

МУЛЬТИАГЕНТНИЙ ПІДХІД ДО ОПТИМІЗАЦІЇ ЕКСПОРТНИХ МАРШРУТІВ В УМОВАХ РИЗИКІВ БЛОКУВАННЯ УКРАЇНСЬКО- ПОЛЬСЬКОГО КОРДОНУ

В. І. СПІРІДОНОВ, здобувач третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти (доктор філософії)

Національний університет «Одеська політехніка»

У статті представлено результати моделювання експортної логістики України в умовах блокування сухопутних пунктів пропуску. Мультиагентна модель відтворює поведінку учасників ринку та дозволяє оцінити зміни часу доставки, витрат і стійкості маршрутів. Аналіз трьох сценаріїв показав, що інерційні та реактивні рішення не усувають «вузькі місця» і ведуть до повторних перевантажень. Оптимізований мультимодальний портфель маршрутів забезпечує найкращі показники ефективності, особливо завдяки використанню Дунайського кластера. Результати підтверджують практичну цінність імітаційного моделювання для управління логістичними ризиками.

Ключові слова: експортна логістика, мультиагентне моделювання, блокування кордонів, логістичні ризики, оптимізація маршрутів.

Постановка проблеми. Ефективність експортної логістики є одним із ключових чинників економічної стійкості України в умовах повномасштабної війни, руйнування морських маршрутів та зростаючої залежності від сухопутних напрямків [1]. Після різкого обмеження доступу до більшості чорноморських портів значний обсяг вантажопотоків був вимушено переорієнтований на західні пункти пропуску, насамперед на українсько-польський кордон, який став основним напрямком для автомобільного та залізничного експорту [2]. Однак події кінця 2023 року, зокрема системні блокування польських пунктів пропуску, що виникли на тлі протестів місцевих фермерів, продемонстрували вразливість цього маршруту та надмірну залежність України від одного домінантного транспортного коридору.

Зазначені блокування не є типовими операційними збоями: вони мають складну політичну, соціальну та поведінкову природу, що визначає їх стохастичний характер і непередбачуваність [3]. Масове перенаправлення транспортних потоків на сусідні коридори – словацький, угорський чи румунський – призводить до швидкого формування нових «вузьких місць», оскільки пропускна здатність цих переходів є обмеженою [4]. У таких умовах традиційні статичні оптимізаційні моделі, орієнтовані на визначення найкоротшого чи найдешевшого маршруту в детермінованому середовищі, виявляються недостатніми для опису реальних логістичних процесів, що характеризуються емерджентністю та поведінковою реакцією суб'єктів ринку [5].

У практичному вимірі проблема оптимізації маршрутів в умовах стохастичних блокувань має стратегічне значення для експортерів і державних інституцій, оскільки напряму впливає на час доставки, логістичні витрати, надійність виконання контрактів та конкурентоспроможність українського експорту [6]. У відповідь на окреслені виклики дедалі більшої актуальності набувають мультиагентні та гібридні імітаційні моделі, які дозволяють відтворювати адаптивну поведінку учасників ринку, моделювати сценарії блокування та оцінювати ефективність альтернативних транспортних коридорів, включно з мультимодальними маршрутами Дунайського кластера [7]. Саме тому застосування гібридного моделювання постає як перспективний інструмент для діагностики ризиків, прогнозування навантаження та обґрунтованого вибору оптимальних експортних маршрутів у режимі реального часу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблематика функціонування експортної логістики України в умовах блокувань та зовнішніх обмежень активно висвітлюється у сучасних аналітичних і наукових дослідженнях. Один із найбільш ґрунтовних оглядів представлено Світовим банком, де акцентовано увагу на структурних обмеженнях української транспортної системи, впливі черг на кордонах та необхідності її адаптації до нових геополітичних умов [1]. У рамках цієї дискусії окремий напрям формують дослідження, присвячені розвитку Дунайського кластера як альтернативного маршруту для експорту аграрної та промислової продукції, що розглядається як стратегічний резерв пропускних потужностей України [2].

