

О. В. Малєєва, Д. А. Набокін, Ю. А. Малєєва

Національний аерокосмічний університет імені М. С. Жуковського «ХАІ», Харків, Україна

ВИБІР НАЙБІЛЬШ ЕФЕКТИВНОГО МАРШРУТУ ПЕРЕВЕЗЕНЬ З УРАХУВАННЯМ ІНДЕКСІВ НЕБЕЗПЕЧНОСТІ ТЕРИТОРІЙ В УМОВАХ ВОЄННОГО ЧАСУ

Анотація. Предметом дослідження в статті є процеси планування вантажних перевезень в умовах воєнного часу. Мета - підвищення безпеки перевезень за рахунок побудови маршруту, що враховує умови воєнного стану. Використовуються методи системного аналізу, теорії графів та прийняття багатокритеріальних рішень. В статті проаналізовано проблеми вантажних перевезень під час воєнних дій, які зумовили збільшення частки автомобільних перевезень. Було розглянуто причини цього та можливі небезпеки під час перевезень. Визначено основні критерії безпеки маршрутів та пунктів призначення під час воєнних дій. Було створено систему індексів небезпечності, які засновані на даних про кількість артилерійських обстрілів та повідомлень про вибухи. Розроблено алгоритм формування маршруту перевезень з урахуванням вимог безпеки шляхом адаптації алгоритму Дейкстри під критерій безпеки за допомогою розроблених індексів.

Ключові слова: логістика, автомобільні перевезення, маршрут, оптимізація, багатокритеріальність, прийняття рішень, безпека перевезень

Вступ

Постановка проблеми. У сучасному світі логістика є ключовим елементом, який дозволяє товарам та послугам переміщатися від виробників до споживачів ефективно та вчасно. Важливість логістичних рішень можна пояснити кількома якими: ефективність витрат, поліпшення обслуговування, підвищення конкурентоспроможності, скорочення ризиків, стійкість до викликів.

В нинішні часи через військовий стан розподіл торговельних транспортних засобів набув значних змін. З початком війни в Україні сталися такі зміни [1]:

- повітряні перевезення відсутні зовсім через повну заборону польотів цивільної авіації;
- залізничні перевезення скоротилися на 65,3% через обмеження пропускної спроможності на пунктах пропуску;
- для водних перевезень активні лише дунайські порти, що у мирний час складали 5% від усіх подібних перевезень.

Враховуючи ці обмеження, ринок транспортних послуг почав надавати пріоритет автомобільному транспорту для перевезень вантажів.

Планування перевезень у військовий час має враховувати усі можливі небезпечні моменти. Задля безпеки краще обрати шляхи подалі від кордону чи прифронтової зони [2, 3]. Формування логістичних маршрутів під час бойових дій є складним завданням, яке потребує ретельного аналізу та урахування різних факторів. Проте, грамотне планування може допомогти забезпечити безпеку транспортних засобів та товарів, а також мінімізувати ризики.

Тому актуальним є завдання підвищення безпеки автомобільних перевезень за рахунок побудови маршруту, що враховує умови воєнного стану.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання логістичних перевезень розглядаються науковцями в різних аспектах.

В роботі [4] обґрунтовано необхідність розроблення кількох варіантів маршрутів, розкрито сут-

ність дорожніх заторів та їх багатьох негативних наслідків, таких як: марнування часу, неможливість передбачити точний час на подорож, марно витрачене паливо, забруднене повітря тощо.

Завдання побудови альтернативних маршрутів перевезень формалізовано в статті [5] з використанням технології ризик-менеджменту та оптимізаційної математичної моделі за критерієм мінімального перевищення експлуатаційних витрат. Для формування множини альтернативних маршрутів на напрямку перевезень використано положення теорії графів. Множина альтернативних маршрутів формується на основі зваженої матриці суміжності графа. В роботах [6, 7] пропонується використання класичного методу маршрутизації Кларка-Райта для формування розвізно-збірних маршрутів.

Розглядається можливість використання моделі нейронної мережі при вирішенні задачі маршрутизації перевезень вантажів та вибору виду транспорту із застосуванням змішаного методу прийняття рішення. Формування маршруту та вибір виду транспорту здійснюється із урахуванням сукупного ефекту від декількох критеріїв вибору та оцінок, вплив яких визначається методом розмитих коефіцієнтів [8]. Запропонована в роботі [9] модель дозволяє проектувати перевізний процес, враховуючи параметри транспортної мережі, учасників транспортно-го процесу, вантажів і транспортних засобів.

