

ОЦІНКА РИЗИКІВ АВТОПЕРЕВЕЗЕНЬ НЕБЕЗПЕЧНИХ ВАНТАЖІВ В УМОВАХ ВОЄННОГО СТАНУ В УКРАЇНІ: МАРШРУТИЗАЦІЯ ТА СПЕЦІАЛЬНІ РЕЖИМИ СУПРОВОДУ

Стаття присвячена розробці інтегрованої методики оцінки ризиків автоперевезень небезпечних вантажів в умовах воєнного стану в Україні. Обґрунтовано, що традиційні підходи до управління ризиками перевезень, базовані на вимогах ADR, Закону України «Про перевезення небезпечних вантажів» та класичній схемі визначення ризиків, є недостатніми за наявності додаткових воєнних загроз – ракетно-дронових ударів, артилерійських обстрілів, мінування, руйнування дорожньо-транспортної та енергетичної інфраструктури. Запропоновано розширити структуру імовірнісної складової шляхом виокремлення воєнного коефіцієнта загрози W_{war} , який враховує інтенсивність атак, близькість маршруту до лінії фронту, наявність критичних об'єктів і зафіксованих інцидентів уздовж транспортного коридору. Для оцінювання наслідків сформовано багатокритеріальний індекс, що поєднує втрати для життя і здоров'я населення, довкілля та економіки.

Методика інтегрує модифіковану матрицю Хеддона, адаптовану до трьох фаз транспортного процесу (до події, під час, після події) з урахуванням воєнного впливу на людину, транспортний засіб, навколишнє середовище та критичну транспортну інфраструктуру. На її основі поставлено задачу багатокритеріальної маршрутизації, у якій мінімізуються сумарні логістичні витрати та інтегральний ризик маршруту з урахуванням регуляторних обмежень воєнного стану й можливостей супроводу. Окремо запропоновано класифікацію спеціальних режимів руху (базовий, посилений, критичний) залежно від класу небезпеки вантажу, просторово-часового профілю загроз і чутливості територій. Наукова новизна полягає у формалізованому поєднанні модифікованої матриці Хеддона з інтегральною моделлю ризику та багатокритеріальною маршрутизацією з урахуванням воєнних загроз, що дає змогу оцінювати й порівнювати альтернативні маршрути і режими руху небезпечних вантажів у динамічних умовах воєнного стану. Практична цінність роботи полягає у створенні формалізованого інструментарію для органів державної влади, перевізників та експедиторів, який забезпечує обґрунтований вибір маршрутів і режимів супроводу небезпечних вантажів в умовах триваючих бойових дій і під час планування післявоєнного відновлення транспортної системи.

Ключові слова: Автоперевезення небезпечних вантажів; воєнний стан; оцінка ризику; воєнні загрози (W_{war}); маршрутизація перевезень небезпечних вантажів; матриця Хеддона; спеціальні режими супроводу; критична транспортна інфраструктура.

Постановка проблеми. Повномасштабна агресія проти України радикально змінила умови автоперевезень небезпечних вантажів: до традиційних ризиків (стан рухомого складу, дороги, людський фактор) додалися ракетно-дронові удари, обстріли, мінування, руйнування інфраструктури та вимушені об'їзні маршрути. Чинні норми ADR [1], Закону України «Про перевезення небезпечних вантажів» [2] та стандарти ISO 31000 [3], ISO 28000 [4] не містять формалізованого урахування воєнних загроз у розрахунку ризику й виборі маршруту та режиму супроводу. Це створює науково-практичну проблему розроблення інтегрованої методики оцінки ризику автоперевезень небезпечних вантажів з урахуванням специфіки воєнного стану в Україні.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Класичним підходом до кількісної оцінки ризику перевезень небезпечних матеріалів вважається каркас E. Erkut та V. Verter [5], у якому ризик описується моделлю $R=W \cdot M$ з урахуванням просторового розподілу населення й сценаріїв наслідків, що став базою для подальших робіт з маршрутизації НВ. Узагальнений огляд Jian Guo та Cheng Luo [6] систематизує тридцятирічний розвиток моделей ризику для різних видів транспорту, виділяючи ймовірнісні, експозиційні та багатокритеріальні підходи й підкреслюючи потребу в інтегрованій оптимізації маршрутів доставки НВ.

Сучасні дослідження зосереджені на підвищенні точності моделей і роботі з невизначеністю. Н. Ху та співавт. [7] застосовують комбіновану cloud-model для оцінки ризику ДТП із небезпечними хімічними речовинами, що дозволяє формалізувати нечіткі експертні судження. S. Yu [8] та ін. пропонують модель оцінювання ризику автоперевезень НВ у реальному часі із застосуванням машинного навчання, тоді як S. Wang та співавт. [9] поєднують Bow-tie аналіз з ймовірнісним моделюванням для різних типів аварій під час дорожнього транспортування небезпечних хімікатів. Огляд C. Chen та ін. [10] показує, що основна маса робіт фокусується на витоках, пожежах і вибухах у логістичних та промислових сценаріях переважно мирного часу.

В українському та європейському просторі суттєвий внесок зроблено у напрямі організації автоперевезень НВ і побудови критеріїв безпечності маршрутів (аварійність, щільність населення, екочутливість територій), однак із фіксацією умов, близьких до вимог ADR [11] без воєнних загроз. Комплексні моделі оцінки безпеки перевезень в інтегрованих транспортних системах розроблено на рівні дисертаційних досліджень [12], але вони не виокремлюють специфіку небезпечних вантажів у зоні збройного конфлікту. Методичні матеріали з розрахунку ризику НС при транспортуванні зріджених газів залізничним транспортом формують важливу базу (сценарії пожежі, вибуху, модель $R = W \cdot M$), придатну для адаптації до автомобільних перевезень НВ [13].

У нещодавніх українських роботах щодо автоперевезень рідких небезпечних вантажів застосовано матрицю Хеддона для структуризації впливу факторів «людина – транспортний засіб – середовище» та акцентовано пріоритет збереження життя людини при виборі маршруту. Публікації про організацію вантажних перевезень в умовах воєнного стану аналізують руйнування інфраструктури, обмеження руху й дефіцит ресурсів, але питання саме небезпечних вантажів і їх формалізованої ризик-орієнтованої маршрутизації охоплюється лише фрагментарно.

Отже, існує виразна наукова прогалина: бракує моделей, які інтегрують воєнні загрози (обстріли, мінування, руйнування інфраструктури, вимушені об'їзди) у структуру ризику автоперевезень небезпечних вантажів в Україні та поєднують їх з вимогами ADR, національного законодавства й стандартів управління ризиками та безпекою ланцюгів постачання.

Мета дослідження. Метою дослідження є розроблення інтегрованої методики кількісно-якісної оцінки ризику автоперевезень небезпечних вантажів в Україні в умовах воєнного стану з формалізованим урахуванням додаткових воєнних загроз (ракетно-дронові удари, артилерійські обстріли, мінування, руйнування доріг і мостів, відключення енергопостачання), специфіки вимушених об'їзних маршрутів і коридорів безпеки, а також застосування спеціальних режимів маршрутизації та супроводу (конвої, часові «вікна», взаємодія з військовими та підрозділами поліції).

