М. Коен, А. Мішра [5], Н. Ремзина [2], М. Содхі, К. Танг, С. Чопра та П. Шредер [6]. Проте, попри наявність ґрунтовної теоретичної бази, стрімка поява нових глобальних викликів створює додаткові ризики, які ще не знайшли повного відображення

у науковій літературі. Це зумовлює гостру потребу в подальшому пошуку ефективних стратегій забезпечення стійкості логістики в умовах постійної нестабільності.

Формулювання цілей статті. Огляд методів моделювання, які дозволяють знайти найшвидший та найдешевший шлях експорту в умовах невизначеності.

Виклад основного матеріалу. Традиційні методи планування маршрутів часто не враховують жорстких обмежень пропускної здатності кордонів як динамічного параметру. Розробка математичних моделей, що базуються на методах дослідження операцій, теорії графів та алгоритмах машинного навчання, дозволяє створювати адаптивні сценарії доставки. Це дає змогу експортерам приймати обґрунтовані рішення: від вибору конкретного пункту пропуску до комбінування видів транспорту (мультимодальність).

Таким чином, дослідження алгоритмів побудови оптимальних маршрутів в умовах дефіциту пропускної здатності є критично важливим для стабілізації експорту, мінімізації ризиків продовольчої безпеки та інтеграції української логістичної мережі в європейський транспортний простір [6].

Перед проведенням моделювання логістичних потоків в умовах обмеженої пропускної інфраструктури необхідно чітко визначити сукупність ключових змінних, які формують вхідні дані моделі та безпосередньо впливають на її результати. До таких змінних належать пропускна здатність пунктів пропуску, вартість простою транспортних засобів, можливості мультимодальних перевезень, а також ризики та випадкові чинники, що мають стохастичний характер. Сукупний аналіз цих факторів дозволяє адекватно відобразити реальні умови функціонування логістичних систем та обґрунтувати оптимальні управлінські рішення.

Пропускна здатність пунктів пропуску C_i є базовим обмежувальним фактором, який визначає граничний обсяг вантажопотоку, що може бути пропущений через конкретний логістичний вузол за одиницю часу. Для автомобільних міжнародних пунктів пропуску цей показник зазвичай вимірюється кількістю вантажних транспортних засобів, які можуть перетнути кордон протягом доби T_{day} . Значення пропускної здатності залежить від кількості смуг руху, рівня автоматизації процедур, швидкості роботи митних, прикордонних та ветеринарних служб, а також від організації транспортних потоків у зоні під'їзду. Для залізничних переходів пропускна здатність визначається кількістю вагонів або цілих складів, що можуть бути оброблені протягом певного періоду часу, і значною мірою обмежується різницею ширини колії 1520 мм та 1435 мм, а також технічними можливостями терміналів з перевалки, сортування і зміни візків. Важливо підкреслити, що пропускна здатність не є сталою величиною, оскільки вона змінюється залежно від часу доби, стабільності електропостачання, функціонування інформаційних систем митних органів та рівня кадрового забезпечення.

Другим критично важливим фактором є вартість простою транспортних засобів C_{idle} , яка безпосередньо пов'язана з тривалістю очікування на кордоні та транс-

формується у прямі й непрямі фінансові втрати для перевізників і вантажовласників. Загальна величина збитків за одну добу простою може бути представлена у вигляді суми витрат на оренду або амортизацію транспортного засобу C_{rent} , витрат на оплату праці водіїв та обслуговуючого персоналу у вигляді добових або заробітної плати C_{salary} , втрат від природного зменшення маси або псування вантажу C_{loss} , що є особливо суттєвим для швидкопсувної продукції, а також штрафних санкцій C_{fine} , які накладаються у разі порушення контрактних термінів поставки. Отже, зростання часу очікування експоненційно збільшує сумарні логістичні витрати та знижує конкурентоспроможність ланцюгів постачання [2].

Час очікування на кордоні безпосередньо корелює з фінансовими втратами. Сукупні збитки за добу розраховуються за формуло

$$C_{idle} = C_{rent} + C_{salary} + C_{loss} + C_{fine} \quad (1)$$

де враховуються витрати на оренду та амортизацію транспорту, виплати персоналу, природне зменшення або псування агропродукції, а також штрафні санкції за порушення термінів контрактів.