Особливості перевезень в умовах воєнного стану розглянуто у роботах [10, 11]. Зазначено, що нові правила перевезення вантажів, пасажирів і багажу внутрішнім транспортом, які охоплюють і правила стосовно страхування пасажирів, були внесені з метою забезпечення безпеки та регулювання перевезень в умовах воєнного стану.

Використання геоінформаційних технологій для формування в реальному часі оптимального та безпечного маршруту доставки гуманітарного вантажу розглянуто у роботах [12–14]. Для визначення критеріїв та вибору оптимального маршруту використовується метод аналізу ієрархій. Враховується довжина маршруту, час у дорозі, марка автомобіля

та інші, для визначення нових маршрутів в умовах воєнного конфлікту [15]. При доставці гуманітарного вантажу враховуються такі аспекти, як руйнування існуючої транспортної інфраструктури та інфраструктури зв'язку, відсутність кваліфікованих працівників та необхідність забезпечення безпеки гуманітарних місій [16].

З проведеного аналізу публікацій можна зробити висновок, що перспективним є застосування теорії графів для формування альтернативних маршрутів та багатокритеріальне оцінювання їх ефективності. Але фактор безпеки територій під час військових дій в існуючих публікаціях недостатньо врахований.

Мета статті: підвищення безпеки автомобільних перевезень за рахунок побудови маршруту, що враховує умови воєнного стану.

Вирішуються наступні завдання:

- аналіз проблеми вантажних перевезень під час воєнних дій;
- визначення основних критеріїв безпеки маршрутів та пунктів призначення під час воєнних дій;
- формування показника небезпечності території;
- розробка алгоритму побудови альтернативних маршрутів перевезень та багатокритеріального вибору найбільш ефективного маршруту в умовах воєнного стану.

Виклад основного матеріалу

В умовах бойових дій маршрути мають бути сплановані з урахуванням наступних факторів:

- безпека: маршрути повинні бути безпечними для пересування транспортних засобів. Вони повинні уникати місць, де можливі бойові дії, мінні поля, засідки та інші небезпеки;
- ефективність: маршрути мають бути ефективними з погляду часу та відстані. Вони мають бути короткими та швидкими, щоб мінімізувати ризики для транспортних засобів та товарів;
- гнучкість: маршрути повинні бути гнучкими та адаптованими. Вони повинні дозволяти змінювати напрямок руху в залежності від обстановки, що змінюється.

Планування маршрутів перевезень вантажів під час воєнного часу передбачає такі основні етапи:

- 1) збір даних - необхідно зібрати дані про місцевість, включаючи карти, дані про рельєф, а також інформацію про можливі небезпеки;
- 2) аналіз даних - необхідно проаналізувати зібрані дані для виявлення можливих маршрутів;
- 3) оцінка маршрутів - необхідно оцінити можливі маршрути з погляду безпеки, ефективності та гнучкості;
- 4) вибір маршруту - потрібно вибрати оптимальний маршрут.

Розглянемо особливості прийняття рішень методами багатокритеріального вибору, які дозволяють оцінити та вибрати оптимальне рішення в умовах, коли є декілька критеріїв, за якими потрібно оцінити альтернативи. Кожен критерій може мати різну вагу чи важливість. Процес постановки багатокритеріальної задачі вимагає взаємодії з експер-

тами у відповідній галузі для розробки адекватної моделі прийняття рішень.

Перелічимо основні кроки постановки багатокритеріального завдання:

- визначення мети прийняття рішення - мета має бути конкретною та вимірною, щоб забезпечити ясне розуміння того, що вважається успішним результатом;
- виділення критеріїв - критерії можуть бути різними параметрами чи характеристиками, що відображають різні аспекти проблеми;
- класифікація критеріїв - поділ критеріїв на категорії, наприклад, якісні та кількісні, або основні та другорядні;
- оцінка значущості критеріїв - це може бути зроблено за допомогою методів анкетування, експертних оцінок або інших технік;
- збір даних необхідних для оцінки значень критеріїв - аналіз статистичних даних, консультації з експертами, або використання результатів попередніх досліджень;
- формалізація задачі - формулювання цільової функції, яку необхідно оптимізувати;
- вибір методу прийняття рішень (розглянути нижче);

- валідація моделі - допомагає переконатися, що модель відображає реальні умови та може бути використана для прийняття обґрунтованих рішень.