Основний матеріал дослідження. Українські дослідження перебудови логістики в умовах повномасштабної війни демонструють суттєвий зсув вантажопотоків до дунайських портів (Ізмаїл, Рені, Кілія), перенавантаження автомобільних і залізничних прикордонних переходів із країнами ЄС, руйнування портової та дорожньої інфраструктури, різке збільшення часу доставки й логістичних витрат, зокрема через багатоденні черги вантажівок

на кордоні та обмежену пропускну здатність пунктів пропуску [14; 15; 16]. Паралельно міжнародні й національні звіти (ОНЧНР, Світовий банк, профільні аналітичні центри) та оперативні повідомлення інформаційних агентств фіксують системні удари РФ по енергетичній та транспортній інфраструктурі України – енергоблоках, підстанціях, залізничних вузлах, нафтобазах, портових об'єктах і депо Укрзалізниці, що безпосередньо впливають на надійність, безпеку руху та доступність окремих маршрутів [17].

З урахуванням цих даних ключова методологічна помилка, якої легко припуститися, полягає в тому, щоб розглядати ризик автоперевезень небезпечних вантажів у воєнний період як «звичайний» транспортний ризик, лише скоригований на складні умови руху (погіршення стану доріг, дефіцит палива, зростання інтенсивності руху). Насправді ж ризик формує суперпозиція двох принципово різних, але взаємопов'язаних блоків:

– базових транспортних ризиків, пов'язаних із дотриманням ПДР, технічним станом автотранспортних засобів і цистерн, кваліфікацією та психофізіологічним станом водія, особливостями дорожньо-кліматичних умов тощо;

– воєнно-інфраструктурних загроз, до яких належать ракетно-дронові та артилерійські удари по транспортних і енергетичних об'єктах, руйнування й тимчасова непридатність доріг та мостів, мінування місцевості, кібератаки на системи управління інфраструктурою, масштабні відключення електроенергії, що порушують роботу світлофорів, залізничної автоматики, засобів зв'язку та навігації [18].

1. Отже, доцільно прямо ідентифікувати структуру сукупного ризику автоперевезень небезпечних вантажів у воєнний період у вигляді:

$$R = R_{tr} + R_{war}, \quad (1)$$

де R_{tr} – інтегральний компонент «звичайних» транспортних ризиків, пов'язаних із технічним станом автотранспортних засобів і цистерн, дотриманням ПДР, людським фактором, дорожньо-кліматичними умовами тощо, як це прийнято в довоєнних дослідженнях;

R_{war} – додатковий компонент воєнно-інфраструктурних загроз, зумовлений ракетно-дроновими ударами, артилерійськими обстрілами, мінуванням, руйнуванням інфраструктури, кібератаками та іншими наслідками війни, відображений у змінах логістичних маршрутів і доступності окремих ділянок мережі.

У подальшому R розглядається як агрегований результат оцінки ризику окремих маршрутів k , для яких пропонується використовувати інтегральний показник ризику:

$$R_k = W_k \cdot M_k, \quad (2)$$

де W_k – інтегральна ймовірність реалізації небезпечної події (ДТП, розгерметизація, пожежа, вибух, воєнне враження) на маршруті k ;

M_k – відносні наслідки (гуманітарні, екологічні, економічні) для маршруту k .

Загальний ризик системи або регіону може бути представлений як сума маршрутних ризиків:

$$R = \sum k \cdot R_k = \sum k \cdot (W_k \cdot M_k). \quad (3)$$

Для узгодження співвідношень (1) і (3) доцільно декомпонувати інтегральні показники W_k та M_k на транспортну та воєнну складові; на рівні ймовірності це реалізується через урахування чотирьох груп факторів:

$$W_k = a_1 \cdot W_{tech,k} + a_2 \cdot W_{human,k} + a_3 \cdot W_{env,k} + a_4 \cdot W_{war,k}, \quad (4)$$

де $W_{tech,k}$ – ймовірність відмови/несправності автотранспортного засобу, автоцистерни або обладнання на маршруті k ;

$W_{human,k}$ – ймовірність помилок водія/екіпажу (порушення ПДР, втома, стрес тощо);

$W_{env,k}$ – вплив дорожньо-кліматичних умов, щільності забудови, наявності екочутливих об'єктів;

$W_{war,k}$ – воєнно-інфраструктурний компонент, що відображає інтенсивність обстрілів, наявність мінування, близькість до лінії фронту, частоту атак на об'єкти інфраструктури вздовж маршруту k за заданий період

a_1, a_2, a_3, a_4 – вагові коефіцієнти, що відображають відносну важливість відповідних груп факторів.

Коефіцієнти a_1, a_2, a_3, a_4 є нормованими вагами важливості відповідних груп факторів (технічних, людських, середовищних, воєнних), для яких прийнято умову $a_1 + a_2 + a_3 + a_4 = 1$, $a_i \geq 0$. Їхні значення визначаються за процедурою аналізу ієрархій (АНР) на основі парних порівнянь, проведених з групою експертів (представники перевізників, експедиторів, аварійно-рятувальних служб, органів державної влади, наукової спільноти), з подальшою перевіркою узгодженості суджень. Вибір ваг також узгоджено з нормативними пріоритетами державної політики безпеки (пріоритет збереження життя і здоров'я людей, захист довкілля, мінімізація економічних втрат).

У такій інтерпретації частина $W_{tr,k} = a_1 \cdot W_{tech,k} + a_2 \cdot W_{human,k} + a_3 \cdot W_{env,k}$ репрезентує внесок «звичайних» транспортних небезпек, тоді як $a_4 \cdot W_{war,k}$ – власне воєнний внесок у ймовірність події; їхній спільний вплив на R_k формує маршрутний аналог R_{tr} і R_{war} . Сумуючи R_k за всіма маршрутами, одержуємо:

$$R_{tr} = \sum k (W_{tr,k} \cdot M_k) = \sum k ((a_1 \cdot W_{tech,k} + a_2 \cdot W_{human,k} + a_3 \cdot W_{env,k}) \cdot M_k) \quad (5)$$

$$R_{war} = \sum k (W_{war,k} \cdot M_k) = \sum k (a_4 \cdot W_{war,k} \cdot M_k) \quad (6)$$

Відповідно, R_{war} на макрорівні є агрегованим ефектом $W_{war,k}$ для всіх розглянутих маршрутів.