Питання блокувань сухопутних пунктів пропуску та їх впливу на стабільність логістичних потоків висвітлюються у низці журналістських і аналітичних матеріалів. Зокрема, у публікаціях фіксуються реальні масштаби черг на польсько-українському кордоні, які у пікові періоди сягали кількох тисяч вантажівок, що підтверджує системний характер проблеми та її значний вплив на економіку [3, 9]. Актуальну інформацію про динаміку завантаження пунктів пропуску надає також державний сервіс «ЄЧерга», що використовується у багатьох дослідженнях як емпірична база для аналізу пропускної спроможності [4].

У науковому дискурсі дедалі більшого поширення набуває мультиагентний підхід до моделювання транспортно-логістичних систем. У роботах П. Гіллетофта та Л. Ляттіля обґрунтовано переваги агентно-орієнтованих моделей для відтворення конкуренції за ресурси та поведінкових реакцій учасників ринку в умовах невизначеності [5]. Значний внесок у вивчення функціонування прикордонної інфраструктури зроблено в дослідженні П. Притули та співавторів, які проаналізували роботу транспортно-логістичних коридорів у прикордонні України та ЄС і підкреслили важливість диверсифікації маршрутів у кризових умовах [6].

Сучасні європейські тенденції підвищення стійкості логістичних мереж описані в працях, присвячених технології «цифрових двійників» та цифровізації управління ланцюгами постачання. Серед них виділяється робота Є. Роуман та співавторів, де цифрові двійники розглядаються як ключовий інструмент для зміцнення resilience логістичних систем, особливо в періоди дестабілізації [7]. У

контексті оцінювання ефективності ланцюгів постачання важливе місце займає модель SCOR, яка формує міжнародно визнаний набір показників — Reliability, Responsiveness та Cost, що широко застосовуються для порівняльного аналізу сценаріїв у дослідженнях ЄС й корпоративних стандартах APICS [8].

Окрему групу становлять праці, що аналізують стійкість транспортної логістики України та ЄС в умовах зростаючих ризиків. У статті Лебедевої та Шкуропадської узагальнено сучасні європейські підходи до оцінювання resilience транспортних мереж, приділено увагу впливу зовнішніх шоків і сформовано рекомендації щодо підвищення адаптивності логістичних систем [10]. Сукупність зазначених досліджень підкреслює необхідність поєднання поведінкових моделей із реальними операційними даними та потребу у використанні інструментів, здатних відтворювати динаміку потоків у режимі невизначеності.

Метою даної статті є розроблення та експериментальна перевірка мультиагентної імітаційної моделі, яка забезпечує оптимізацію розподілу експортних вантажопотоків за умов стохастичних блокувань прикордонних переходів і обмеженої пропускної здатності альтернативних маршрутів.

Методика досліджень. У дослідженні застосовано комплексний підхід до відтворення роботи експортної логістики в умовах різких змін та блокувань на кордоні. Основою стала імітаційна модель, побудована на поєднанні поведінкових механізмів окремих учасників ринку та логіки проходження вантажів через транспортну інфраструктуру, що відповідає сучасним практикам аналізу ланцюгів постачання [8].

Структура моделі охоплює три ключові ролі:

- експортерів, які формують вантажні заявки;
- експортні агенції, що приймають рішення щодо маршруту залежно від ситуації на кордоні, затримок і доступних альтернатив;
- перевізників, які здійснюють фізичну доставку з урахуванням власних характеристик руху та тарифів.

Транспортна мережа побудована на основі актуальних сухопутних та мультимодальних коридорів, включаючи польський напрямок, переходи через Словаччину й Угорщину, румунські маршрути та Дунайський кластер, що узгоджується з фактичними логістичними потоками регіону [9].

Особливу увагу приділено моделюванню ризику раптового блокування окремих пунктів пропуску — події, яка у реальних умовах призводить до різкого падіння пропускної спроможності та формування довгих черг. У моделі така ситуація відтворюється як зовнішній стрес-фактор, що змушує учасників шукати альтернативні шляхи та створює можливість спостерігати за появою вторинних «вузьких місць».

