

Міністерство освіти і науки України  
Національний університет «Львівська політехніка»

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

Сотнікова Анна Олександрівна

УДК 656.045

**ДИСЕРТАЦІЯ**  
**ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ ТРАНСПОРТНИХ ПОТОКІВ**  
**В УМОВАХ ВІЙНИ**

Спеціальність 275 – Транспортні технології (за видами)

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

А. О. Сотнікова

Наукові керівники:

Ройко Юрій Ярославович, кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри транспортних технологій Національного університету «Львівська політехніка»

Стівен Тревіс Воллер, доктор філософії, професор, завідувач кафедри транспортного моделювання та симуляції Дрезденського технічного університету, професор Австралійського національного університету

Львів – 2024

## АНОТАЦІЯ

*Сотнікова А. О.* Особливості формування транспортних потоків в умовах війни. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 275 «Транспортні технології (за видами)» – Національний університет «Львівська політехніка», Міністерство освіти і науки України, Львів, 2024.

Дисертація присвячена вивченню впливу війни на формування транспортних потоків у містах. В умовах гуманітарних конфліктів транспортна інфраструктура міст зазнає серйозних змін, що значно впливає на мобільність та безпеку населення. Особливо актуальною є необхідність вивчення цього питання в контексті сучасної російсько-української війни, що спричинила наймасовішу міграцію населення в Європі з часів Другої світової війни.

У роботі вивчається динаміка змін та шляхи адаптації системи міського транспорту до умов війни. Дослідження полягає у визначенні параметрів транспортних зон міст із особливими відхиленнями індексу завантаження, порівняно із нормальним станом транспортної мережі протягом кількох фаз повномасштабного вторгнення Російської Федерації (РФ) в Україну.

Методологія дослідження ґрунтується на аналізі статистичних даних про пересування населення, використанні моделей транспортних потоків та системного аналізу взаємодії різних складових системи міського транспорту. Враховується також вплив чинників, які виникають в умовах війни, таких як евакуація населення, знищення інфраструктури, окупація ворожими військами тощо.

У першому розділі проведено аналіз чинників, які формують мобільність загалом та дорожній рух зокрема. Визначено показники дорожнього руху та їх співвідношення між собою, а також режими руху та їх характеристики. Проаналізовано існуючі дослідження щодо впливу конфігурації транспортної мережі на формування транспортних потоків. Для ефективнішого вивчення

процесів у транспортних системах міст територію часто поділяють на зони, тому також розглянуто підходи до визначення та формування транспортних зон. Після проведеного аналізу, одним із основних показників функціонування транспортної мережі обрано індекс завантаження.

Для розуміння змін параметрів дорожнього руху та транспортних мереж в особливих умовах, вивчено стан питання щодо формування мобільності під час надзвичайних ситуацій. Розглянуто катастрофи природного, техногенного та соціально-політичного характеру серед яких землетрус, паводок, терористичний акт, пандемія. Аналіз як сучасної, так і фундаментальної літератури продемонстрував брак якісних досліджень надзвичайних ситуацій воєнного характеру та їх впливу на мобільність.

Другий розділ дисертації сфокусований на практичних підходах до опрацювання даних про дорожній рух – транспортному моделюванні. Тут розглянуто його типи та методики, включаючи чотиріступеневу модель, як основу транспортного планування та прогнозування. Вивчено існуючі технічні засоби і програмне забезпечення транспортного моделювання для його різних рівнів. Зважаючи на масштабність такої події як війна, обґрунтовано використання рівня макромоделювання.

Розглянуто існуючі методи та підходи до збору початкових даних, серед яких найбільш відповідними для цього дослідження визначено всеохопні дані про дорожній рух із повсюдних навігаційних платформ. Їх перевагою є можливість швидкого отримання, а особливо у регіонах із складним доступом та/або під час надзвичайних подій. Проте, зважаючи на об'ємність баз даних, отриманих таким чином, виникла складність у їх опрацюванні. У зв'язку з цим, для роботи з ними обрано новітнє програмне забезпечення Rapidex, що є інструментом оцінки матриць кореспонденцій. Також надано опис принципу його роботи та приклади застосування.

У третьому розділі наведено характеристики всіх досліджуваних міст та їх вулично-дорожніх мереж. У роботі розглядаються такі міста України: Київ, Львів, Харків, Одеса, Дніпро та Маріуполь.

Наведено результати опитування мешканців щодо евакуації з первинних місць проживання для покращення розуміння транспортної поведінки населення країни під час початкової фази повномасштабної війни. Серед респондентів були особи всіх вікових категорій та з усіх областей України, окрім АР Крим.

Для оцінки змін у пропускній здатності вулично-дорожніх мереж під час війни зібрано дані про воєнні події у вищезгаданих містах. Також розроблено схему класифікації таких подій.

Початковими даними для аналізу транспортних потоків є тривалості пересування відрізками вулично-дорожніх мереж, отримані за допомогою інструменту Rapidex із ресурсів навігаційного провайдера TomTom. Перевірено надійність цих даних, обчисливши частоту унікальних значень тривалості пересування відрізками.

Як метрику тривалості пересування для кожного відрізка всіх досліджуваних мереж, а також мережі міжміських шляхів України, використано коефіцієнт варіації. З'ясовано, що більша варіативність спостерігається у периферійних районах міст.

У четвертому розділі побудовано часові графіки зміни усередненого по мережі коефіцієнта варіації та індексу завантаження для кожного міста та трьох періодів доби. Проаналізовано результати та їх співставлення із воєнними подіями. Для трьох міст проведено оцінку кореспонденцій на основі ключових статистичних даних, таких як зміна середньої довжини поїздки, середньої тривалості пересування та загального попиту.