2. Узгодимо систему показників. Показники ймовірності W . Для кожної ділянки і маршруту k визначаються часткові показники, на основі яких формуються компоненти $W_{tech,k}, W_{human,k}, W_{env,k}, W_{war,k}$. Структура компонентів формується за такими складовими:

– I_1 (аварійність з НВ) – середній рівень ДТП з участю небезпечних вантажів на ділянці і (якщо статистика доступна, або використання репрезентативних коефіцієнтів, напрацьованих у роботах з оцінки ризику транспортування НВ, наприклад, Erkut [5], Guo [6] та ін.);

– I_2 (стан дороги) – індекс технічного стану дорожнього полотна (наявність вирв, тимчасових переправ, обмеження швидкості через руйнування тощо);

– I_3 (інтенсивність руху) – показник транспортного потоку, що визначає ймовірність багатотранспортних зіткнень;

– I_4 (людський фактор) – індикатор, що враховує рівень підготовки водіїв ADR, дотримання режимів праці та відпочинку, а також підвищене психологічне навантаження, характерне для зон, наближених до фронту;

– I_5 (воєнний індекс загрози) – інтегральний показник воєнної небезпеки на ділянці і, який включає частоту сигналів повітряної тривоги, зафіксовані випадки ракетно-дронових атак або артилерійських обстрілів транспорту чи транспортної/енергетичної інфраструктури, а також наявність мінування.

На основі цих показників формується зважена сума або мультиплікативний індекс W_k ; конкретні вагові коефіцієнти доцільно визначати з використанням методу аналізу ієрархій та погоджувати з експертами, представниками органів державної влади й операторів ринку.

3. Показник M_k доцільно представити у вигляді агрегованого індексу:

$$M_k = \alpha \cdot H_k + \beta \cdot E_k \cdot \gamma \cdot C_k, \quad (7)$$

де H_k – очікувані гуманітарні наслідки (число потенційно уражених осіб у разі аварії або влучання боєприпасу у транспортний засіб із НВ);

E_k – потенційний екологічний збиток (чутливість території: близькість до водозаборів, заповідних зон, сільськогосподарських угідь, рівень ґрунтових вод тощо);

C_k – економічний збиток (вартість вантажу й транспортного засобу, витрати на відновлення інфраструктури, непрямі втрати ланцюга постачання).

Коефіцієнти α , β , γ задаються політикою безпеки на державному та корпоративному рівнях і відображають пріоритети: як правило, найбільше значення надається збереженню життя й здоров'я людей (α), що узгоджується з положеннями українського законодавства та рекомендаціями стандартів ISO 28000:2022 [3] та ISO 31000:2018 [4] щодо ризик-орієнтованого управління.

4. Адаптація матриці Хеддона до умов воєнного стану. Класична матриця Хеддона використовується як логічний каркас для систематизації факторів ризику за трьома фазами розвитку події («до події – під час події – після події») і трьома основними групами елементів системи («людина – транспортний засіб – середовище»). У контексті автоперевезень небезпечних вантажів в умовах воєнного стану така структура виявляється недостатньою, оскільки не відображає специфічного, просторово-часово варіативного впливу воєнних загроз.

Тому пропонується модифікувати матрицю Хеддона шляхом введення додаткового виміру «воєнний вплив», який пронизує кожен етап фази й кожен елемент системи. Фактично формується чотиривимірна логічна структура, у якій кожна клітинка описує конкретну комбінацію: «фаза події – елемент системи – воєнний вплив – тип заходу». Це дозволяє чітко розмежувати, які ризики відносяться до «класичних» транспортних (R_{tr}), а які генерує воєнне середовище (R_{war}), і, відповідно, до яких компонентів W_k та M_k вони належать.

а) Воєнний вплив у фазі «до події». На етапі до виникнення інциденту воєнний вимір включає:

- ризик потрапляння маршруту в зону обстрілу чи мінування;
- блокування або різке обмеження пропускної здатності ключових ділянок (мости, вузли, об'їзди);
- цілеспрямовані удари по об'єктах критичної інфраструктури (нафтобази, зернові термінали, залізничні вузли), що змушують змінювати маршрут або часові вікна руху.

На рівні W_k ці фактори, через індекс $W_{war,k}$, збільшують інтегральну ймовірність реалізації події, тоді як на рівні M_k (особливо H_k та E_k) визначають потенційний масштаб наслідків у разі, якщо подія відбудеться саме в зоні високої воєнної активності.

б) Воєнний вплив у фазі «під час події». У фазі безпосередньої події (ДТП, розгерметизація, пожежа, вибух, влучання боєприпасу) воєнний вимір охоплює:

- ризик ураження колони або окремого автотранспортного засобу ракетним, дронним чи артилерійським ударом;
- руйнування мостів і шляхопроводів у момент проходження колони або окремого автотранспортного засобу;
- втрату керованості чи помилки водія через паніку, відсутність зв'язку, навмисне чи ненавмисне втручання у навігаційні системи;
- вторинні аварії на вже пошкоджених ділянках, де дорожні умови раптово погіршуються.

На цьому етапі $W_{war,k}$ прямо модифікує компонент W_k , пов'язаний із фазою «під час події», тоді як M_k фіксує перерозподіл наслідків (наприклад, збільшення H_k через масовану присутність цивільного населення або E_k через розташування колони поблизу водозаборів чи заповідних територій).

в) Воєнний вплив у фазі «після події». Після настання інциденту воєнний вимір проявляється через:

- ускладнення доступу аварійно-рятувальних служб до місця події (зруйновані мости, заблоковані дороги, активні бойові дії в районі);
- ризик повторних обстрілів місця аварії або маршрутів підходу рятувальників;
- локальну відсутність медичного забезпечення, пожежної техніки, засобів локалізації викиду НВ через пошкодження баз і складів;
- затримки з евакуацією населення та дегазацією/деконтамінацією територій.

У цій фазі $W_{war,k}$ та M_k взаємодіють таким чином, що, навіть якщо первинна подія має помірну ймовірність, сукупні наслідки можуть істотно зростати через воєнні обмеження на реагування й відновлення, що напряду впливає на компонент R_{war} .

г) «Матриця заходів» як місток між R_{tr} , R_{war} і R_k . Розширена матриця Хеддона дає можливість побудувати «матрицю заходів» для кожного елемента ризику – від профілактики до реагування та відновлення. Для кожної клітинки (фаза – елемент – воєнний вплив) формуються конкретні організаційні та технічні заходи, які:

- або зменшують відповідний компонент ймовірності ($W_{tech,k}$, $W_{human,k}$, $W_{env,k}$, $W_{war,k}$);
- або обмежують масштаб наслідків (H_k , E_k , C_k у складі M_k).

До профілактичних заходів належать, зокрема:

- раціональний вибір маршруту з мінімізацією сумарного $W_{war,k}$ та $W_{env,k}$ (уникнення густонаселених і найбільш уражуваних ділянок);
- посилена підготовка водіїв (ADR + тренінги з дій в умовах обстрілів та втрати зв'язку);
- організація супроводу (поліція, військові підрозділи, використання броньованих ТЗ для найбільш небезпечних ділянок);
- попереднє погодження коридорів руху, часових «вікон» та обмежень швидкості з військовими адміністраціями й ДСНС.