Для оцінки ефективності різних стратегій розподілу потоків використано три показники, рекомендовані у міжнародній практиці аналізу логістичних систем [8]:

- reliability — частка доставок вчасно та в повному обсязі;
- total time — загальний час логістичного циклу з урахуванням руху, черг і процедур;

– total cost — сукупні витрати на транспортування, простої та можливу мультимодальну перевалку.

Застосування цих показників дає змогу не лише зафіксувати окремі ефекти блокувань, а й оцінити, як саме змінюється стійкість логістичної мережі залежно від обраної стратегії поведінки. Такий підхід відповідає сучасним методологіям аналізу транспортних мереж, поширеним у дослідженнях ЄС [10].

Результати досліджень. Для забезпечення коректності порівняння сценаріїв було визначено базові параметри експериментального середовища. Моделювання здійснювалося в середовищі AnyLogic із використанням гібридної архітектури, що поєднує агентно-орієнтований підхід та дискретно-подієву логіку. Створена мультиагентна модель відтворює структуру логістичної мережі України та суміжних країн і дозволяє аналізувати динаміку вантажопотоків у режимі реального часу. У моделі функціонують три ключові типи агентів: експортери, які генерують заявки; експортні агенції, що приймають рішення про вибір маршруту з урахуванням черг, блокувань та вартості мультимодальної перевалки; та перевізники, які рухаються відповідно до ГІС-карти та мають індивідуальні характеристики (швидкість, тариф, тип транспортного засобу).

До транспортної мережі включено всі релевантні експортні коридори: польський напрям, переходи через Словаччину й Угорщину, румунські пункти пропуску та мультимодальний Дунайський кластер. Модель охоплює повний логістичний цикл – від формування замовлення до доставки вантажу в пункт призначення – що забезпечує можливість об'єктивного оцінювання впливу різних конфігурацій потоків на час, надійність і вартість транспортування.

Операційна логіка моделі реалізована через дискретно-подієвий механізм, у межах якого сутність «Вантаж» проходить усі етапи логістичного процесу: очікування перевізника, рух до пункту пропуску, перебування в черзі, митне оформлення з обмеженими ресурсами та фінальну доставку. Стохастичний ризик блокування польських ПКПП моделюється як раптове різке зниження їх пропускної здатності до майже нульового рівня. Така подія створює критичне інфраструктурне навантаження, провокує емердгентне утворення черг і змушує експортні агенції оперативно шукати альтернативні маршрути. Це дозволяє моделі адекватно відтворювати поведінкові та системні ефекти, характерні для реальних кризових ситуацій у логістиці.

Для забезпечення об'єктивного порівняння сценаріїв у моделі обчислюються три ключові показники ефективності (KPI), узгоджені з атрибутами моделі SCOR. Reliability визначає частку вантажів, доставлених вчасно та в повному обсязі (On-Time, In-Full), і характеризує надійність маршруту. Responsiveness / Total Time описує повний логістичний цикл – від моменту готовності вантажу до його прибуття до клієнта, включаючи рух, очікування в чергах та митні процедури.

Total Cost інтегрує всі економічно значущі компоненти процесу доставки: витрати на транспортування (відстань, помножена на тариф), витрати простою у чергах (штрафи та операційні витрати, зокрема оплата праці водія), а також витрати на перевалку у випадку використання мультимодальних маршрутів,

таких як Дунайський кластер. Комплексне застосування цих трьох індикаторів дозволяє не лише порівняти сценарії між собою, а й оцінити їхню практичну доцільність у різних умовах навантаження транспортної мережі.

У подальшому моделюванні було проаналізовано три альтернативні сценарії поведінки логістичної системи в умовах різних ступенів навантаження та блокувань. Кожен сценарій відтворює характерну для реального середовища конфігурацію рішень учасників ринку та демонструє відмінності у формуванні черг, витрат і надійності експортних маршрутів.

У першому сценарії всі агенти продовжують рух за базовою логікою, спрямовуючи вантажі на польські пункти пропуску, навіть після їх повного блокування. Пропускна здатність цього коридору у моделі знижена до майже нульового рівня, що унеможлиблює проходження вантажопотоку та призводить до стрімкого накопичення черг і різкого зростання часу доставки.