Для подальшого, більш детального, аналізу обрано вулично-дорожні мережі Львова та Києва. Спершу, для усередненого показника індексу завантаження зон призначення та відправлення і транспортної роботи в зонах, здійснено фільтрування даних з метою відокремлення повторюваних тенденцій. За допомогою просторово-часового аналізу визначено зони із значними відхиленнями, які далі об'єднано у райони. Ґрунтуючись на датах, коли спостерігалися відхилення, отримано деякі додаткові показники як

транспортних потоків, так і вулично-дорожніх мереж. За допомогою перелічених етапів визначено три окремі фази в періоді дослідження, які збігаються для обох міст. Перша фаза характеризується екстреною міграцією у зв'язку із початком повномасштабного вторгнення, друга – міграцією, у зв'язку із деокупацією північних регіонів України, третя – звиканням населення до воєнних подій.

Для кожної із зазначених фаз в обох містах побудовано моделі поліноміальної регресії із двома незалежними змінними (індекс завантаження та кількість днів від початку фази). Залежною змінною є площа території міста з відхиленнями індексу завантаження від нормального стану транспортних потоків.

Результати дисертаційної роботи можуть бути використані для прогнозування змін у транспортних системах міст місцевими та державними інституціями у випадку гуманітарного конфлікту. Отримані моделі можуть також застосовуватись міжнародними та державними організаціями для планування евакуації населення під час воєнних дій.

**Ключові слова:** транспортний потік, тривалість пересування, транспортна система, вулично-дорожня мережа, індекс завантаження, попит на пересування, транспортні дослідження, доступність транспортних зон.

## СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

*Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації*

*Стаття у науковому періодичному виданні інших держав, що включене до міжнародних науково-метричних баз:*

1. Analyzing and Modeling Network Travel Patterns During the Ukraine Invasion Using Crowd-Sourced Pervasive Traffic Data / S. T. Waller et al. *Transportation Research Record*. 2023. Vol. 2677(10). P. 491–507.

*Статті у фахових виданнях України:*

2. Rogalskyu R., Sotnikova A. Analysis of the change in the number of passenger seats of urban passenger transport depending on the gravity function. *Transport technologies*. 2022. no. 1. P. 30–37. URL: <https://doi.org/10.23939/tt2022.01.030>.

3. Сотнікова А. Аналіз транспортної поведінки населення України під час початкової фази повномасштабного вторгнення. *Вісник ВПІ*. 2023. № 6. С. 65–70.

***Опубліковані праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації***

1. Сотнікова А. О. Інтермодальність у маршрутах пересування населення. *IV Всеукраїнська науково-теоретична конференція «Проблеми з транспортними потоками і напрямки їх розв'язання», м. Львів*. Львів, 2021. С. 86–87.

2. Сотнікова А. Особливості розміщення місць генерації потоків учасників дорожнього руху в містах. *Матеріали конференції «II Міжнародна науково-технічна конференція «Перспективи розвитку машинобудування та транспорту»», м. Вінниця*. 2021. URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fmt/pmrt2021/schedConf/presentations>.

3. Сотнікова А. Дослідження тривалості обслуговування автобусів на зупинкових пунктах. *Збірник тез доповідей Третьої всеукраїнської науково-практичної конференції 16–17 червня 2022 р. «Транспортні технології та безпека дорожнього руху», м. Запоріжжя*. 2022. С. 42–45.

4. Learning from Covid: How can we predict mobility behaviour in the face of disruptive events? – How to investigate the mobility of the future / P. Papendieck et al. *Proceedings of the 4th Symposium on management of future motorway and urban traffic systems 2022*. Dresden, 2023. P. 239–244.

5. Anna Sotnikova, Transport Modeling of Ukrainian Cities During the Conflict to Develop Novel Travel Behavior Understanding in Support of Reconstruction and More Resilient Future Cities / Anna Sotnikova, S. Travis Waller,

Moeid Qurashi // ETC past papers repository (51st European Transport Conference, 6 to 8 September 2023, Milano (Italy)), ISSN 2313-1853 / URL: <https://aetransport.org/past-etc-papers/conference-papers-2023?abstractId=8016&state=b>.

## SUMMARY

*Sotnikova A.* Specifics of transport flows formation in war conditions. – On the rights of manuscript.

Dissertation for the scientific degree of Doctor of Philosophy in the specialty 275 “Transport technologies (by modes)” – Lviv Polytechnic National University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Lviv, 2024.

The thesis is dedicated to studying the impact of war on the formation of traffic flows in cities. In the context of humanitarian conflicts, the transport infrastructure of cities experiences serious changes, which significantly affects the mobility and safety of the population. The need to study this issue in the context of the current Russian-Ukrainian war, which has caused the most massive migration in Europe since World War II, is particularly relevant.

The research examines the dynamics of changes and ways to adapt the urban transportation system to war conditions. The study is aimed at determining the parameters of transport zones of cities with special deviations of the congestion index compared to the normal state of the transport network during several phases of the full-scale invasion of the Russian Federation (RF) into Ukraine.

The research methodology is based on the analysis of statistical data on population movements, the use of transport flow models, and a systematic analysis of the interaction of various components of the urban transport system. The study also takes into account the impact of factors that arise in times of war, such as evacuation of the population, destruction of infrastructure, occupation by enemy forces, etc.

The first chapter analyzes the factors that determine mobility in general and traffic in particular. Traffic indicators and their correlation with each other, as well

as traffic modes and their characteristics are defined. Existing studies on the impact of the configuration of the transport network on the formation of traffic flows are analyzed. For a more effective study of processes in urban transport systems, the territory is often divided into zones, so approaches to the definition and formation of transport zones are also considered. After the analysis, the congestion index was selected as one of the main indicators of the functioning of the transport network.

To understand the changes in the parameters of traffic and transport networks in special conditions, the state of the problem of mobility formation during emergencies is studied. Natural, man-made, and socio-political disasters, including earthquake, flood, terrorist attack, and pandemic, are considered. The analysis of both modern and fundamental literature has demonstrated a lack of high-quality research on human conflicts and their impact on mobility.