Для вирішення завдань багатокритеріального вибору використовують різні методи, включаючи:

- метод зважених критеріїв – у цьому методі кожен критерій набуває певної ваги, яка відображає його важливість. Потім альтернативи оцінюються з урахуванням цих критеріїв, і сума оцінок дає загальну оцінку.
- аналіз ієрархії процесів – розбиває складне завдання на більш прості підзадачі, проводить попарне порівняння критеріїв та альтернатив, і потім обчислює загальну оцінку;
- методи оптимізації – деякі завдання багатокритеріального вибору можна вирішити з використанням математичних методів оптимізації.

Запропоновано для побудови раціонального та безпечного маршруту враховувати два основні критерії – оптимальність за часом та безпечність шляху. Під час воєнного стану питання логістики змінюється з «Як доставити товар швидше» на «Як доставити товар взагалі». Для такого часу питання безпеки стає важливішим за швидкість, бо краще доставити товар трохи довше, аніж не доставити взагалі. З економічної точки зору це може бути більш затратно, але загибель робітників та втрата товару, порівняно із додатковими витратами на перевезення, викличе ще більше проблем. Таким чином, безпечність займає вищу пріоритетність. Зазначимо, що довжина шляху напряму впливає на час доставлення. Відстань відповідає основним прямим маршрутам між містами. Критерії мають враховуватись одночасно для кожного проміжного шляху, щоб зберегти баланс між безпекою і часом.

Для формування альтернативних маршрутів використовується теорія графів. На графі окрім

N вершин та K ребер існують ще M фіктивних вершин, тобто загальна кількість дуг обчислюється як

$$L = (N - M)M + M(M - 1). \quad (1)$$

Від кожної реальної вершини до фіктивної існує дуга з вагою, що прагне до нескінченності. Таким чином, існує два зв'язаних графа – дійсний, де вага дорівнює відстані між містами, та фіктивний, що можна назвати «графом можливої доставки».

Припускається, що множина вершин N – це обласні центри України, множина ребер K – основні дороги між ними, множина фіктивних вершин M – міста-склади. На рис. 1 можна побачити приклад фіктивних дуг з міста Дніпро, що проведені до складів, які були обрані випадково.

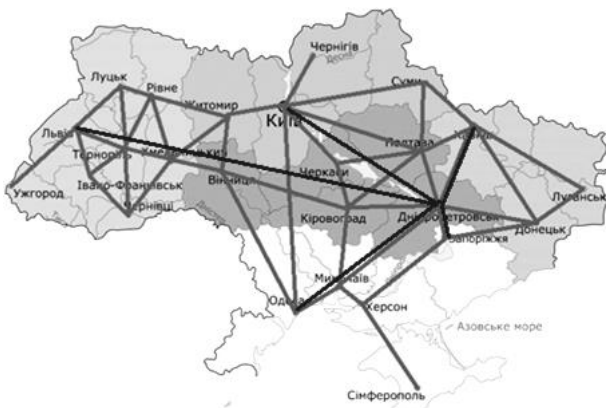


Рис. 1. Граф маршрутів та фіктивні дуги з міста Дніпро

На рисунку чорним кольором зображено фіктивні дуги. Як можна побачити, існують приклади, коли реальне ребро співпадає з дугою, але у більшості випадків дуга є лише віртуальним поєднанням двох різних вершин.

Для побудови маршруту було обрано алгоритм Дейкстри, бо він може побудувати шлях між будь-якими двома точками на карті і, на відміну від алгоритму Беллмана-Форда, не працює з від'ємною вагою ребер. При застосуванні алгоритму Дейкстри запропоновано окрім довжини шляху враховувати індекс його небезпечності.

Перед формуванням маршруту необхідно визначити індекси небезпечності для кожного міста, який може бути проміжним пунктом маршруту. Запропоновано опиратися на три фактори: кількість повідомлень про вибухи, кількість артилерійських обстрілів та чи є місто тимчасово окупованим.

Станом на 08.02.2024 ми маємо ситуацію, що зображена на рис. 2 та 3 [17].

Індекси небезпечності розраховуються як коефіцієнти, які приймають значення у діапазоні від нуля до одиниці, де 0 – безпечно, 1 – небезпечно (табл. 1).