Результати моделювання свідчать про повний логістичний колапс за умов блокування польських пунктів пропуску. За інерційної поведінки агентів, які продовжують спрямовувати вантажі на недоступний коридор, черги на польському напрямку зростають експоненційно, що блокує можливість обробки вантажопотоку. Total Time у цьому сценарії сягає 15–20 днів через тривалі простої в чергах, а рівень Reliability знижується до величини менше ніж 10%, що свідчить про фактичну нездатність маршруту забезпечувати своєчасну доставку.

Загальні логістичні витрати (Total Cost) також зростають у рази, оскільки модель враховує фінансові наслідки простоїв — зокрема, штрафи, витрати на оплату водіїв та додаткові операційні затримки. Така конфігурація демонструє, що у разі блокування домінантного експортного коридору система не здатна до саморегуляції та переходить у режим критичної нестійкості, що повністю узгоджується зі спостереженнями реальної логістичної ситуації на українсько-польському кордоні.

У другому сценарії моделюється реактивна поведінка учасників ринку, коли після блокування польського кордону весь вантажопотік автоматично перенаправляється на найближчі альтернативні сухопутні переходи — через Словаччину (Ужгород) та Угорщину (Чоп). Таке рішення відображає типову практику «масового переходу» на доступні маршрути без урахування їхньої пропускної здатності, що штучно створює надмірне навантаження на інфраструктуру цих коридорів.

Результати моделювання підтверджують, що масове перенаправлення вантажопотоків на найближчі альтернативні коридори лише зміщує проблемні вузли транспортної мережі, не усуваючи їх. Пропускна здатність пунктів пропуску «Ужгород» (Словаччина) та «Чоп» (Угорщина) вичерпується практично миттєво, що спричиняє формування черг тривалістю 3–5 днів — аналогічних до тих, що спостерігалися на польському кордоні під час блокування.

Попри відсутність повного колапсу, ключові показники ефективності демонструють лише незначне покращення порівняно зі сценарієм 1. Рівень Reliability зростає мінімально, Total Time скорочується лише частково завдяки

меншій тривалості простоїв, тоді як Total Cost залишається високим через системні перевантаження інфраструктури. Таким чином, «наївна диверсифікація» не забезпечує стійкості логістичних операцій, оскільки не враховує обмежену пропускну спроможність альтернативних маршрутів і повторює поведінкові помилки, характерні для кризових ситуацій.

У третьому сценарії використано оптимізаційний рушій AnyLogic (OptQuest), який автоматично підбирає найефективніше поєднання маршрутів з урахуванням заданої цільової функції – мінімізації часу доставки та загальних логістичних витрат при одночасному підвищенні надійності системи. Оптимізатор досліджує широкий простір можливих рішень і формує збалансований портфель вантажопотоків між сухопутними та мультимодальними коридорами, включно з Дунайським кластером, румунськими переходами, а також словацьким і угорським напрямками.

На відміну від реактивних підходів попередніх сценаріїв, цей сценарій моделює раціональну поведінку системи, коли розподіл потоків здійснюється не інерційно, а на основі обчисленої оптимальної структури, що враховує реальні обмеження пропускну здатності та стохастичний характер ризиків.

Результати оптимізаційного експерименту демонструють, що раціональний розподіл вантажопотоку між доступними маршрутами суттєво підвищує ефективність логістичної системи. Оптимізатор AnyLogic формує рішення, яке відрізняється від інтуїтивних поведінкових стратегій: модель ніколи не спрямовує 100% потоку на один маршрут, оскільки така політика неминуче створює перевантаження інфраструктури та черги.

Збалансований портфель маршрутів, знайдений оптимізатором, включає приблизно 40% вантажопотоку, спрямованого на Дунайський мультимодальний кластер, пропускну здатність якого дозволяє поглинати значні обсяги перевезень без утворення критичних черг. Ще близько 30% оптимально розподіляються через румунські пункти пропуску, тоді як решта 30% розміщується між словацьким та угорським напрямками таким чином, щоб не перевищувати їхніх інфраструктурних лімітів.