The second chapter of the thesis focuses on practical approaches to traffic data processing such as transport modeling. It describes its types and methods, including the four-stage model, as the basis for transport planning and forecasting. The existing hardware and software for transport modeling for its various levels are studied. Given the scale of such an event as a war, the use of macro-modeling is justified.

The existing methods and approaches to collecting initial data are considered, among which the most appropriate for this study are crowd-sourced traffic data from pervasive navigation platforms. Their advantage is that they can be obtained quickly, especially in regions with difficult access and/or during emergencies. However, given the volume of databases obtained in this way, it is difficult to process them. In this regard, the latest Rapidex software was chosen to work with them, which is a tool for evaluating origin-destination matrices. The article also describes the principle of its operation and examples of its application.

The third chapter describes the characteristics of all the cities studied and their road-street networks. The following cities of Ukraine are considered in this study: Kyiv, Lviv, Kharkiv, Odesa, Dnipro, and Mariupol.



The results of a survey of residents regarding evacuation from their primary places of residence are presented to improve understanding of the transportation behavior of the country's population during the initial phase of a full-scale war. The respondents were people of all ages and from all regions of Ukraine, except for the Autonomous Republic of Crimea.

To assess the changes in the capacity of road-street networks during the war, data on military events in the above cities were collected. A classification scheme for such events was also developed.

The initial data for the analysis of traffic flows are the travel times along the road-street network segments obtained using the Rapidex tool from the resources of the TomTom navigation provider. The reliability of these data was checked by calculating the frequency of unique values of the duration of travel on the segments.

The coefficient of variation is used as a metric of travel time for each segment of all the studied networks, as well as the intercity network of Ukraine. It was found that higher variability is observed in the peripheral areas of cities.

In the fourth chapter, time graphs of changes in the network-averaged coefficient of variation and congestion index are constructed for each city and three periods of the day. The results are analyzed and compared with war events. For the three cities, the correspondences were evaluated based on key statistics, such as changes in the average trip length, average travel time, and total demand.

For further more detailed analysis, the road-street networks of Lviv and Kyiv were selected. First, for the average congestion index of destination and origin zones and vehicle-kilometers traveled in the zones, the data was filtered to separate out recurring trends. Using spatiotemporal analysis, zones with significant deviations were identified, which were further grouped into districts. Based on the dates when the deviations were observed, some additional indicators of both traffic flows and networks were obtained. Using these steps, three distinct phases in the study period were identified, which coincide for both cities. The first phase is characterized by emergency migration in connection with the beginning of the full-scale invasion, the

second by migration in connection with the de-occupation of the northern regions of Ukraine, and the third by the population's habituation to military events.

For each of these phases in both cities, polynomial regression models with two independent variables (congestion index and number of days since the beginning of the phase) were built. The dependent variable is the area of the city's territory with deviations of the congestion index from the normal state of traffic flows.

The results of the thesis can be used to predict changes in urban transport systems by local and state institutions in the case of a humanitarian conflict. The obtained models can also be used by international and state organizations to plan the evacuation of the population during the war.

**Keywords:** transport flow, travel time, transport system, road-street network, congestion index, mobility demand, transport research, accessibility of transport zones.

## LIST OF PUBLICATIONS OF THE CANDIDATE

*Scientific works in which the main scientific results of the dissertation are published*

*Article in a scientific periodical of other countries included in international scientometric databases:*

1. Analyzing and Modeling Network Travel Patterns During the Ukraine Invasion Using Crowd-Sourced Pervasive Traffic Data / S. T. Waller et al. *Transportation Research Record*. 2023. Vol. 2677(10). P. 491–507.

*Articles in professional publications of Ukraine:*

2. Rogalskyy R., Sotnikova A. Analysis of the change in the number of passenger seats of urban passenger transport depending on the gravity function. *Transport technologies*. 2022. no. 1. P. 30–37. URL: <https://doi.org/10.23939/tt2022.01.030>.

3. Sotnikova A. O. Analysis of the travel behavior of Ukrainian population during the initial phase of full-scale invasion. *VPI Bulletin*. 2023. No. 6. P. 65–70.

***Published works confirming the approbation of the dissertation materials***

1. Sotnikova A. Intermodality in the routes of population movement. *IV All-Ukrainian Scientific and Theoretical Conference “Problems with traffic flows and directions of their solution”*, Lviv. Lviv, 2021. P.86 – 87.
2. Sotnikova A. Features of the location of places for generating flows of road users in cities. *Proceedings of the conference “II International Scientific and Technical Conference “Prospects for the Development of Mechanical Engineering and Transport”*, Vinnytsia, 2021. URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fmt/pmrt2021/schedConf/presentations>.
3. Sotnikova A.O. Study of the duration of bus service at stopping points. *Collection of abstracts of the Third All-Ukrainian Scientific and Practical Conference “Transport technologies and road safety” on June 16-17, 2022, Zaporizhzhia*. 2022. P. 42-45.
4. Learning from Covid: How can we predict mobility behaviour in the face of disruptive events? – How to investigate the mobility of the future / P. Papendieck et al. *Proceedings of the 4th Symposium on management of future motorway and urban traffic systems 2022*. Dresden, 2023. P. 239–244.
5. Anna Sotnikova, Transport Modeling of Ukrainian Cities During the Conflict to Develop Novel Travel Behavior Understanding in Support of Reconstruction and More Resilient Future Cities / Anna Sotnikova, S. Travis Waller, Moeid Qurashi // ETC past papers repository (51st European Transport Conference, 6 to 8 September 2023, Milano (Italy)), ISSN 2313-1853 / URL: <https://aetransport.org/past-etc-papers/conference-papers-2023?abstractId=8016&state=b>.