Після аналізу даних було вирішено, що кращим варіантом для розподілення об'єктів по групам стане використання закономірності геометричної прогресії. Були спроби побудувати математичну модель розподілу областей більш точно за кількістю обстрілів, але виявилось, що через зовнішню різницю між

показниками різних областей, деякі індекси виходили неправдоподібно малими.

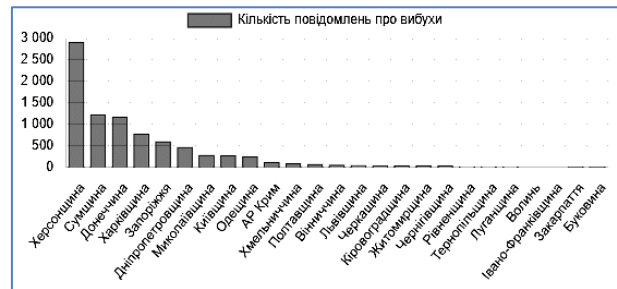


Рис. 2. Кількість повідомлень про вибухи по областях

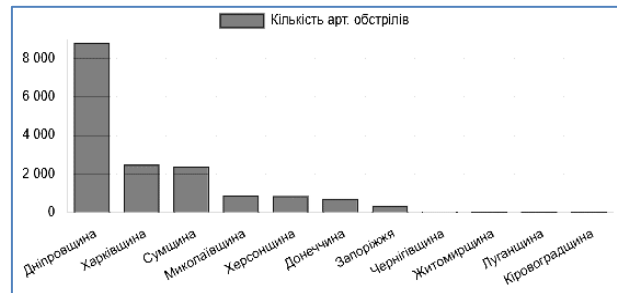


Рис. 3. Кількість артилерійських обстрілів по областях

Таблиця 1 - Дані про небезпеку по областях

Назва міста	Кількість повідомлень про вибухи	Кількість артилерійських обстрілів	Чи є окупованим
Вінниця	64	0	Ні
Дніпро	476	8 825	Ні
Донецьк	1 185	722	Так
Житомир	46	0	Ні
Запоріжжя	613	358	Ні
Івано-Франківськ	0	0	Ні
Київ	290	0	Ні
Кропивницький	47	0	Ні
Луганськ	10	0	Так
Луцьк	0	0	Ні
Львів	60	0	Ні
Миколаїв	296	891	Ні
Одеса	262	0	Ні
Полтава	84	0	Ні
Рівне	18	0	Ні
Сімферополь	128	0	Так
Суми	1233	2390	Ні
Тернопіль	18	0	Ні
Ужгород	0	0	Ні
Харків	788	2498	Ні
Херсон	2921	848	Ні
Хмельницький	105	0	Ні
Черкаси	48	0	Ні
Чернівці	0	0	Ні
Чернігів	39	0	Ні

Тому в даній роботі використовувався евристичний алгоритм. У перспективі планується для розподілу областей за індексом небезпечності використовувати статистичні методи (квантілі розподілу) та кластерний аналіз.

Розподіл обласних центрів за індексами небезпечності відображено у табл. 2.

Таблиця 2 - Розподіл міст за індексами небезпечності

Індекс небезпечності	Шкала розподілу по групах	Кількість небезпечних подій	Назва міста
0.1	<1	0	Івано-Франківськ
		0	Луцьк
		0	Ужгород
		0	Чернівці
0.3	1-10	-	-
0.5	11-100	64	Вінниця
		46	Житомир
		47	Кропивницький
		60	Львів
		84	Полтава
		18	Рівне
		18	Тернопіль
		48	Черкаси
		39	Чернігів
0.7	101-1000	971	Запоріжжя
		290	Київ
		262	Одеса
		105	Хмельницький
0.9	1001-10000	9301	Дніпро
		1187	Миколаїв
		3623	Суми
		3286	Харків
		3769	Херсон
1	Тимчасово окуповане місто	-	Донецьк Луганськ Сімферополь

Карта на рис. 4 відображає розподіл територій за індексами небезпечності за допомогою відтінків сірого кольору. Области з найбільшим індексом, тобто окуповані, відображено темно-сірим. Із зменшенням індексом небезпечності колір наближається до світлого.



Рис. 4. Розподіл областей України за зонами небезпечності

Оскільки індекс небезпечності враховується як критерій вибору шляху, то вага ребер графа береться у залежності від міста, що має більший індекс небезпечності. Якщо дорога йде до міста з індексом безпечності 0.1, то індекс такої дороги знижується на 0.2.