Таке рішення забезпечує суттєве зменшення загального часу доставки та логістичних витрат, уникаючи повторення перевантажень, характерних для сценаріїв 1 і 2. Оптимізатор фактично вибудовує стійку мультимодальну конфігурацію, яка мінімізує ризики черг та враховує реальні обмеження пропускну здатності кожного з коридорів.

Узагальнення результатів трьох експериментальних сценаріїв дозволяє оцінити, як різні стратегії реагування на блокування впливають на часові, вартісні та надійнісні характеристики логістичної системи. Для наочності підсумкові значення ключових показників ефективності були зведені у таблицю 1, що демонструє контраст між інерційними, реактивними та оптимізаційними підходами до управління вантажопотоками. Порівняння трьох сценаріїв дає змогу окреслити ключові закономірності функціонування експортної логістики в умовах блокувань та нерівномірного навантаження інфраструктури.

Табл. 1. Узагальнені результати порівняння сценаріїв за ключовими КРІ

Показник (KPI)	Сценарій 1: "Криза" (Блокування)	Сценарій 2: "Наївна диверсифікація"	Сценарій 3: "Оптимізований портфель"
Надійність (Reliability) ¹¹	< 10 %	~ 20–30 %	> 75 %
Середній час циклу (Total Time) ¹²	18,5 днів	12,2 днів	7,1 днів
Середні логістичні витрати (Total Cost) ¹²	€ 3,800 / вантаж	€ 3,100 / вантаж	€ 2,400 / вантаж

Передусім з'ясовано, що реактивні рішення, які базуються на інтуїтивному перенаправленні потоків (Сценарій 2), не ліквідують проблему, а лише зміщують «вузькі місця» на інші напрямки. Перевантаження швидко переходить зі заблокованого польського кордону на словацько-угорські переходи, відтворюючи аналогічний кризовий ефект у новій точці мережі.

Другим суттєвим спостереженням є емерджентний характер утворення черг: навіть без повного блокування, різкі зміни потоків запускають самопосилювальні ефекти накопичення, що погіршують загальну пропускну здатність системи. Це підтверджує, що мережа реагує не лінійно, а через складні взаємодії та зворотні зв'язки між агентами та інфраструктурою.

Оптимізований мультимодальний портфель маршрутів (Сценарій 3) демонструє принципово іншу динаміку. Збалансований розподіл потоків між сухопутними та мультимодальними коридорами забезпечує захист від інфраструктурних обмежень і мінімізує ризик формування нових «вузьких місць». Особливо важливим є внесок Дунайського кластеру, який, навіть попри додаткові витрати на перевалку, здатен поглинати значні обсяги вантажів без переходу в режим перегрузки.

Застосування оптимізаційного підходу забезпечує суттєве поліпшення всіх ключових показників ефективності (Total Time, Total Cost, Reliability), що свідчить про принципову відмінність між раціональною (оптимізованою) та інерційно-реактивною моделями поведінки учасників ринку. Отримані результати демонструють, що мультиагентна модель не лише адекватно відтворює реальні процеси, а й може функціонувати як ефективний інструмент підтримки прийняття рішень у ситуаціях високої невизначеності. У довгостроковій перспективі, інтеграція такої моделі з оперативними даними, зокрема системи «єЧерга» та інформаційних ресурсів АМПУ, відкриває можливість створення «цифрового двійника» експортної логістики України. Це дозволило б здійснювати регулярне стрес-тестування інфраструктури, раннє виявлення ризиків та проактивне управління потоками в кризових сценаріях.

Висновки. Отже, проведене дослідження продемонструвало, що експортна логістика України в умовах блокувань є складною адаптивною системою, чутливою до нерівномірного розподілу потоків та інфраструктурних обмежень.

Застосований гібридний підхід, що поєднує агентно-орієнтоване та дискретно-подієве моделювання, довів свою здатність відтворювати реальну динаміку мережі, включно з емерджентними чергами та нелінійними ефектами.