## ЗМІСТ

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ.....	14
ВСТУП.....	15
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ ЩОДО ОСОБЛИВОСТЕЙ ФОРМУВАННЯ ТРАНСПОРТНИХ ПОТОКІВ, В ТОМУ ЧИСЛІ ПІД ЧАС НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ.....	19
1.1. Показники дорожнього руху та мобільності.....	19
1.2. Чинники, які визначають конфігурацію мережі.....	27
1.3. Зональні чинники. Транспортне районування при вивченні мобільності.....	32
1.4. Формування мобільності під час надзвичайних ситуацій.....	36
1.5. Висновки з розділу.....	43
РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ ТРАНСПОРТНИХ МОДЕЛЕЙ ТА ОБГРУНТУВАННЯ МЕТОДУ МОДЕЛЮВАННЯ.....	44
2.1. Транспортне моделювання, його типи та методики.....	44
2.1.1. Чотиріступенева модель.....	44
2.1.2. Методики розподілу транспортних потоків.....	48
2.1.3. Інші моделі.....	51
2.1.4. Методики транспортного моделювання.....	53
2.2. Технічні засоби та програмне забезпечення транспортного моделювання.....	55
2.2.1. Програмне забезпечення для транспортного моделювання..	55
2.2.2. Збір початкових даних для транспортного моделювання....	60
2.3. Оперативне планування транспортних систем із використанням всеохопних даних про дорожній рух.....	62
2.3.1. Принцип роботи інструменту оперативного транспортного планування Rapidex.....	63
2.3.2. Приклади застосування інструменту оперативного транспортного планування Rapidex.....	73
2.4. Висновки з розділу.....	79
РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ТРАНСПОРТНОЇ ПОВЕДІНКИ ТА ТРИВАЛОСТІ ПЕРЕСУВАННЯ НАСЕЛЕННЯ В УМОВАХ ВІЙНИ...	80
3.1. Системний аналіз вулично-дорожніх мереж.....	80
3.2. Дослідження транспортної поведінки населення України під час початкової фази повномасштабного вторгнення.....	87
3.3. Аналіз хронології воєнних подій у досліджуваних містах.....	94

3.4. Первинний аналіз тривалості пересування відрізками ВДМ досліджуваних міст.....	99
3.5. Висновки з розділу.....	107
РОЗДІЛ 4. ЗАКОНОМІРНОСТІ ЗМІНИ ІНДЕКСУ ЗАВАНТАЖЕННЯ НА ВІДРІЗКАХ ВУЛИЧНО-ДОРОЖНЬОЇ МЕРЕЖІ, ВИЗНАЧЕНІ НА ОСНОВІ ТРИВАЛОСТІ ПЕРЕСУВАННЯ В УМОВАХ ГУМАНІТАРНОГО КОНФЛІКТУ.....	109
4.1. Аналіз та моделювання мережевих схем пересування під час повномасштабного вторгнення в Україну на основі краудсорсингових всеохопних даних про дорожній рух.....	109
4.2. Вплив просторово-часових відхилень на пересування у сценаріях гуманітарного конфлікту.....	118
4.3. Формування залежності між показниками індексу завантаження та площею зон із відхиленнями в умовах війни.....	132
4.4. Висновки з розділу.....	144
ВИСНОВКИ.....	145
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	147
ДОДАТКИ.....	161
Додаток А. Опитування щодо евакуації українців із початком повномасштабного вторгнення.....	162
Додаток Б. Перелік воєнних подій в деяких містах України з 24.02.2022 до 12.04.2022.....	168
Додаток В. Деталізований перелік воєнних подій в деяких містах України з 24.02.2022 до 15.05.2022.....	182
Додаток Г1. Акт про використання результатів дисертаційної роботи у навчальному процесі кафедри «Транспортні технології».....	190
Додаток Г2. Акт про впровадження результатів дисертаційної роботи у ПП «Інжинірингова компанія «ДорПроектСтандарт»».....	191
Додаток Г3. Акт про впровадження результатів дисертаційної роботи у департаменті міської мобільності та вуличної інфраструктури.....	192
Додаток Г. Список публікацій здобувача за темою дисертації.....	193

## СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ

ВДМ – вулично-дорожня мережа

ТП – транспортний потік

ТЗ – транспортний засіб

АТ – автомобільний транспорт

ТС – транспортна система

ПЗ – пропускна здатність

ПЧ – проїзна частина

ДТП – дорожньо-транспортна пригода

ТрП – транспортна послуга

ГІС – геоінформаційні системи

ГА – генетичний алгоритм

ЄС – Європейський Союз

$CI$  – індекс завантаження відрізка;

$CoV_i^{dW}$  – коефіцієнт варіації тривалості пересування відрізка  $i$  протягом ковзного вікна руху тривалістю  $W$  днів для часу відправлення  $d$ ;

$OZI_i^{dt}$  – індекс завантаження відрізків зон відправлення;

$DZI_i^{dt}$  – індекс завантаження відрізків зон призначення;

$\mu$  – математичне сподівання;

$D$  – дисперсія;

$\sigma$  – середнє квадратичне відхилення;

$Ar$  – площа міста із відхиленнями;

$d$  – кількість днів від початку фази.

## ВСТУП

**Актуальність теми дослідження.** Повномасштабне вторгнення РФ в Україну 24 лютого 2022 року створило прецедент найбільшого гуманітарного конфлікту в Європі з часів Другої світової війни. Военні дії спричинили гуманітарну кризу, змушуючи людей шукати безпечніше місце проживання, що стало причиною масових пересувань населення. Результатом екстреної міграції населення України стали значні відхилення у функціонуванні транспортних систем, а руйнування інфраструктури у зв'язку із воєнними діями створювали додаткові перешкоди.

Рідкісність таких подій як війна, а також складність отримання початкових даних для аналізу створили нестачу якісних досліджень щодо формування транспортних потоків під час гуманітарних конфліктів. Розуміння особливостей функціонування транспортних систем та можливих збоїв у їх роботі за таких умов є критично важливим для забезпечення безпеки населення, вчасного постачання гуманітарної та військової допомоги.