Важливим інструментом зменшення негативного впливу обмеженої пропускної здатності є використання мультимодальних перевезень, що в моделі відображається через змінну M_k . Мультимодальність передбачає комбінування різних видів транспорту, зокрема автомобільного, залізничного та водного, з метою обходу «вузьких місць» логістичної інфраструктури. При цьому враховується коефіцієнт трансформації, який відображає додаткові витрати часу і коштів на перевантаження вантажу з одного виду транспорту на інший, наприклад з автомобіля у залізничний вагон або баржу. Не менш важливим є фактор доступності відповідних логістичних вузлів, таких як сухі порти, перевалочні термінали або елеватори, які мають технічну можливість обслуговувати кілька видів транспорту та розташовані в радіусі N кілометрів від основних маршрутів руху [2].

Окрему групу факторів становлять ризики та випадкові чинники R_j , оскільки логістичні процеси в умовах обмежень мають виражений стохастичний характер і не можуть бути повністю детерміновані. У модель доцільно вводити коефіцієнти ризику, які відображають імовірність виникнення політичних та соціальних подій, зокрема страйків, протестів або перекриття транспортних коридорів, що можуть бути описані через ймовірність P_{strike} . До інфраструктурних ризиків належать загрози пошкодження об'єктів транспортної інфраструктури, обстріли, аварії та відключення енергопостачання, які безпосередньо впливають на стабільність роботи пунктів пропуску та терміналів. Погодні чинники також мають істотне значення, оскільки вони впливають на швидкість руху транспорту, безпеку перевезень та функціонування портів і внутрішніх водних шляхів, особливо у випадку використання барж [4].

Таким чином, комплексний аналіз пропускної здатності, вартості простою, мультимодальних можливостей і ризиків створює методологічну основу для побудови

адекватної математичної моделі логістичних потоків, що дозволяє оцінювати альтернативні сценарії та приймати обґрунтовані управлінські рішення в умовах високої невизначеності.

Побудова математичної моделі для оптимізації логістики агропродукції – це процес перетворення фізичних процесів транспортування у набір математичних рівнянь. Нижче наведемо детальний розбір нашої моделі з уточненнями для кожного етапу.

Наша функція Z є двокритеріальною, оскільки вона об'єднує прямі витрати (паливо, тарифи) та непрямі витрати (час простою).

$$\min Z = \sum_{ij}(C_{ij} * x_{ij}) + \sum_i(T_i * C_{idle}) \quad (2)$$

де $c_{i,j}$ – вартість транспортування між пунктами i та j ;
 $x_{i,j}$ – обсяг вантажу, що перевозиться за цим маршрутом;
 T_i – час очікування у вузлі i (на кордоні);
 C_{idle} – вартість одиниці часу простою.

Основними обмеженнями моделі є:

1. обмеження попиту і пропозицій: сума вивезеного агроресурсу з елеваторів має дорівнювати сумі отриманого в портах призначення;

2. обмеження пропускної здатності: $x_{i,j} \leq c_{i,j}$. Обсяг вантажу на ділянці не може перевищувати технічну спроможність пункту пропуску;

3. часове вікно: $T_{total} \leq T_{max}$. Загальний час доставки не повинен перевищувати термін придатності продукції або умови контракту [5].

Для розв'язання такої задачі найкраще підходять три підходи:

1. Симплекс-метод (для лінійних моделей): якщо залежність часу від черг лінійна, цей метод гарантує знаходження глобального оптимуму.

2. Алгоритм Едмондса-Карпа: ідеально підходить для графових структур. Він шукає шлях з найменшою вартістю, поки не буде вичерпано пропускну здатність.

3. Генетичні алгоритми: використовуються, якщо модель стає «нелінійною» (наприклад, вартість перевезення різко змінюється залежно від обсягу – знижки на великі партії) [1].

Щоб модель була корисною для бізнесу, ми порівнюємо три сценарії логістики (табл. 1):

В умовах обмеженої пропускної здатності кордонів просте обчислення кілометражу більше не працює. Необхідно використовувати моделі, які враховують випадкові чинники (страйки, черги, перевірки).

Імітаційне моделювання методом Монте-Карло – це потужний аналітичний інструмент, який дозволяє віді-

йти від використання фіксованих значень і змоделювати тисячі можливих сценаріїв розвитку подій. Замість того, щоб оперувати лише одним числом, як-от «час очікування – 5 днів», у систему вводяться діапазони значень для кожного етапу процесу, зокрема мінімальний, максимальний та найбільш імовірний час простою на пунктах пропуску.