До заходів реагування та відновлення належать:

- детально відпрацьовані плани евакуації населення й персоналу на випадок аварії чи воєнного враження ТЗ з НВ;
- резервні схеми зв'язку й оповіщення (супутниковий зв'язок, дублюючі канали), які зменшують час реакції;
- алгоритми узгоджених дій між перевізником, експедитором, ДСНС, Нацполіцією, військовими адміністраціями та медичними закладами;
- створення локальних резервів засобів локалізації викиду НВ і техніки для ліквідації наслідків в зонах підвищеного $W_{war,k}$.

Транспортні технології

У термінах моделі це означає, що кожен захід можна явно «прив'язати» до конкретного елемента структури W_k (через зменшення відповідного індексу I_1-I_5) або M_k (через зниження H_k , E_k чи C_k). Відповідно, матриця Хеддона виконує роль концептуального «містка» між макрорівневою структурою ризику (R_{tr} , R_{war}) та маршрутним показником R_k , допомагаючи прозоро показати, які саме управлінські рішення знижують який компонент ризику.

Приклад адаптації матриці Хеддона наведено у таблиці 1.

Таблиця 1 – Матриця Хеддона з урахуванням умов воєнного стану

Фаза події	Елемент системи	Воєнний вплив / ризик	Вплив на модель (W_k , M_k , R_{tr} , R_{war})	Приклади заходів (профілактика, реагування, відновлення)
До події	Людина (водій, персонал)	Часті повітряні тривоги на маршруті, ризик обстрілів поблизу траси	Підвищення $W_{human,k}$ та $W_{war,k}$ через стрес, втому, ризик помилок під час руху в умовах тривоги; зростання внеску в R_{war}	Поглиблена підготовка водіїв (ADR + тренінги дій під час обстрілів), скорочення тривалості змін, відбір водіїв зі стійкістю до стресу, чіткі інструкції щодо зупинки/укриття АТЗ
До події	Транспортний засіб (ТЗ, цистерна, обладнання)	Можливість цілеспрямованих ударів по колонах, стоянках, базах	Зростання $W_{tech,k}$ та $W_{war,k}$ (ризик ураження стоянки/бази, необхідність посиленого контролю технічного стану та захисту ТЗ); вплив на R_{war}	Розміщення ТЗ та цистерн поза зонами підвищеного $W_{war,k}$, посилений техогляд перед виїздом, використання додаткового захисту (екрани, бронепанелі) на найризикованіших ділянках
До події	Середовище (маршрут, інфраструктура, забудова)	Потрапляння маршруту в зони обстрілів, мінування, руйнування мостів/доріг	Підвищення $W_{env,k}$ та $W_{war,k}$; у M_k зростають H_k та E_k (густонаселені райони, чутливі екосистеми); збільшується внесок у R_{war}	Оптимізація маршруту з мінімізацією $W_{war,k}$ та $W_{env,k}$ (обхід зон активних боїв, великих міст), заздалегідь погоджені коридори руху, часові «вікна» з військовими адміністраціями
Під час події	Людина	Паніка водія під час обстрілу, втрата орієнтації через відсутність зв'язку/навігації	Різке зростання $W_{human,k}$ у момент події; збільшення ймовірності ДТП, неправильних дій; опосередковане збільшення W_k і, відповідно, R_k (здебільшого R_{war})	Тренінги дій під обстрілом, чіткі алгоритми «зупинка – укриття – відхід», дублюючі канали зв'язку, інструкції щодо роботи без GPS/мобільного зв'язку
Під час події	Транспортний засіб (ТЗ, цистерна, обладнання)	Влучання босприпасу в автоцистерну або колону, руйнування мосту в момент проходу	Зростання $W_{war,k}$ у фазі події; M_k зростає через можливість одночасного ураження кількох ТЗ (H_k , E_k , C_k); суттєвий внесок у R_{war}	Формування менших колон з інтервалами між ТЗ, обмеження швидкості на критичних ділянках, використання більш захищених ТЗ на ділянках з максимальним $W_{war,k}$, оперативний моніторинг обстановки
Під час події	Середовище (маршрут, інфраструктура, забудова)	Вторинні аварії на пошкоджених ділянках (воронки, завали), пошкоджені об'їзди	Підвищення $W_{env,k}$ (небезпечні дорожні умови); M_k зростає через ризик залучення додаткових учасників ДТП; вплив на R_{tr} і R_{war}	Оперативне оновлення карт небезпечних ділянок, заборона руху через щойно уражені об'єкти, постійна координація з дорожніми службами та військовими
Після події	Людина / населення	Ускладнена евакуація через обстріли, блокування доріг	Значне зростання H_k (більша кількість потенційно уражених осіб, довший час перебування в зоні ураження); внесок у M_k , переважно R_{war}	Плани евакуації з альтернативними маршрутами, попереднє інформування населення, залучення місцевих органів влади й волонтерів до системи оповіщення
Після події	Середовище (маршрут, інфраструктура, забудова)	Повторні обстріли місця аварії, руйнування мостів/доріг, відсутність доступу служби ДСНС	Зростання E_k (довготривале забруднення, неможливість швидкої локалізації викиду НВ), додатковий внесок у R_{war} ; можливий ріст C_k через більш витрати на відновлення	Створення резервних баз техніки та сорбентів поза зоною високого $W_{war,k}$, планування альтернативних шляхів доступу до потенційних місць аварій, попереднє розміщення аварійно-рятувальних підрозділів
Після події	Служби реагування (ДСНС, медици, поліція, військові)	Неможливість або затримка прибуття через бойові дії, зруйновані мости, мінування	Через $W_{war,k}$ збільшується час реагування; у M_k зростають H_k та C_k (більше жертв, більш економічні втрати); посилення R_{war}	Детально відпрацьовані міжвідомчі алгоритми дій, резервні схеми зв'язку та оповіщення, попереднє узгодження збройного прикриття для рятувальних операцій, тренування спільних дій служб

5. Спеціальні режими маршрутизації автоперевезень НВ у воєнний період

Умови воєнного стану трансформують задачу вибору маршрутів перевезення небезпечних вантажів із «класичної» задачі безпеки та ефективності в задачу управління

ризиком для системи подвійного призначення (цивільної й оборонної логістики). Запропонований підхід виходить із того, що спеціальні режими маршрутизації повинні одночасно:

1. відповідати базовим вимогам ADR і національного законодавства;
 2. інтегрувати додаткові воєнні критерії на рівні моделі ризику R_k ;
 3. бути формалізованими в оптимізаційній постановці (мінімізація Z з урахуванням λ).
- 5.1. Класичні критерії вибору маршруту

У мирний час основою для формування маршрутів автоперевезень НВ є вимоги Європейської угоди про міжнародне дорожнє перевезення небезпечних вантажів (ADR) [1] та Закону України «Про перевезення небезпечних вантажів» № 1644-III [2], які визначають загальні принципи безпеки, організаційні та технічні вимоги до учасників перевезення і транспортних засобів. На основі цих документів, а також на підставі наказу МВС України № 656 [19], що затвердив, зокрема, Правила дорожнього перевезення небезпечних вантажів і Порядку погодження маршруту руху, формуються такі ключові критерії:

–Мінімізація контакту з густонаселеними та екологічно чутливими районами. Цей критерій впливає з загальної мети мінімізувати ризик для населення, майна й довкілля, закладеної як у ADR, так і в європейських керівництвах із перевезення небезпечних вантажів [1; 20].