Порівняння сценаріїв засвідчило, що інерційні та реактивні стратегії не забезпечують стійкості логістичних ланцюгів, тоді як оптимізаційний підхід формує збалансований мультимодальний портфель маршрутів і суттєво підвищує ефективність системи. Отримані результати підтверджують доцільність використання мультиагентного моделювання як інструмента підтримки прийняття рішень в умовах високої невизначеності.

Перспективним напрямом подальших досліджень є створення цифрового двійника експортної логістики України, інтегрованого з оперативними даними, що дозволить здійснювати стрес-тестування інфраструктури, прогнозувати ризики та проактивно управляти потоками у кризових ситуаціях.

Література:

1. World Bank. Ukraine's Transport and Logistics System: Current and Prospective Opportunities and Challenges. Washington, DC: World Bank Group, 2025. 82 p. [Електронний ресурс]. URL: <https://documents1.worldbank.org/curated/en/099061725033525342/pdf/P502442-346a4fd3-882f-46ca-95c9-ce90c0a71619.pdf> (дата звернення: 14.11.2025).
2. Interfax-Україна. Україна планує збільшити експорт через дунайські порти ще на 2–7 млн тонн у 2024 році. [Електронний ресурс]. URL: <https://interfax.com.ua/news/economic/971501.html> (дата звернення: 14.11.2025).
3. The blockade of trucks at the border: Фермери страйкують по всій Європі, а поляки блокують кордон з Україною. [Електронний ресурс]. URL: <https://zaborona.com/fermery-strajkuyut-po-vsij-yevropi-a-polyaky-blokuyut-kordon-z-ukrayinoyu/> (дата звернення: 14.11.2025).
4. еЧерга. Завантаженість пунктів пропуску. Міністерство розвитку громад, територій та інфраструктури України, 2025. [Електронний ресурс]. URL: https://echerha.gov.ua/workload/1/1?country_id=167 (дата звернення: 14.11.2025).
5. Hilletoft P., Lättilä L. Agent Based Decision Support in the Supply Chain Context. *Industrial Management & Data Systems*. 2012. Vol. 112, № 8. P. 1217–1235.
6. Prytula K., Kalat Y., Kurowska-Pysz J., Melnyk M., Maksymenko A., Leshchukh I., Toca C.–V. Study of the functioning of transport and logistics infrastructure for freight transport in the EU–Ukraine border zone. *Journal of Infrastructure, Policy and Development*. 2024. Vol. 8. № 7. P. 1–19. DOI: 10.24294/jipd.v8i7.4494.
7. Roman E.-A., Stere A.-S., Roșca E., Radu A.-V., Codroiu D., Anamaria I. State of the Art of Digital Twins in Improving Supply Chain Resilience. *Logistics*. 2025. Vol. 9. P. 1–3. DOI: 10.3390/logistics9010022.
8. APICS. SCOR Metrics. [Електронний ресурс]. URL: <http://www.apics.org/apics-for-business/benchmarking/scormark-process/scor-metrics?iOS=> (дата звернення: 12.11.2025).
9. Ukrainska Pravda. Ukrainian Border Guard Service reports 2,400 trucks queued at Poland–Ukraine checkpoints. [Електронний ресурс]. URL:

<https://www.pravda.com.ua/eng/news/2024/03/03/7444734/> (дата звернення: 12.11.2025).

10. Лебедєва Л., Шкуропадська Д. Стійкість транспортної логістики України та ЄС. *Зовнішня торгівля: економіка, фінанси, право*. 2024. № 4. С. 108–127. DOI: 10.31617/3.2024(135)07.