Завдяки багаторазовому повторенню випадкових розрахунків модель генерує результат у вигляді розподілу ймовірностей. Це дозволяє отримати конкретний прогноз: наприклад, графік може показати, що з імовірністю 80% вантаж прибуде вчасно, тоді як у 20% випадків існує загроза отримати штраф за простій судна в порту. Такий підхід дає бізнесу можливість заздалегідь оцінити фінансові ризики, підготувати резервні плани та приймати рішення на основі точних статистичних даних, а не припущень. Теорія масового обслуговування (ТМО) дозволяє розглядати прикордонний перехід як складну систему, де митний пост виступає в ролі «каналу обслуговування», а вантажівки, що очікують на перетин, формують «чергу». Основними параметрами такої моделі є інтенсивність надходження машин на кордон та середня швидкість, з якою митниця встигає обробляти документи [1].

Головна користь цього підходу полягає у визначенні «точок перенасичення» системи, коли довжина черги сягає критичної межі. Наприклад, якщо затор розтягується на 10 км, додаткові витрати на паливо для працюючих двигунів та заробітну плату водіїв за час простою можуть почати перевищувати потенційний прибуток від продажу агропродукції – модель стає стратегічним інструментом: вона завчасно сигналізує про необхідність змінити маршрут на альтернативний – навіть якщо він дорожчий за кілометражем, але вільніший, що в результаті дозволяє уникнути збитків.

Використання графових моделей дозволяє представити складну логістичну мережу у вигляді математичної структури, де вузли відповідають ключовим об'єктам – елеваторам, портам та митним пунктам, а ребра – дорожнім або залізничним сполученням між ними. Головною особливістю такої моделі є впровадження динамічної ваги ребер: на відміну від стандартних навігаторів, «вартість» проїзду ділянкою змінюється щогодини на основі актуальних даних із системи «Електронна черга». Це дозволяє системі бачити реальну затримку в часі та фінансові витрати на кожному відрізку шляху в режимі реального часу.

Окрім вибору маршруту, модель виконує мультимодальну оптимізацію, автоматично аналізуючи доцільність зміни виду транспорту. Наприклад, вона розраховує, чи

Таблиця 1

Порівняння сценаріїв логістичних маршрутів

Параметр	Сценарій А (Авто)	Сценарій Б (Залізниця)	Сценарій В (мультимодальний)
Вартість c_{ij}	Висока	Середня	Найнижча
Час T_i	Великі черги (непередбачувано)	Стабільний (черги на перестановку візків)	Оптимальний через розподіл потоків
Ризики	Блокування пунктів пропуску	Дефіцит вагонів	Складність координації перевалки

Джерело: складено на основі [3]

буде вигідніше в поточний момент перевантажити зерно з фур у вагони на залізничних терміналах (сухих портах) на кордоні, чи продовжувати рух автотранспортом до кінцевого пункту. Такий інтелектуальний підхід дозволяє знаходити найефективніший шлях, враховуючи не лише фізичну відстань, а й пропускну здатність та вартість логістичних операцій у динамічному середовищі [1].

Для об'єктивного порівняння використовується математична формула сукупної вартості логістики (TLC):

$$TLC = C_{base} + C_{day} * T_{wait} + R_{risk} \quad (3)$$

де C_{base} – базова вартість фрахту та палива.

C_{day} – вартість одного дня простою (зарплата водія, оренда авто/контейнера, втрата якості продукції).

T_{wait} – прогнозований час очікування.

R_{risk} – коефіцієнт ризику (ймовірність повної зупинки кордону) [3].

Оптимізація логістичних процесів у аграрному секторі базується на комплексному поєднанні математичних методів та стратегічного планування. На першому етапі застосовується транспортна задача (метод лінійного програмування), яка дозволяє розрахувати найбільш вигідні маршрути від елеваторів до кінцевих споживачів з метою мінімізації загальних витрат на перевезення. Для глибшого аналізу вузьких місць використовується теорія масового обслуговування (ТМО), за допомогою якої моделюються черги на прикордонних переходах та прогнозується точний час очікування вантажів. На завершальному етапі проводиться аналіз ризиків через метод сценаріїв («що, якщо»), що дає змогу порівняти ефективність різних експортних напрямків, таких як польський кордон, порти Дунаю чи румунський транзит, та обрати найбільш стійкий варіант розвитку подій (табл. 2).