–Обмеження руху через об'єкти підвищеного ризику (тунелі, мости, гідротехнічні споруди). ADR передбачає спеціальні категорії тунелів і пов'язані з ними обмеження для певних класів небезпечних вантажів; національні НПА деталізують вимоги щодо руху через мости, гідротехнічні споруди та інші критичні об'єкти [20].

–Обов'язкове погодження маршруту з Національною поліцією. Наказ МВС № 656 визначає Порядок погодження маршруту руху транспортного засобу під час дорожнього перевезення небезпечних вантажів (у т.ч. із урахуванням ADR 1.9.3), що є обов'язковим для суб'єктів господарювання, за винятком Збройних Сил України [19].

–Темпоральні та експлуатаційні обмеження. До класичних критеріїв належать: заборона або обмеження руху в певні години (нічний час, години «пік»), вимоги до швидкісного режиму, обмеження руху за несприятливих погодних умов, а також виконання спеціальних вимог щодо зупинок і стоянок НВ, передбачених національними правилами та Законом № 1644-III.

Ці критерії задають «базову огорожувальну рамку» безпеки й формують транспортний компонент ризику R_{tr} у структурі $R = R_{tr} + R_{war}$.

5.2. Воєнно-специфічні критерії

Повномасштабна агресія РФ проти України принципово змінює умови функціонування транспортної системи. Масовані ракетно-дронові удари по енергетичній й транспортній інфраструктурі (газотранспортні об'єкти, залізничні вузли, порти, мости, депо) регулярно фіксуються в офіційних звітах і міжнародних інформаційних повідомленнях [21]. Це означає, що «звичайні» критерії маршрутизації є необхідною, але недостатньою умовою безпеки.

Додатково вводяться воєнно-специфічні критерії, які формують $W_{war,k}$ та частково модифікують M_k :

- Відстань від лінії фронту та основних векторів ураження. Маршрути повинні проектуватися з урахуванням просторової конфігурації фронту, дальності дії артилерії та ракетних систем, а також типових напрямків ударів по транспортній інфраструктурі. Віддалення маршруту від лінії зіткнення й зон регулярних обстрілів знижує $W_{war,k}$;

- Частота повітряних тривог та історія атак уздовж маршруту. Дані про повітряні тривоги та задокументовані атаки по залізничних вузлах, нафтобазах, логістичних хабах, мостах та

інших об'єктах уздовж маршруту (у т.ч. за відкритими джерелами) використовуються для побудови індексу воєнної загрози $W_{war,k}$ [22];

- Наявність альтернативних об'їзних шляхів. Маршрут вважається прийнятним лише за наявності заздалегідь визначених і технічно придатних об'їзних варіантів на випадок раптового перекриття основної траси внаслідок обстрілу, руйнування мосту, мінування тощо. Це вимога не тільки безпекова, але й прямо пов'язана з гарантуванням доставки вантажу (балансові обмеження моделі);

- Можливість супроводу та наявність безпечних точок зупинки. Критично важливою є можливість залучення підрозділів Нацполіції, військової комендатури, конвоювання на окремих ділянках, а також наявність безпечних майданчиків для екстреної зупинки й укриття НВ (на відстані від житлової забудови, з можливістю маневру й укриття ТЗ). Ці фактори безпосередньо впливають як на $W_{war,k}$ (зменшуючи ймовірність успішного ураження), так і на M_k (зменшуючи потенційні наслідки).

У сукупності воєнно-специфічні критерії формують основу спеціальних режимів маршрутизації (базовий / посилений / критичний), де перехід до більш жорсткого режиму означає підвищення вимог до супроводу, обмежень часу руху та рівня узгодження з військовими адміністраціями, а також зміщення λ у бік більшої чутливості до ризику (див. нижче).

5.3. Математична постановка задачі маршрутизації

Для формалізації задачі вибору маршрутів пропонується модель типу «вартість + ризик», у якій мінімізується узагальнений показник:

$$Z = \sum k(C_k \cdot x_k) + \lambda \cdot \sum k(R_k \cdot x_k) \rightarrow \min, \quad (8)$$

за умов:

- виконання балансових обмежень (доставка заданих обсягів НВ до пунктів призначення);

- дотримання обмежень пропускної здатності ділянок (максимальний потік НВ через кожну дугу транспортної мережі);

- виконання регламентаційних обмежень АDR і національних нормативно-правових актів (заборонені ділянки, тунелі/мости певних категорій, заборона руху в задані інтервали часу, обмеження руху в темний час доби, погодження маршрутів з Нацполіцією згідно з наказом № 656).

де: C_k – приведені логістичні витрати на маршруті k (пальне, час у дорозі, плата за проїзд, витрати на супровід тощо);

R_k – інтегральний ризик маршруту k , який у попередніх розділах подано як $R_k = W_k \cdot M_k$, з урахуванням $W_{war,k}$ у структурі W_k ;

x_k – змінна вибору маршруту (бінарна – «маршрут k використовується / не використовується» або, в задачах потокового типу, неперервна – частка потоку на маршруті k);

λ – коефіцієнт «вартісної чутливості до ризику», що відображає пріоритет безпеки відносно економії витрат і задається політикою держави чи компанії (для критичних перевезень НВ у зоні підвищеного $W_{war,k}$ коефіцієнт «вартісної чутливості до ризику» може бути значно більшим, ніж для тилових ділянок).

У такій постановці:

- перший доданок $\sum k(C_k \cdot x_k)$ представляє класичну транспортну задачу мінімізації витрат;

– другий доданок $\lambda \cdot \sum k(R_k \cdot x_k)$ вводить ризик як квазі-вартісний компонент, що дозволяє чисельно «штрафувати» маршрути з високим значенням R_k , особливо за умов високого $W_{war,k}$.

Приклад інтерпретації λ :

– $\lambda = 0$ відповідає суто економічному критерію (мінімум вартості, ігноруючи ризик) – у воєнний період такий режим практично неприйнятний для НВ;

– середні значення λ відображають компроміс між економією та безпекою (наприклад, для тилових маршрутів з низьким $W_{war,k}$);

– великі значення λ характерні для «критичних» режимів, коли навіть помірна економія витрат на тлі підвищеного ризику R_k вважається неприйнятною (перевезення НВ поблизу лінії фронту, через вузли, що часто зазнають ударів).

Вбудування класичних і воєнно-специфічних критеріїв у зазначену модель дозволяє:

1. формально відобразити вимоги ADR і національного законодавства через систему обмежень;

2. віднести воєнні фактори до структури R_k (через $W_{war,k}$ та компоненти M_k), тим самим виділяючи R_{war} в агрегованому ризику;

3. керувати «жорсткістю» спеціального режиму маршрутизації через параметр λ та набір дозволених (або заборонених) маршрутів.