Таким чином, на відміну від класичного алгоритму, де відстані між містами додаються, у даній

модифікації у якості ваг використовуються індекси безпечності кожної дороги. Шлях обирається за критерієм мінімальності взваженої відстані:

$$F_{\min} = \sum_{i=1}^n S_i Ind_i, \quad (2)$$

де S_i – довжина ребра графа, Ind_i – максимальний з індексів небезпечності початкової або кінцевої вершини ребра.

Запропоновано два режими роботи алгоритму: «Безпека», що рекомендовано використовувати під час воєнного стану, та «Швидкість», що більше підходить для мирного часу. Варто зазначити, що режим «Швидкість» працює тільки з урахуванням критерію довжини шляху. У режимі «Безпека» враховується обидва критерії: довжина шляху та його безпечність. Подібний розрахунок дозволяє зберегти баланс та знайти шлях, що сумістить у собі і безпечність, і оптимальність за часом.

Опишемо етапи алгоритму формування раціонального маршруту.

1. Обрання режиму – «Безпека» чи «Швидкість». Будуються фіктивні дуги між кожним містом.

2. Залежно від вибору режиму кожній дузі присвоюється власна вага.

3. Формування маршруту. Режим «Швидкість» використовує алгоритм Дейкстри у його класичному вигляді – шукає найкоротший шлях до складу, що задовольнить потреби перевізника. Режим «Безпека» використовує модифікацію алгоритму та замість найкоротших шляхів обирає добуток найнижчих індексів небезпечності та довжини шляху для побудовання кінцевого результату.

4. Обчислення параметрів шляху: очікуваний час, ціна доставлення, рівень безпеки (у режимі «Безпека»).

5. Побудова отриманого шляху на карті та формування результату у текстовому вигляді користувачеві.

Запропонований алгоритм дозволяє будувати шлях доставки вантажів з урахуванням двох критеріїв на основі модифікації алгоритму Дейкстри, що враховує індекси небезпечності.

Висновки

В статті проаналізовано проблеми вантажних перевезень під час воєнних дій. Вказані проблеми змусили представників бізнесу зробити акцент на автомобільний транспорт. Було розглянуто можливі небезпеки під час перевезень, визначено основні критерії безпеки маршрутів та пунктів призначення під час воєнних дій.

Було запропоновано евристичний метод визначення індексів небезпечності територій, які засновані на даних про кількість артилерійських обстрілів та повідомлень про вибухи; розподілено їх між областями України та проаналізовано результати цього розподілу.

Розроблено алгоритм формування маршруту перевезень з урахуванням вимог безпеки.