Для ефективного управління аграрною логістикою застосовується комплексний підхід, що поєднує математичне моделювання та стратегічне прогнозування. Процес починається з вирішення транспортної задачі методами лінійного програмування, що дозволяє знайти шлях до мінімальної вартості перевезень від елеватора безпосередньо до покупця. Паралельно з цим, за допомогою теорії масового обслуговування, здійснюється моделювання черг на кордонах, що дає змогу точно спрогнозувати час очікування та уникнути простоїв. Усі отримані дані зводяться у метод сценаріїв, де через аналіз «що, якщо» порівнюються альтернативні логістичні коридори – зокрема через польський кордон, дунайські порти або румунський транзит – для вибору найбільш стабільного та вигідного варіанту (табл. 3).

Наведемо приклад порівняльного розрахунку логістичних сценаріїв.

Вхідні дані: для наочності розрахунку візьмемо умовну партію кукурудзи обсягом 1000 тон із Сумської області та порівняємо два логістичні сценарії: через сухопутний кордон (Ягодин) та через Дунайські порти (Ізмаїл).

- точка відправлення: м. Конотоп, Сумська обл.;
- обсяг: 1000 тонн;
- вартість простою Cidle: 150 за фуру/доба (25 тонн у фурі) або 2000 за залізничний склад/доба.

Сценарій А: автомобільний шлях (Конотоп – Ягодин – Хелм) – цей шлях прямий, але має високий ризик затримок на кордоні (табл. 4).

Сценарій Б: мультимодальний шлях (залізниця + баржа: Конотоп – Ізмаїл – Констанца): використання залізниці до порту Ізмаїл з подальшим перевантаженням на воду (табл. 5).

Таблиця 2

Порівняння ключових інструментів моделювання

Метод	Основна мета	Практичний результат
Транспортна задача	Економія коштів	Оптимальний план завантаження та маршрутизації.
Теорія черг (ТМО)	Економія часу	Прогноз затримок на митниці та терміналах.
Сценарний аналіз	Гнучкість стратегії	Вибір між альтернативними логістичними коридорами.

Джерело: складено автором на основі [2]

Таблиця 3

Структура логістичного аналізу

Метод	Сфера застосування	Очікуваний результат
Лінійне програмування	Витрати на логістику	Максимальна економія бюджету
Моделювання ТМО	Прикордонні переходи	Розрахунок пропускну здатності
Сценарне планування	Геополітичні вектори	Готовність до змін на ринку

Джерело: складено автором на основі [3]

Таблиця 4

Сценарій А

Параметр	Розрахунок	Сума (умовна), дол.
Транспортування	40 фур x 850 км x 1.5 дол./км	51,000
Очікування T_i	10 діб черги x 40 фур x 150 дол	60,000
Ризики R_i	Коефіцієнт 1.2 (можливість забастовки)	+10,200
Разом (Z_A)		121,200

Джерело: розраховано автором

Сценарій Б		
Параметр	Розрахунок	Сума (умовна), дол.
Залізничний тариф	15 вагонів x 1000 км	35,000
Перевалка (Mk)	12 дол./т x 1000 т	12,000
Фрахт баржі	25 дол./ т x 1000 т	25,000
Простій (Ti)	3 доби (вагони) x 2000 дол.	6,000
Разом (ZB)		78,000

Джерело: розраховано автором

Згідно з нашою моделлю: $Z_A = 121,200$ USD; $Z_B = 78,000$ USD

Хоча сценарій Б складніший технологічно (мульти-модальність), він виявляється на 35% вигіднішим за рахунок меншої вартості простою (C_{idle}) у перерахунку на одиницю вантажу. Якщо в моделі задати обмеження, що залізничний перехід на Ізмаїл перевантажений (наприклад, ремонт колій), параметр C_i для залізниці різко впаде. У такому разі модель автоматично: перерахує T_i (час очікування) для залізниці. Якщо T_i зросте до 15 діб, загальна вартість Z_B перевищить Z_A . Запропонує комбінований варіант: частину вантажу відправити автотранспортом на інший, менш завантажений пункт пропуску (наприклад, Орлівка – Ісакча).