6. Спеціальні режими супроводу та організації руху

1. Концептуальна основа спеціальних режимів супроводу

Міжнародні стандарти та політики задають рамку, в межах якої доцільно формалізувати рівні супроводу:

–ISO 28000:2022 [2] визначає вимоги до системи управління безпекою ланцюга постачання (SeMS), включно з транспортною складовою, як безперервний цикл «планування – впровадження – перевірка – вдосконалення» для безпекових ризиків.

–ISO 31000:2018 [3] задає принципи ризик-орієнтованого управління (ідентифікація, аналіз, оцінювання, оброблення та моніторинг ризиків), де вибір режиму супроводу є конкретним інструментом «оброблення ризику» (risk treatment).

–ADR 2023 [1], частина 1.10, вводить поняття «security provisions» для перевезень небезпечних вантажів, включно з посиленими заходами охорони для high consequence dangerous goods і вимогами до планів безпеки.

–Звіт спільної робочої групи ЄС–НАТО з питань стійкості критичної інфраструктури за 2023 рік [23] підкреслює необхідність поетапного посилення заходів безпеки й стійкості в енергетичному, транспортному, цифровому та космічному секторах.

У статті ці положення інтерпретуються як теоретична основа для побудови трирівневої системи режимів супроводу (базовий – посилений – критичний), прив'язаних до інтегрального ризику маршруту $R_k = W_k \cdot M_k$ та поділу $R = R_{tr} + R_{war}$.

2. Режими супроводу як інструмент управління інтегральним ризиком маршруту

а) Базовий режим. Зміст цього режиму узгоджується з ADR і національним законодавством:

–одиначний рух АТЗ з НВ за погодженим маршрутом відповідно до ADR [1] та Закону України «Про перевезення небезпечних вантажів» [2];

–виконання вимог до погодження маршруту з Національною поліцією згідно Наказу МВС № 656 [19] і до дорожніх обмежень;

–постійний супутниковий моніторинг, зв'язок із диспетчером і черговими органами.

Базовий режим застосовується тоді, коли воєнний компонент ризику $W_{war,k}$ є низьким, а інтегральний ризик маршруту R_k разом із наслідковою складовою M_k не перевищують базовий

граничний рівень $R_{crit(1)}$, під яким у роботі розуміється нормативно чи політично встановлене порогове значення R_k , за якого транспортний компонент R_{tr} домінує над воєнним R_{war} і достатнім вважається застосування стандартних (довоєнних) заходів безпеки..

б) Посилений режим. Зміст режиму узгоджений із підвищеними вимогами до безпеки у ADR 1.10 і рекомендаціями галузевих керівництв:

- рух у складі конвою кількох ТЗ з НВ, із включенням 1–2 порожніх ТЗ як «екранів» для рознесення ризику та/або формування захисної конфігурації;
- супровід патрулями Національної поліції та/або військової комендатури;
- заборона зупинок поза завчасно погодженими безпечними майданчиками, достатньо віддаленими від густонаселених районів та екочутливих об'єктів;
- письмовий план дій при оголошенні тривоги, а саме алгоритм переходу на укриту ділянку, припинення вантажних операцій, віддалення від об'єктів критичної інфраструктури.

Посилений режим у моделі застосовується, коли інтегральний ризик маршруту R_k потрапляє до проміжного інтервалу $R_{crit(1)} \leq R_k < R_{crit(2)}$ внаслідок зростання $W_{war,k}$ (часті повітряні тривоги, епізодичні удари по інфраструктурі) та/або M_k (підвищена щільність забудови). Запроваджені заходи супроводу спрямовані на зниження $W_{war,k}$ (зменшення ймовірності успішної атаки чи втручання) і частково $W_{human,k}$ (ризик помилок водія в стресових умовах), а також на обмеження M_k через використання контрольованих, заздалегідь погоджених місць зупинки.

в) Критичний режим. Зміст режиму для високонебезпечних вантажів і маршрутів, що проходять через критичні зони:

- застосовується до вантажів високого класу небезпеки (наприклад, деякі вибухові речовини або токсичні інгаляційно небезпечні хімікати), а також до маршрутів через/поруч із ключовими об'єктами критичної інфраструктури (енергетика, великі транспортні вузли), відповідно підходів ЄС/НАТО [23] до стійкості критичної інфраструктури.
- рух лише у заздалегідь узгоджені «тихі вікна» мінімальної воєнної активності;
- попередня перевірка/«очищення» маршруту (обмеження/заборона руху інших НВ, контрольна оцінка стану мостів, шляхопроводів, ключових ділянок);
- включення перевезення до планів цивільного захисту відповідного регіону, заздалегідь визначені сили й засоби ДСНС, медичних служб, поліції, військових адміністрацій.

У моделі критичний режим відповідає випадкам, коли інтегральний ризик маршруту $R_k \geq R_{crit(2)}$ чи коли навіть помірні значення W_k поєднуються з дуже високими M_k (насамперед H_k та E_k) для густонаселених або екочутливих територій, а на рівні цільової функції $Z = \sum_k (C_k \cdot x_k) + \lambda \cdot \sum_k (R_k \cdot x_k)$ це відображається встановленням високого значення λ (максимальна чутливість до ризику) та запровадженням суворих обмежень щодо допустимих маршрутів.

г) Цифрова підтримка спеціальних режимів має бути проведена за допомогою:

– Системи моніторингу й підтримки рішень. Tomasoni та співавт. [24] описують ІКТ-систему, що в реальному часі:

- ідентифікує ТЗ з НВ на дорогах;
- відстежує їх рух;
- будує потенційні зони ураження у разі ДТП, з урахуванням конкретного продукту.

Подібні рішення можуть бути адаптовані до українських умов для:

- онлайн-обчислення W_k та R_k для кожного активного маршруту;
- автоматичного сповіщення диспетчерів про зміну $W_{war,k}$ (наприклад, нові удари по інфраструктурі, які фіксують міжнародні інформаційні агентства і національні органи);
- рекомендацій щодо переходу з базового на посилений/критичний режим супроводу.

– Інтеграція даних про воєнні загрози. Дані, що використовуються для оцінки $W_{war,k}$, можуть включати:

- офіційні аналітичні матеріали щодо стійкості критичної інфраструктури (CER Directive [25], аналітичні записки НІСД [26]), які класифікують об'єкти та регіони за рівнем загроз;
- інформацію про атаки на енергетичну й транспортну інфраструктуру (портова, залізнична, енергетична) з перевірених джерел.

Ці набори даних можуть бути інтегровані в ГІС-модуль системи маршрутизації НВ, що дозволяє просторово-часову оцінку $W_{war,k}$ для кожної дуги транспортної мережі.

– Узгодження корпоративних SeMS із державними системами. Корпоративні системи управління безпекою за ISO 28000 (SeMS) логічно інтегруються з:

- загальною рамкою управління ризиками за ISO 31000 (на рівні політики компанії);
- державною системою захисту критичної інфраструктури України, де стійкість визначається як здатність протистояти й відновлюватися після навмисних атак, техногенних аварій і природних загроз.

Дана методика може бути застосована як на мікро- так і на макрорівні.