Отже, дослідження особливостей формування транспортних потоків в умовах війни є актуальним і важливим як для науки, так і для практичного застосування з метою ефективного управління та підтримки життєво важливих процесів у країні.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Тема дисертаційної роботи відповідає науковому напрямку кафедри транспортних технологій Національного університету «Львівська політехніка». Дисертація виконана в межах науково-дослідних робіт кафедри «Оптимізація автомобільних транспортних систем та підвищення безпеки дорожнього руху» (номер державної реєстрації 0118U000348, 2018–2022 рр.) «Оптимізація параметрів транспортних систем та підвищення ефективності перевізних процесів» (номер державної реєстрації 0123U100402, 2023–2027 рр.). У роботі частково враховані положення, сформовані у «Транспортній стратегії України

на період до 2030 року», схвалений Розпорядженням Кабінету Міністрів України від 30.05.2018 р. №430-р.

**Мета і завдання дослідження.** Метою роботи є дослідження особливостей формування транспортних потоків в умовах війни.

Для досягнення мети сформульовано такі завдання:

- проаналізувати стан питання щодо особливостей формування транспортних потоків в умовах надзвичайних ситуацій;
- дослідити транспортну поведінку населення України під час початкової фази повномасштабного вторгнення на основі опитування;
- сформувати базу даних воєнних подій у досліджуваних містах;
- дослідити показники дорожнього руху у містах України під час повномасштабного вторгнення;
- проаналізувати отримані дані, сформувати моделі залежності отриманих показників.

**Об'єкт дослідження** – тривалість пересування відрізками вулично-дорожніх мережі в умовах гуманітарного конфлікту.

**Предмет дослідження** – закономірності зміни індексу завантаження на відрізках вулично-дорожньої мережі, визначені на основі тривалості пересування в умовах гуманітарного конфлікту.

**Методи дослідження** – під час виконання дисертаційного дослідження використовувалися методи: документальних досліджень для отримання даних про вулично-дорожні мережі та тривалість пересування їх відрізками; математичної статистики для опрацювання отриманих масивів даних; математичного моделювання для визначення попиту на пересування та інших характеристик дорожнього руху; регресійного аналізу для побудови моделей залежності.

**Наукова новизна отриманих результатів:**

– вперше досліджено зміни у транспортних потоках у зв'язку із конкретними воєнними подіями під час масштабного гуманітарного конфлікту;



- розроблено класифікацію воєнних подій для використання під час аналізу транспортних процесів;
- набула подальшого розвитку методологія оцінки попиту мережі для моделювання та аналізу його впливу на пересування під час вторгнення в Україну.

### **Практичне значення отриманих результатів:**

Результати дисертаційного дослідження можуть бути використані для розуміння особливостей формування транспортних потоків під час початкових фаз гуманітарних конфліктів, оцінки потенційних часових та просторових особливостей міграції (евакуації) мешканців міст, розроблення схем управління дорожнім рухом на місцях, залежно від воєнних подій.

Використана методологія дозволяє дослідникам швидко порівнювати різні політики та події, оцінюючи матриці поїздок у різних мережах, і допомагає зрозуміти сукупні зміни попиту залежно від періоду часу або проаналізувати вплив змін у мережі та попиту на критичні показники ефективності.

Окремі результати дисертаційних досліджень використовуються під час підготовки фахівців за спеціальністю 275 «Транспортні технології (за видами)» спеціалізація 275.03 «Транспортні технології (на автомобільному транспорті)» (освітньо-професійні програми «Організація і регулювання дорожнього руху» та «Організація перевезень і управління на транспорті (за видами транспорту)»).

Окремі результати дисертаційної роботи використовуються у роботі Департаменту міської мобільності та вуличної інфраструктури Львівської міської ради та ПП «Інжинірінгова компанія «ДорПроектСтандарт»» під час транспортного моделювання та планування вулично-дорожніх мереж міст України.

**Особистий внесок здобувача.** Авторкою опубліковано у співавторстві 1 наукову статтю у фаховому виданні України, у співавторстві 1 наукову статтю у закордонному виданні, що входить до наукометричної бази Scopus (другий

квартиль), 1 одноосібну статтю у фаховому виданні України, а також 5 тез доповідей на всеукраїнських та міжнародних конференціях. У працях, опублікованих у співавторстві, особистий внесок авторки полягає у такому: розроблення та застосування гравітаційної функції для проведення дослідження [7], формування бази даних воєнних подій у містах України під час повномасштабного вторгнення, аналіз впливу воєнних подій на зміни у варіабельності тривалості пересування та індексі завантаження відрізків [128, 130], інтерпретація результатів опитування та воркшопу щодо прогнозування транспортної поведінки під час виникнення надзвичайних подій [38].

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати наукових досліджень доповідалися на: Четвертій Всеукраїнській науково-теоретичній конференції «Проблеми з транспортними потоками і напрямки їх розв'язання», (Львів, 25 – 26 березня 2021 р.); Symposium on Management of Future Motorway and Urban Traffic Systems 2022 (Дрезден, Німеччина, 30 листопада – 2 грудня 2022 р.); The 102<sup>nd</sup> Transportation Research Board (Вашингтон, США, 8 – 12 січня 2023 р.); The 51<sup>st</sup> European Transport Conference, (Мілан, Італія, 6 – 8 вересня 2023 року); The 103<sup>rd</sup> Transportation Research Board (Вашингтон, США, 7 – 11 січня 2024 р.).

**Публікації.** За темою дисертації опубліковано 3 наукові праці, з яких одна у науковому періодичному виданні інших держав, що включене до наукометричної бази Scopus (другий квартиль) та 2 у наукових фахових виданнях України, а також 5 тез доповідей на наукових конференціях.

**Структура і обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел, який налічує 131 найменування і 5 додатків. Основна частина роботи викладена на 128 сторінках. Є 57 рисунків та 12 таблиць. Загальний обсяг дисертації – 194 сторінки.

## РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ ЩОДО ОСОБЛИВОСТЕЙ ФОРМУВАННЯ  
ТРАНСПОРТНИХ ПОТОКІВ, В ТОМУ ЧИСЛІ ПІД ЧАС НАДЗВИЧАЙНИХ  
СИТУАЦІЙ

## 1.1. Показники дорожнього руху та мобільності

Сьогодні значна частка пересування містом здійснюється за допомогою транспортних засобів. У свою чергу, ці транспортні засоби (ТЗ) формують потоки, які рухаються вулично-дорожньою мережею (ВДМ). Дослідження особливостей формування транспортних потоків (ТП) у містах, а також управління ними є актуальним питанням, особливо в останні роки, коли рівні автомобілізації та автомобілекористування зростають.

Розвиток методів організації та управління дорожнім рухом, використовуючи різноманітні технічні засоби, відбувався та надалі триватиме завдяки розумінню особливостей утворення та функціонування ТП [1].

У минулому столітті Лайтхілл (англ. Lighthill) і Візем (англ. Whithem) у 1955 році [2] та Річардс (англ. Richards) у 1956 році [3] незалежно один від одного розробили першу динамічну модель ТП. Ця модель описує дорожній рух на відрізку за допомогою закону збереження і рівноважного співвідношення між щільністю й інтенсивністю, більш відома як фундаментальна діаграма.

Гіпотеза зазначеної теорії полягає в тому, що в будь-якій точці дороги потік  $q$  (ТЗ на годину) є функцією концентрації  $k$  (ТЗ на милю) [2]. У вітчизняній літературі ми зустрічаємо дещо інші умовні позначення зазначених показників [1, 4]. Тож, для зручності використовуватимемо таке розшифрування діаграми: інтенсивність ТП, яка є функцією щільності.

Базовою залежністю, якою описується згадане вище твердження є [2, 5]:

$$V = \frac{N}{q}, \quad (1.1)$$

де  $V$  – швидкість ТП, км/год,  $N$  – інтенсивність ТП, авто/год,  $q$  – щільність ТП, авто/одиницю відстані.

Ця залежність – «середньопросторова швидкість» Уордропа (англ. Wardrop), яка є одночасно і відношенням інтенсивності до щільності, і відношенням довжини відрізка до середньої тривалості його перетину ТЗ. Таким чином, це середня швидкість ТЗ, зважена відповідно до тривалості перебування на ділянці дороги [2, 5]. Перше зображення основної діаграми ТП, яка стала фундаментом розуміння його поведінки подано на рис. 1.1. Суцільна лінія ліворуч побудована на основі даних залежності «швидкість – щільність», праворуч – на основі даних залежності «швидкість – інтервал між ТЗ», а центральна точка  $(q_m, k_m)$  – на основі вимірювань на зупинковому пункті після того, як «довгий» потік транспорту був зупинений, а потім знову розпочав вільний рух вперед [2].

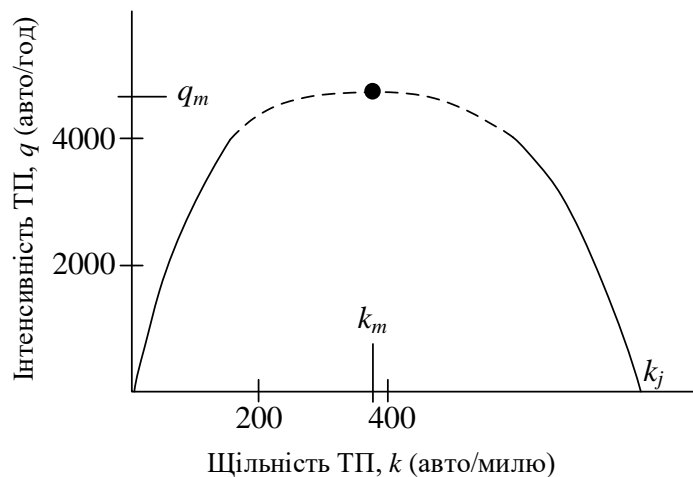


Рис. 1.1. Основна діаграма транспортного потоку [2]

На рис 1.1 можна спостерігати зростання інтенсивності руху із зростанням щільності, але лише до певної точки – пропускної здатності (ПЗ) проїзної частини (ПЧ) [1]. Тут швидкість руху спадає зі збільшенням інтенсивності, причому нахил є крутим для вузьких доріг, але більш

поступовим для широких доріг [2]. Уордроп приписує вплив збільшення інтенсивності, головним чином, збільшенню кількості перешкод під час обгону, що має тенденцію до зниження середньої швидкості до швидкості найповільнішого ТЗ на дорозі. Безсумнівно, загальне відчуття більшої ймовірності аварій також сприяє зниженню середньої швидкості [5].

Дудніков О.М. у роботі [4] щодо дослідження багаторядних щільних ТП розвинув теорію основної діаграми, зазначивши, що воно не описує реальний ТП і є двома моделями одночасно: в конкретному перетині ПЧ та на її відрізку. Він висунув гіпотезу, що залежність «швидкість – щільність» змінюється в межах певного «коридору», а не є сталою. Тож автор зобразив згадувану вище діаграму просторово (рис. 1.2).

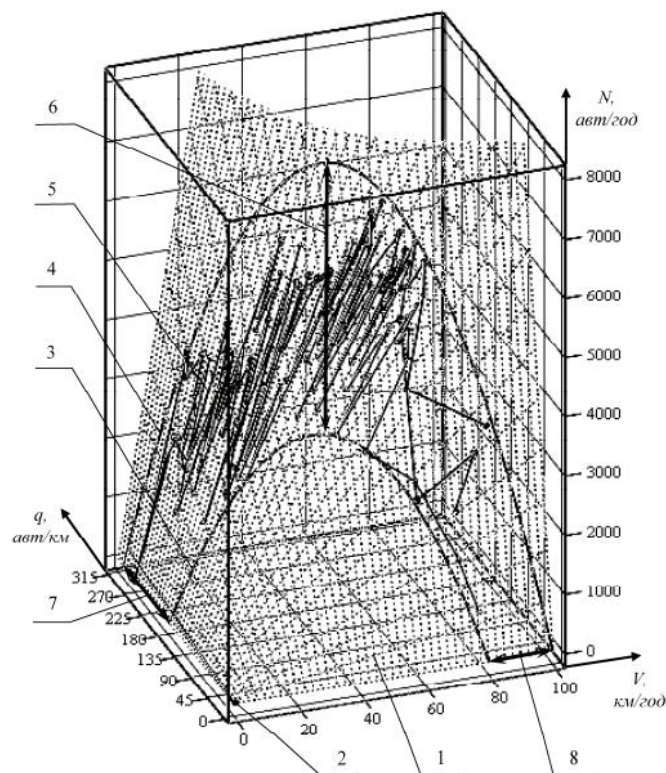


Рис. 1.2. Узагальнена основна діаграма станів багаторядного транспортного потоку [4]