Цей приклад доводить, що вартість очікування на кордоні в сучасних умовах є вагомим фактором, ніж фізична відстань. Оптимальна модель повинна щоденно оновлювати дані про черги T_i та пропускну здатність C_i , щоб мінімізувати втрати агровиробника.

Використання цих методів перетворює логістику з «гри в рулетку» на розрахований бізнес-процес. Навіть найпростіша модель у Excel, що базується на методі сценаріїв, допомагає агропідприємцю заощадити 10–30 доларів на кожній тонні продукції завдяки уникненню «мертвих» черг [2].

Доведено, що вартість очікування на кордоні є ключовим фактором, який робить мультимодальні маршрути (залізниця + річковий транспорт) конкурентоспроможними порівняно з автомобільними, навіть за умови більшої дистанції, що демонструє можливість зниження витрат на 35%.

Висновки. У ході дослідження було розроблено та апробовано модель оптимізації логістичних маршрутів для агропродукції в умовах обмеженої пропускну здатності кордонів. Проведені розрахунки та теоретичний аналіз дозволяють зробити наступні висновки:

1. Пріоритетність часового фактору: в умовах блокування кордонів та черг чинник вартості простою (C_{idle}) стає домінуючим у структурі логістичних витрат. На прикладі експорту кукурудзи із Сумської області доведено, що навіть за умови довшої дистанції, мультимодальні маршрути (залізниця + річковий транспорт) можуть бути на 30–40% ефективнішими за

прямі автомобільні перевезення через менший час очікування.

2. Критична роль пропускну здатності (C_i): традиційні моделі пошуку найкоротшого шляху є неактуальними без врахування динамічних обмежень пропускну спроможності. Модель має базуватися на принципі потоку мінімальної вартості, де пропускну здатність кожного пункту пропуску є змінною величиною, що залежить від поточної черги та технічних умов.

3. Ефективність мультимодальності: для регіонів, що віддалені від західних кордонів (зокрема Північно-Східної України), оптимальним рішенням є диверсифікація каналів збуту. Використання «сухих портів» та переорієнтація на Дунайський кластер дозволяє нівелювати ризики, пов'язані зі страйками на сухопутних автомобільних пунктах пропуску.

4. Практична цінність моделі: розроблений підхід дозволяє агропідприємствам не лише мінімізувати прямі транспортні витрати, а й уникати критичних затримок, що загрожують псуванням продукції та порушенням контрактних зобов'язань. Впровадження таких моделей у вигляді цифрових сервісів підтримки прийняття рішень є умовою виживання українського агроекспорту в умовах логістичної невизначеності.

5. Масштабування агробізнесу неможливе без формування та впровадження власної логістичної моделі, яка б забезпечувала ефективне управління рухом продукції від виробника до кінцевого споживача та адаптацію до вимог внутрішнього й зовнішнього ринків. У зв'язку з цим одним із ключових рекомендацій є диверсифікація експорту за рахунок одночасного використання щонайменше трьох незалежних каналів збуту, що сприятиме мінімізації ризиків, пов'язаних із транзитними обмеженнями та кон'юнктурними коливаннями. Очікується, що такий підхід стимулюватиме перехід від «випадкової логістики», яка формується фрагментарно та ситуативно, до стратегічного планування логістичних потоків.

6. Перспективи подальших досліджень: подальший розвиток теми вбачається в інтеграції в модель алгоритмів штучного інтелекту для прогнозування черг на кордоні на основі ретроспективних даних та врахування геополітичних ризиків у реальному часі.

Список літератури:

1. Завербний А. С., Двудіт З. П., Вуек Х. І. Особливості формування логістичних ланцюгів в умовах війни та у післявоєнний період. *Економіка та суспільство*. 2022. № 43. URL: <https://economyandsociety.in.ua/index.php/journal/article/view/1750>

2. Ремзина Н. Особливості управління ланцюгами постачання в умовах кризових явищ. *Розвиток методів управління та господарювання на транспорті*. 2023. № 1 (82). С. 110–124.
3. Терещенко С. І., Євтушенко А. М. Логістичний ланцюг постачання: управління та оптимізація. *Журнал стратегічних економічних досліджень*. 2023. № 6(17). С. 207–214.
4. Manag Rev Q. (2022) Supply chain management in times of crisis: a systematic review. URL: <https://ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC9362030/>
5. Mishra A. Gupta N. Jha G. K. (2024) Supply Chain Resilience: Adapting To Global Disruptions and Uncertainty. *International Journal of Innovative Research in Engineering*. vol. 5(2). pp.189–196.
6. Sarkis J., Cohen M. J., Dewick P., Schröder P. (2021). A brave new world: Lessons from the COVID-19 pandemic for transitioning to sustainable supply and production. *Resources, Conservation and Recycling*. № 2. С. 167–174.