References:

1. World Bank. (2025). *Ukraine's transport and logistics system: Current and prospective opportunities and challenges*. Washington, DC: World Bank Group. 82 p. Retrieved November 14, 2025, from <https://documents1.worldbank.org/curated/en/099061725033525342/pdf/P502442-346a4fd3-882f-46ca-95c9-ce90c0a71619.pdf>
2. Interfax-Ukraine. (2024). *Ukraine plans to increase exports through Danube ports by another 2–7 million tonnes in 2024*. Retrieved November 14, 2025, from <https://interfax.com.ua/news/economic/971501.html> [in Ukrainian].
3. *The blockade of trucks at the border: Farmers are striking across Europe, and Poles are blocking the border with Ukraine*. (2024). Retrieved November 14, 2025, from <https://zaborona.com/fermery-strajkuyut-po-vsij-yevropi-a-polyaky-blokuyut-kordon-z-ukrayinoyu/> [in Ukrainian].
4. eCherha. (2025). *Congestion at border crossing points*. Ministry for Communities, Territories and Infrastructure Development of Ukraine. Retrieved November 14, 2025, from https://echerha.gov.ua/workload/1/1?country_id=167 [in Ukrainian].
5. Hilletoft, P., Lättilä, L. (2012). Agent based decision support in the supply chain context. *Industrial Management & Data Systems*, 112(8), 1217–1235. Retrieved November 13, 2025, from <https://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A611310>
6. Prytula, K., Kalat, Y., Kurowska-Pysz, J., Melnyk, M., Maksymenko, A., Leshchukh, I., Țoca, C.-V. (2024). Study of the functioning of transport and logistics infrastructure for freight transport in the EU–Ukraine border zone. *Journal of Infrastructure, Policy and Development*, 8(7), 1–19. <https://doi.org/10.24294/jipd.v8i7.4494>.
7. Roman, E.-A., Stere, A.-S., Roșca, E., Radu, A.-V., Codroiu, D., Anamaria, I. (2025). State of the art of digital twins in improving supply chain resilience. *Logistics*, 9, 1–3. <https://doi.org/10.3390/logistics9010022>.
8. APICS. (n.d.). *SCOR metrics*. Retrieved November 12, 2025, from <http://www.apics.org/apics-for-business/benchmarking/scormark-process/scor-metrics?iOS=>
9. Ukrainska Pravda. (2024). *Ukrainian Border Guard Service reports 2,400 trucks queued at Poland–Ukraine checkpoints*. Retrieved November 12, 2025, from <https://www.pravda.com.ua/eng/news/2024/03/03/7444734/>
10. Lebedieva, L., Shkuropadska, D. (2024). *Resilience of transport logistics of Ukraine and the EU. Foreign Trade: Economics, Finance, Law*, 4, 108–127. [https://doi.org/10.31617/3.2024\(135\)07](https://doi.org/10.31617/3.2024(135)07) [in Ukrainian].

Annotation

Spiridonov V.

Multi-agent approach to optimizing export routes under the risk of blockades at the ukrainian–polish border

The article presents the results of a comprehensive simulation study examining the performance of Ukraine's export logistics system under conditions of border blockages and uneven infrastructure load. The research was conducted using a hybrid modelling approach that integrates agent-based behaviour with discrete-event process flows, enabling the realistic reproduction of interactions between exporters, forwarding agencies, and carriers. The model incorporates all key export corridors – Polish, Slovak, Hungarian, Romanian routes, and the multimodal Danube cluster – allowing for the assessment of cargo flows across diverse transport environments.

Three scenarios were analysed: (1) inertial continuation of routing through blocked Polish checkpoints, (2) reactive redirection of flows to neighbouring land corridors, and (3) an optimized multimodal portfolio generated through the OptQuest engine in AnyLogic. The findings show that both inertial and reactive routing strategies lead to rapid congestion, exponential queue formation, and sharp deterioration of logistics performance indicators. In contrast, the optimized strategy demonstrates a substantial improvement in reliability, delivery time, and overall cost efficiency by balancing flows across land and multimodal routes while accounting for infrastructure limitations.

The study highlights the non-linear and emergent nature of disruptions within transport networks and demonstrates the value of simulation-based decision support for managing export operations under uncertainty. The developed modelling framework provides a foundation for future integration into a digital twin of Ukraine's export logistics system, enabling real-time stress testing and proactive risk management.

Key words: *export logistics, agent-based modelling, discrete-event simulation, border blockage, multimodal transport, optimization, supply chain resilience.*