1 – поверхня  $N=Vq$ ; 2 – точка відсутності ТП; 3, 4 – просторові параболы, що обмежують «коридор» коливань станів багаторядного ТП; 5 – ламані лінії, що з'єднують дослідні точки станів багаторядного ТП при зростанні його щільності; 6 – інтервал зміни ПЗ ділянки дороги для багаторядного ТП; 7 – інтервал зміни максимальної щільності багаторядного ТП на ділянці дороги; 8 – інтервал зміни швидкості руху поодиноких автомобілів на ділянці дороги

Рисунок демонструє, що кожен з показників має певний інтервал зміни. До того ж, визначено зв'язок зміни ПЗ ПЧ із змінами максимальної щільності ТП та швидкості окремих ТЗ [4].

У роботі [6] автори зазначають, що у ТП відбуваються значно складніші процеси, ніж їх може відобразити основна діаграма. Достатньо справедливим такий опис буде для однорідного складу потоку, а також для нормального стану дороги і середовища. Якщо ж змінити умови видимості, стан дорожнього покриття, склад потоку, профілі дороги, то характер діаграми також зміниться. Але, незважаючи на це, описані вище показники – інтенсивність, щільність та швидкість можна вважати базовими для розуміння транспортних потоків .

Проте, звісно, для вирішення різних завдань, пов'язаних із організацією та управлінням дорожнім рухом і загалом транспортом, існує велика кількість інших чинників, які варто враховувати.

До прикладу, досить вагомим чинником, що демонструє рівень потреб транспортної системи (ТС) міста є рівень моторизації [7], або ж у вітчизняній літературі більш відомий як рівень автомобілізації [1].

Сам же рівень автомобілізації визначається як кількість автомобілів на 1000 мешканців. В Україні, та у світі загалом, цей показник стрімко зростає. Проте, існує думка, що рівень автомобілізації має певну межу насичення, за якої він стабілізується і надалі лише оновлюється сам парк ТЗ [1].

Робота [8] підтверджує, що дохід є вагомим чинником, який визначає власність на ТЗ як на рівні країни, так і на рівні міста, також як на національному, так і на міському рівні власність на ТЗ зростає приблизно тими ж темпами, що й дохід. Цікавим висновком дослідження є те, що дохід є основним чинником, який визначає протяжність доріг на національному рівні. Вона зростає приблизно такими ж темпами, як і дохід. Оскільки національні мережі доріг розширюються, як і національні автопарки, затори на них навряд чи погіршуватимуться. Але на міському рівні протяжність доріг зростає набагато повільніше, ніж доходи населення і набагато повільніше, ніж

кількість автотранспорту. Тому міські затори з часом зростають разом із доходами, а збільшення заторів у містах стимулює децентралізоване зростання міст.

Разом із зростанням рівня автомобілізації зростає і пробіг автомобільного транспорту. Проте останній також має нерівномірний розподіл. У [1] зазначено, що 55-70% займають магістральні вулиці загальноміського значення, 20-30% - магістральні вулиці районного значення, а 10-15% вулиці й дороги місцевого значення.

Режими руху ТП теж є не однаковими за різних умов. Вони характеризуються такими показниками, як швидкість потоку, його щільність (інтервали між ТЗ), режим гальмування та прискорення, кількість та траєкторія обгонів тощо [1].

Автори Першаков, Белятинський, Степанчук та Кротов у своїй монографії за цими індикаторами виділяють такі режими руху ТП [1]:

- вільний потік – автомобілі рухаються осібно, майже не взаємодіють між собою і не створюють перешкод іншим ТЗ;
- частково зв'язаний потік – на ВДМ формуються групи автомобілів, які рухаються за лідером до можливості здійснення обгону;
- зв'язаний потік – групи ТЗ є досить великими, а швидкість руху в них залежать від автомобіля-лідера;
- щільний (насичений) потік – швидкість руху та інтервал між ТЗ в потоці є приблизно однаковими. За таких умов можливість здійснення обгону ускладнена.

В той же час, автор Б. С. Кернер (англ. Kerper) у своїй праці [9] описує два найбільш використовувані стани ТП на той час – вільний і перевантажений потоки. Проте другий тип він розділяє на ще дві фази: синхронізований потік та рухомий затор.

А у роботі [10] згадуються фази у русі, які подібні до раптових переходів, що відбуваються з рідинами – коли пара перетворюється на воду або вода на лід:

- фаза 1 – інтенсивність дорожнього руху невелика, ТЗ рухаються із бажаною швидкістю та легко змінюють смуги руху. Тут ТЗ порівнюються з частинками пари з великою свободою пересування;
- фаза 2 – рух стає більш інтенсивним, ТЗ раптово втрачають значну частину своєї свободи і змушені пересуватися як частина загального ТП, рухаючись зі швидкістю загального потоку і часто не маючи можливості перелаштування. Ця фаза, подібна до води, отримала назву «синхронізованого» потоку;
- фаза 3 – інтенсивність наближається до межі ПЗ (заторовий стан), рух здійснюється із зупинками (старт-стоп рух). Подібно до води, що замерзає в лід, ТЗ стоять на місці.