References:

1. Zaverbnyi A. S., Dvulit Z. P., Vuiek Kh. I. (2022) Osoblyvosti formuvannya lohistrychnykh lantsiuhiv v umovakh viiny ta u pislivoienni period [Features of the formation of logistics chains in the conditions of war and in the postwar period]. *Ekonomika ta suspilstvo – Economy and society*, vol. 43. Available at: <https://economyandsociety.in.ua/index.php/journal/article/view/1750> (in Ukrainian)
2. Remzyna N. (2023) Osoblyvosti upravlinnia lantsiuhamy postachannia v umovakh kryzovykh yavyschch [Features of supply chain management in crisis conditions] *Rozvytok metodiv upravlinnia ta hospodarivannia na transporti – Development of management methods and hospodarivanniya in transport*, vol. 1 (82), pp. 110–124. (in Ukrainian).
3. Tereshchenko S. I., Yevtushenko A. M. (2023) Lohistrychnyi lantsiuh postachannia: upravlinnia ta optymizatsiia [Logistics supply chain: management and optimisation]. *Zhurnal stratehichnykh ekonomichnykh doslidzhen – Journal of strategic economic research*, vol. 6(17), pp. 207–214. (in Ukrainian)
4. Manag Rev Q. (2022) Supply chain management in times of crisis: a systematic review. Available at: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC9362030/>
5. Mishra A. Gupta N. Jha G. K. (2024) Supply Chain Resilience: Adapting To Global Disruptions and Uncertainty. *International Journal of Innovative Research in Engineering*. vol. 5(2), pp. 189–196.
6. Sarkis J., Cohen M. J., Dewick P., Schröder P. (2021). A brave new world: Lessons from the COVID-19 pandemic for transitioning to sustainable supply and production. *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 2, pp. 167–174.

MODELING OPTIMAL LOGISTICS ROUTES FOR AGRICULTURAL PRODUCTS IN CONDITIONS OF LIMITED BORDER CAPACITY

The article examines the problems of the functioning of export logistics of agricultural products of Ukraine in conditions of limited capacity of border infrastructure, increasing logistics costs and a high level of uncertainty. It is substantiated that the blocking of traditional sea routes and the reorientation of cargo flows to land borders with EU countries have led to the formation of critical “bottlenecks”, which significantly reduce the efficiency of exports, especially perishable agricultural products. The purpose of the article is to generalize and analyze modern methods for modeling optimal logistics routes taking into account dynamic capacity constraints, downtime costs and risks. The work uses the tools of operations research, graph theory, queuing theory, simulation and scenario modeling. A mathematical model for minimizing total logistics costs is proposed, which combines direct transport costs and losses from downtime at the borders, and also takes into account the possibilities of multimodal transportation. A comparative analysis of alternative logistics scenarios was conducted, which confirmed the advantages of multimodal routes for regions remote from the western borders, even with a longer transport distance. It was proven that the time factor and the cost of waiting are the determining elements of modern logistics optimization. The practical value of the study lies in the possibility of using the proposed model by agricultural enterprises to reduce logistics costs, minimize the risks of contract failure and transition from situational decisions to strategic management of export flows. To increase the sustainability of export logistics, the feasibility of diversifying routes and using at least three independent sales channels was substantiated, which reduces dependence on individual infrastructure restrictions. The results obtained can be used by state administration bodies when planning the development of border and transport infrastructure in order to strengthen the competitiveness of Ukrainian agricultural products in foreign markets.

Key words: agricultural logistics, export of agricultural products, border capacity, logistics costs, multimodal transportation, route optimization, strategic planning of logistics flows, sustainable development of agribusiness.

Дата надходження статті: 09.01.2026

Дата прийняття статті: 30.01.2026

Дата публікації статті: 02.03.2026