Концептуальний приклад застосування методики. Для ілюстрації практичного застосування запропонованої методики розглянемо узагальнений, концептуальний сценарій маршрутизації автоперевезень небезпечних вантажів у воєнний період.

Розглядається перевезення рідкого небезпечного вантажу класу 3 (паливо) з нафтобази у відносно безпечному (тиловому) західному регіоні до енергетичного об'єкта в прифронтовій області. На етапі планування формуються щонайменше два альтернативні маршрути:

- Маршрут M_1 : короткий за протяжністю, проходить поблизу кількох об'єктів енергетичної та транспортної інфраструктури, які в минулому вже піддавалися ракетно-дроновим ударам;
- Маршрут M_2 : довший, з кращими дорожніми умовами та меншою щільністю населення, але з окремими ділянками потенційного мінування, віддаленими від великих населених пунктів.

На першому кроці для кожного маршруту k визначаються часткові індекси $W_{tech,k}$, $W_{human,k}$, $W_{env,k}$ на основі технічного стану АТЗ і дороги, режимів праці та підготовки водіїв, характеристик забудови й екочутливості території вздовж маршруту. Далі, з урахуванням наявної інформації про воєнні загрози (частота повітряних тривог, історія атак на інфраструктуру, характер загроз для об'єктів уздовж траси), формується інтервальна або експертна оцінка $W_{war,k}$. На основі даних щодо чисельності населення в прифронтових громадах, розташування водозаборів, сільськогосподарських земель, об'єктів енергетики та вартості вантажу визначається індекс наслідків M_k , який агрегує гуманітарні (H_k), екологічні (E_k) та економічні (C_k) компоненти.

На другому кроці для кожного маршруту обчислюється інтегральний показник ризику $R_k = W_k \cdot M_k$, де W_k побудовано як агрегований індикатор із урахуванням транспортних ($W_{tech,k}$, $W_{human,k}$, $W_{env,k}$) та воєнного ($W_{war,k}$) компонентів. Для M_1 , як правило, виявляються вищі значення $W_{war,1}$ та M_k через більшу насиченість об'єктами критичної інфраструктури та вищу щільність населення поблизу потенційно уражуваних вузлів; для M_2 – нижчі значення $W_{war,2}$ та/або M_k , хоча логістичні витрати C_2 є більшими.

На третьому кроці в рамках оптимізаційної моделі $Z = \sum_k (C_k \cdot x_k) + \lambda \cdot \sum_k (R_k \cdot x_k)$ проводиться порівняльний аналіз альтернатив: за фіксованого рівня «чутливості до ризику» λ (визначеного політикою держави або компанії) обирається маршрут, що мінімізує Z . При достатньо великому λ (пріоритет безпеки над мінімізацією витрат) модель віддає перевагу M_2 , незважаючи на більшу довжину та вартість, оскільки внесок $\lambda \cdot R_1$ для M_1 виявляється неприйнятно великим.

На четвертому кроці для обраного маршруту (наприклад, M_2) встановлюється відповідний спеціальний режим супроводу. Якщо розрахований R_2 лежить у проміжному інтервалі $R_{crit(1)} \leq R_2 < R_{crit(2)}$, рішенням може бути посилений режим (конвой, супровід

поліції/військової комендатури, контрольовані місця зупинок, план дій при тривозі). Якщо ж навіть для M_2 значення R_2 наближається до/або перевищує $R_{crit(2)}$, перевезення організовується в критичному режимі (рух лише у «тихих вікна», попереднє «очищення» маршруту, інтеграція в плани цивільного захисту), а M_1 може бути взагалі виключений як неприйнятний.

Таким чином, наведений концептуальний приклад демонструє послідовність кроків: від побудови W_k та M_k і розрахунку R_k для альтернативних маршрутів – до вибору економічно та безпечно прийнятного маршруту з урахуванням λ , а також до обґрунтування необхідного режиму супроводу (базового, посиленого чи критичного) як інструменту цілеспрямованого зниження ризику автоперевезень небезпечних вантажів у воєнний період.

Важливо, що через обмежену доступність деталізованих військових даних величини $W_{war,k}$ доцільно задавати як інтервали або експертні оцінки; це узгоджується з ISO 31000, яка допускає роботу з неповною інформацією за умови прозорого опису припущень.

ВИСНОВКИ

У дослідженні системно обґрунтовано інтегровану методику оцінювання ризику автоперевезень небезпечних вантажів у воєнних умовах, яка поєднує модифіковану матрицю Хеддона, декомпозицію загального ризику на транспортну й воєнно-інфраструктурну складові та багатокритеріальну модель маршрутизації типу «вартість + ризик». Показано, що явне введення воєнного компонента у структуру ймовірності та поділ спеціальних режимів руху на базовий, посилений, критичний забезпечують коректніший вибір маршрутів і режимів супроводу порівняно з довоєнними підходами, які розглядали воєнні загрози лише імпліцитно або взагалі ігнорували їх. Запропонована формалізація критеріїв маршрутизації з урахуванням відстані до лінії фронту, історії атак на інфраструктуру, можливостей об'їзду й супроводу, а також використання інтегрального показника ризику створює основу для узгодженого прийняття рішень перевізниками, експедиторами та органами державної влади. Практична цінність роботи полягає в тому, що методика може бути інтегрована у системи управління безпекою ланцюгів постачання та державні плани захисту критичної інфраструктури, слугуючи інструментом для оновлення нормативних вимог до перевезень НВ у воєнний та післявоєнний періоди. Отримані результати доцільно використати як методичну основу для подальших кількісних досліджень, калібрування граничних рівнів $R_{crit(1)}$, $R_{crit(2)}$ та розроблення цифрових платформ підтримки рішень щодо безпечної маршрутизації перевезень небезпечних вантажів.

Список використаних джерел

1. *ADR 2023 – European Agreement concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Road*. 2023 edition. United Nations Economic Commission for Europe (UNECE). URL: <https://unece.org/transport/standards/transport/dangerous-goods/adr-2023-agreement-concerning-international-carriage>
2. *Про перевезення небезпечних вантажів*: Закон України від 06.04.2000 № 1644-III (редакція станом на 2024 рік). Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/1644-14>
3. *ISO 28000:2022. Security and resilience – Security management systems – Requirements*. Geneva: ISO, 2022. 34 p.
4. *ISO 31000:2018. Risk management – Guidelines*. Geneva: ISO, 2018. 16 p.
5. *Erkut E. A Framework for Hazardous Materials Transport Risk Assessment / E. Erkut, V. Verter // Risk Analysis. 1995. Vol. 15, № 5. P. 589–601. URL: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1539-6924.1995.tb00755.x*