Напрямок подальших досліджень є розробка реального часу на основі попередніх статистичних методу формування безпечних маршрутів у режимі даних та з урахуванням поточних геоданих.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Як логістика адаптувалася до війни [Електронний ресурс] - Режим доступу: <https://www.epravda.com.ua/columns/2023/07/24/702529/>
2. Бедрій Я., Тарнавський Є. Військова логістика. - Запоріжжя: Видавничий дім "Гельветика", 2020. – 242 с. ISBN 978-966-289-100-3
3. Федорович О. Є., Уруський О. С., Чепков І. Б., Луханін М. І., Прончаков Ю. Л., Рибка К. О., Лещенко Ю. О. Моделювання транспортної логістики військових вантажів з урахуванням збитків, які виникають у зоні бойових дій через запізнення у постачанні // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2022. – № 2. – С. 63–74. DOI: <https://doi.org/10.32620/reks.2022.2.05>.
4. Гурч Л. М. Маршрутизація перевезень з використанням новітніх технологій // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Логістика, 2016. - № 846. - С. 48-53. - URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/VNULPL_2016_846_11
5. Бутько Т. В., Пархоменко Л. О., Тарасов К. О. Формалізація процедури надання альтернативного маршруту швидкісним пасажирським поїздам на основі ризик-менеджменту // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2023. – Т. 28. – №. 1. – С. 31-37. DOI: 10.18664/ikszt.v28i1.276341
6. Гужевська Л. А., Даниленко І. В. Формування розвізно-збірних маршрутів методом Кларка-Райта при доставці експрес-відправлень // Вісник Національного транспортного університету. – 2016. – №. 1. – С. 122-129. Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vntu_2016_1_17
7. Pichpibul T., Kawtummachai R. A heuristic approach based on clarke-wright algorithm for open vehicle routing problem // The Scientific World Journal. – 2013. – Vol. 2013. DOI:10.1155/2013/874349
8. Шарай С. М., Сахно В. П., Поляков В. М., Рой М. П., Фадєєв М. С. Використання моделі нейронної мережі для формування маршруту перевезень вантажів та вибору виду транспорту // Матеріали XI-ої Міжнародної науково-технічної інтернет-конференції «Проблеми та перспективи розвитку автомобільного транспорту» (13-14 квітня 2023 року, м. Вінниця). – 2023. – С. 354-357. Режим доступу: <https://atmconf.vntu.edu.ua/materialy2023.pdf>
9. Куш Є. І. Розробка алгоритму формування розвізних маршрутів в логістичній системі // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – 2017. – №. 4. – С. 128-133. Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/VSUNU_2017_4_27
10. Коробкова О. М. Логістична діяльність підприємств в умовах воєнного стану // The 4th International scientific and practical conference “Actual problems of modern science”(January 31–February 3, 2023), Boston, USA. International Science Group. – 2023. – С. 457-458. Режим доступу: https://web.archive.org/web/20230202220402id_/https://isg-konf.com/wp-content/uploads/2023/01/Actual-problems-of-modern-science.pdf#page=458
11. Кваша Ю. Аналіз послуг вантажних перевезень в умовах воєнного стану // Актуальні питання права та соціально-економічних відносин. Збірник наукових статей. – 2023. – С. 387-393. Режим доступу: <http://dspace.wunu.edu.ua/bitstream/316497/48146/1/Збірник-2023%20%281%29.pdf>
12. Beresford A., Pettit S. Humanitarian aid logistics: a Cardiff University research perspective on cases, structures and prospects // Journal of Humanitarian Logistics and Supply Chain Management. – 2021. – No. 11. – P. 623–638. DOI: 10.1108/JHLSCM-06-2021-0052
13. Giaglis G. M., Minis I., Tatarakis A., Zaimpekis V. Minimizing logistics risk through real-time vehicle routing and mobile technologies : Research to date and future trends // International Journal of Physical Distribution & Logistics Management. – 2004. – Vol. 34. – P. 749–764. DOI: 10.1108/09600030410567504
14. Szucs G. Decision support for route search and optimum finding in transport networks under uncertainty // Journal of Applied Research and Technology. – 2015. – Vol. 13. – P. 125–134. DOI: 10.1016/S1665-6423(15)30011-0
15. Помазков М. В., Мнацаканян М. С., Маник І. С. Моделювання інтелектуальних маршрутів перевезення гуманітарних вантажів в умовах воєнного часу // Подільський вісник: сільське господарство, техніка, економіка. – 2023. – №. 41. – С. 46-53. DOI: 10.37406/2706-9052-2023-4.7
16. Malhouni Y., Mabrouki C. C. Mitigating risks and overcoming logistics challenges in humanitarian deployment to conflict zones: evidence from the DRC and CAR // Journal of Humanitarian Logistics and Supply Chain Management. – 2023 DOI 10.1108/JHLSCM-04-2023-0031
17. Статистика повітряних тривог [Електронний ресурс] - Режим доступу: <https://air-alarms.in.ua>

Received (Надійшла) 01.04.2024

Accepted for publication (Прийнята до друку) 26.06.2024

Selection of the most effective transportation route considering territory safety indexes in wartime conditions

O. Malyeyeva, D. Nabokin, Yu. Malieieva

Abstract. The subject of research in the article is the processes of planning freight transportation in wartime conditions. The purpose of research is to increase the safety of transportation due to the construction of a route that takes into account the conditions of martial law. Methods of system analysis, graph theory and multi-criteria decision-making are used. The article analyzes the problems of cargo transportation during hostilities, which led to an increase in the share of automobile transportation. The reasons for this and possible dangers during transportation were considered. The main criteria for the security of routes and destinations during hostilities have been determined. A system of safety indexes was created, which was based on data on the number of artillery attacks and information about explosions. The algorithm for forming the transportation route with the security measures has been expanded by adapting the Dijkstra's algorithm for the security criterion with the help of fragmented indices.

Keywords: logistics, road transport, route, optimization, multicriteria, decision-making, transport safety.