6. *Guo J.* Risk assessment of hazardous materials transportation: A review of research progress in the last thirty years / *J. Guo, C. Luo* // *Journal of Traffic and Transportation Engineering*. 2022. [Електронний ресурс]. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2022.01.004>
7. *Xu H.* Risk Evaluation of Hazardous Chemical Road Transportation Accidents Based on a Combined Empowerment-Cloud Model / *H. Xu, W. Zhang, X. Liu, R. Zhao* // *Applied Sciences*. 2025. Vol. 15, № 4. P. 1813. URL: DOI: <https://doi.org/10.3390/app15041813>
8. *Yu S.* Real-Time Risk Assessment for Road Transportation of Hazardous Materials / *S. Yu, L. Wang, Z. Chen* // *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12, № 21. P. 11130. URL: <https://doi.org/10.3390/app122111130>
9. *Wang S.* A possibility evaluation model for road transportation of hazardous chemicals accidents / *S. Wang, F. Li, Y. Zhang* // *Environmental Monitoring and Safety*. 2025. [Електронний ресурс]. URL: <https://www.maxapress.com/article/doi/10.54517/emst.2025.02.0009>
10. *Chen C.* A systematic review of safety risk assessment methods for hazardous materials / *C. Chen, D. Zhang, M. Liu* // *Journal of Safety Science and Resilience*. 2025. [Електронний ресурс]. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jnlssr.2024.100067>
11. *Войтов В. А.* Організація перевезень небезпечних вантажів автомобільним транспортом / *В. А. Войтов, В. В. Вернигора* // *Напрями розвитку технологічних систем і логістики : матеріали конференції*. Харків: Державний біотехнологічний університет, 2024. С. 66–69.
12. *Чередніченко К. В.* Комплексна оцінка безпеки перевезень вантажів в інтегрованих транспортних системах: дисертація на здобуття ступеня доктора філософії. Київ : Національний авіаційний університет, 2024. 287 с.
13. *Розрахунок ризику НС і рекомендації щодо його зниження при транспортуванні зрідженого газу залізничним транспортом : методичні матеріали*. Львів, 2020. 45 с.
14. *Логістика під час війни та проблеми з якими зіштовхнулися підприємства* // *Economic Development*. 2024. № 3. URL: <https://econdevelopment.in.ua>
15. *Russia's major air attack damages Ukrainian energy infrastructure in 5 regions* // *Reuters*. 01.06.2024. URL: <https://www.reuters.com/business/energy/ukrainian-energy-workers-endless-race-repair-damage-russian-strikes-2025-11-14/>
16. *How the Russia-Ukraine War Has Impacted on Logistics Routes and Supply Chains* // *GMK Center*. URL: <https://gmk.center/en/posts/how-the-russia-ukraine-war-has-impacted-on-logistics-routes-and-supply-chains/>
17. *Attacks on Ukraine's Energy Infrastructure: Harm to the Civilian Population* // *Office of the High Commissioner for Human Rights (OHCHR)*. URL: <https://ukraine.ohchr.org/en/Attacks-on-Ukraines-Energy-Infrastructure-Harm-to-the-Civilian-Population>
18. *Полюх А.* *Transport Infrastructure Amid Protracted War* // *Київська школа економіки (KSE)*. 2025. URL: https://kse.ua/wp-content/uploads/2025/08/Transport-Infrastructure-Amid-Protracted-War_Poliukh-Artem.pdf
19. *Про затвердження Правил перевезення небезпечних вантажів залізничним транспортом* : Наказ Міністерства інфраструктури України від 11.12.2018 № 1041. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1041-18#Text>
20. *2024 Report on the Guidelines on Transport of dangerous goods* // *Transport Community*. 2024. URL: <https://www.transport-community.org/wp-content/uploads/2024/12/2024-Report-on-the-Guidelines-on-Transport-of-dangerous-goods.pdf>
21. *Russian drones, missiles hit railway hub near Ukraine's capital, railway says* // *Reuters*. 06.12.2025. URL: <https://www.reuters.com/world/europe/russian-drones-missiles-hit-railway-hub-near-ukraines-capital-railway-says-2025-12-06/>
22. *Повітряна тривога в Україні: карта повітряних тривог* // *Alerts.in.ua*. URL: <https://alerts.in.ua/en>

23. *Final Assessment Report on the Resilience of Critical Infrastructure* / NATO–EU Task Force. June 2023. 124 p.
24. Tomasoni A. M. ICT based system to monitor hazmat road transportation and a rapid mapping technique for accident scenarios / A. M. Tomasoni, R. Gubiani, P. S. Garbolino // *Chemical Engineering Transactions*. 2022. Vol. 91. P. 175–180. DOI: <https://doi.org/10.3303/CET2291030>
25. Суходоля О. Нова директива ЄС щодо стійкості критичної інфраструктури (CER DIRECTIVE): аналітична записка / О. Суходоля // Національний інститут стратегічних досліджень (НІСД). 12.04.2023. URL: https://niss.gov.ua/sites/default/files/2023-04/az_eu-cer_12042023.pdf
26. Соціальний захист населення в Україні: стан та перспективи розвитку // Національний інститут стратегічних досліджень (НІСД). 2013. URL: https://niss.gov.ua/sites/default/files/2013-02/Sots_zahust-86178.pdf

Selivanova N.Y.

RISK ASSESSMENT OF ROAD TRANSPORTATION OF DANGEROUS GOODS UNDER MARTIAL LAW IN UKRAINE: ROUTING AND SPECIAL ESCORT REGIMES

The article is concerned with the development of a comprehensive methodology for assessing the risks of road transportation of dangerous goods under martial law in Ukraine. It is argued that traditional approaches to transport risk management based on the requirements of ADR, the Law of Ukraine “On the Transportation of Dangerous Goods” and the classic risk assessment scheme, are insufficient in the presence of additional military threats – missile and drone strikes, artillery shelling, mining, and destruction of road transport and energy infrastructure. It is proposed to expand the structure of the probability component by identifying the military threat coefficient W_{war} , which takes into account the intensity of attacks, the proximity of the route to the front line, the presence of critical objects, and recorded incidents along the transport corridor. To assess the consequences, a multi-criteria index has been developed that combines losses to life and health of the population, the environment, and the economy.

The methodology integrates a modified Heddon matrix, adapted to the three phases of the transport process (before, during, and after the event), taking into account the military impact on people, vehicles, the environment, and critical transport infrastructure. Based on this, a multi-criteria routing task is set, in which the total logistics costs and the integral risk of the route are minimized, taking into account the regulatory restrictions of martial law and escort capabilities. Separately, a classification of special traffic modes (basic, enhanced, critical) is proposed depending on the cargo hazard class, the spatial-temporal profile of threats, and the sensitivity of territories. The scientific novelty lies in the formalized combination of the modified Heddon matrix with an integral risk model and multi-criteria routing, taking into account military threats, which makes it possible to evaluate and compare alternative routes and modes of transport for dangerous goods in the dynamic conditions of martial law. The practical value of the work lies in the creation of a formalized toolkit for government authorities, carriers, and freight forwarders, which ensures a reasonable choice of routes and modes of transport for dangerous goods in conditions of ongoing hostilities and during the planning of post-war restoration of the transport system.

Keywords: Road transportation of dangerous goods; martial law; risk assessment; military threats; routing of dangerous goods transportation; Heddon matrix; special escort modes; critical transport infrastructure.

Стаття надійшла 25.11.2025р