Але одним із основних питань дослідників є причини та умови, за яких відбуваються ці фазові переходи. В.І. Єресов, О.В. Григор'єва у [10] пояснюють їх як «якісні стрибкоподібні зміни у швидкості та щільності ТП». Ці зміни виникають у певному місці і поширюються вздовж потоку хвилеподібно. Найчастіше причиною руйнування синхронізованого чи вільного ТП є неоднорідності дороги чи вулиці – звуження ПЧ, або ж, так звані, «пляшкові горла».

Тенденція зростання рівня автомобілізації та загального пробігу ТЗ спостерігається як в Україні, так і світі: сучасна висока концентрація міського та приміського населення спричиняє перевантаження ВДМ кількістю ТЗ у крупних та найкрупніших містах [1, 11].

Тому сьогодні актуальними є принципи сталої міської мобільності, яка ґрунтується на парадигмі відходу від традиційного транспортного планування міст.

Термін «сталий розвиток» вперше був введений Міжнародним союзом охорони природи та природних ресурсів у дослідженні, проведеному на замовлення Програми ООН з навколишнього середовища (ЮНЕП) та Всесвітнього фонду природи (WWF). Документ запропонував стратегію збереження природи, яка пізніше була популяризована у широко відомому



Звіті Брандтленд [12], який апелював до ідеї про те, що у всієї планети є спільне майбутнє. У широкому сенсі сталий розвиток у цих звітах розуміється як стратегія сприяння розвитку, яка підтримує гармонійні відносини між людством і природою у трьох аспектах: соціальна інтеграція, економічний розвиток та екологічна рівновага [13].

Тож сталий розвиток застосовується і в питаннях управління міськими ТС, проте з дещо видозміненими підходами, які детальніше подані у таблиці 1.1 [14].

*Таблиця 1.1*

**Деякі основні відмінності між традиційним процесом планування та плануванням сталої міської мобільності [14]**

<b>Традиційне транспортне планування</b>	<b>Планування сталої міської мобільності</b>
1	2
Зосередження на дорожньому русі	Зосередження на людях
Першочергові завдання: ПЗ та швидкість ТП	Першочергові цілі: доступність та якість життя, а також сталість, економічна життєздатність, соціальна справедливість, здоров'я та якість навколишнього середовища
Орієнтований на певні види транспорту (часто це лише приватний автомобіль)	Збалансований розвиток усіх відповідних видів транспорту та перехід до більш чистих і сталих способів пересування
Зосередження на інфраструктурі	Інтегрований комплекс дій для досягнення економічно ефективних рішень
Документи секторального планування	Документ секторального планування, який узгоджується та доповнює суміжні сфери політики (наприклад, землекористування та просторове планування; соціальні послуги; охорона здоров'я; правозастосування та охорона правопорядку тощо)
Коротко- та середньостроковий план реалізації	Коротко- та середньостроковий план реалізації інтегрований у довгострокове бачення та стратегію

## Продовження таблиці 1.1

1	2
Пов'язане з адміністративною територією	Пов'язане з функціональною територією, що базується на схемах доїзду до роботи
Сфера діяльності інженерів з організації дорожнього руху	Міждисциплінарні групи планування
Планування експертами	Планування із залученням зацікавлених сторін, застосовуючи прозорі підходи, які ґрунтуються на принципі участі (партисипативному підході)
Обмежена оцінка результатів	Регулярний моніторинг та оцінка впливу для інформування структурованого процесу навчання та вдосконалення

Основною проблемою дорожнього руху сьогодення, що перешкоджає сталому розвитку, є затори. Вони спричиняють затримки, незручності та економічні втрати для водіїв, а також забруднення повітря [7, 11]. Ідентифікація та кількісна оцінка заторів мають вирішальне значення для осіб, які приймають рішення, щоб ініціювати стратегії пом'якшення наслідків для покращення загальної стійкості ТС [15].

У роботі [16] визначення рівня заторів розділяють на чотири групи: базові показники, показники співвідношення, рівень обслуговування та індекси (наприклад, індекс завантаження, індекс тяжкості заторів, індекс мобільності коридору, індекс тривалості пробігу по смузі тощо).

Так, наприклад, у роботі [17] подано індекс завантаження відрізка, який визначається так:

$$CI_i = \frac{TT_i}{FFTT_i}, \quad (1.2)$$

де  $CI_i$  – рівень завантаження відрізка  $i$ ,  $TT_i$  – спостережуваний час у дорозі, с,  $FFTT_i$  – час у дорозі вільного потоку, с.

Час у дорозі вільного потоку для відрізка  $i$  оцінюється за допомогою швидкості вільного потоку, яка зазвичай вимірюється в період найменшого завантаження рухом (як правило, опівночі) [17].

Ще одним із найважливіших індикаторів, який може ефективно характеризувати попит на перевезення, є довжина поїздки. Точна оцінка цього показника є основою транспортного планування та калібрування математичних моделей, що використовуються для прогнозування попиту на перевезення. Подібним до цього показника є час, необхідний для реалізації пересування [18].

## 1.2. Чинники, які визначають конфігурацію мережі

На закономірності формування ТП впливають різноманітні чинники. Причини тих чи інших станів ТП можуть полягати у географічному положенні території, індивідуальних психо-фізіологічних якостях водіїв, погодних умовах, соціокультурних принципах міст та держав, архітектурних та містобудівних особливостях тощо [19].

Параметри транспортних мереж значно впливають на формування ТС, а особливо у крупних (значних) та найкрупніших (найзначніших) містах [20, 21], а показники, якими визначаються особливості ВДМ наведено у роботах [22, 23] (рис. 1.3).

Згідно роботи [20] найбільш важливими показниками у транспортному процесі є тривалість пересування мережею та швидкість. Саме ці параметри є такими, які визначають тривалість перевезення пасажирів і вантажів, що в свою чергу, демонструє ефективність роботи міської ТС. З дослідження випливає, що ці показники залежать і від щільності ВДМ, і від рівня автомобілізації (рис. 1.4).

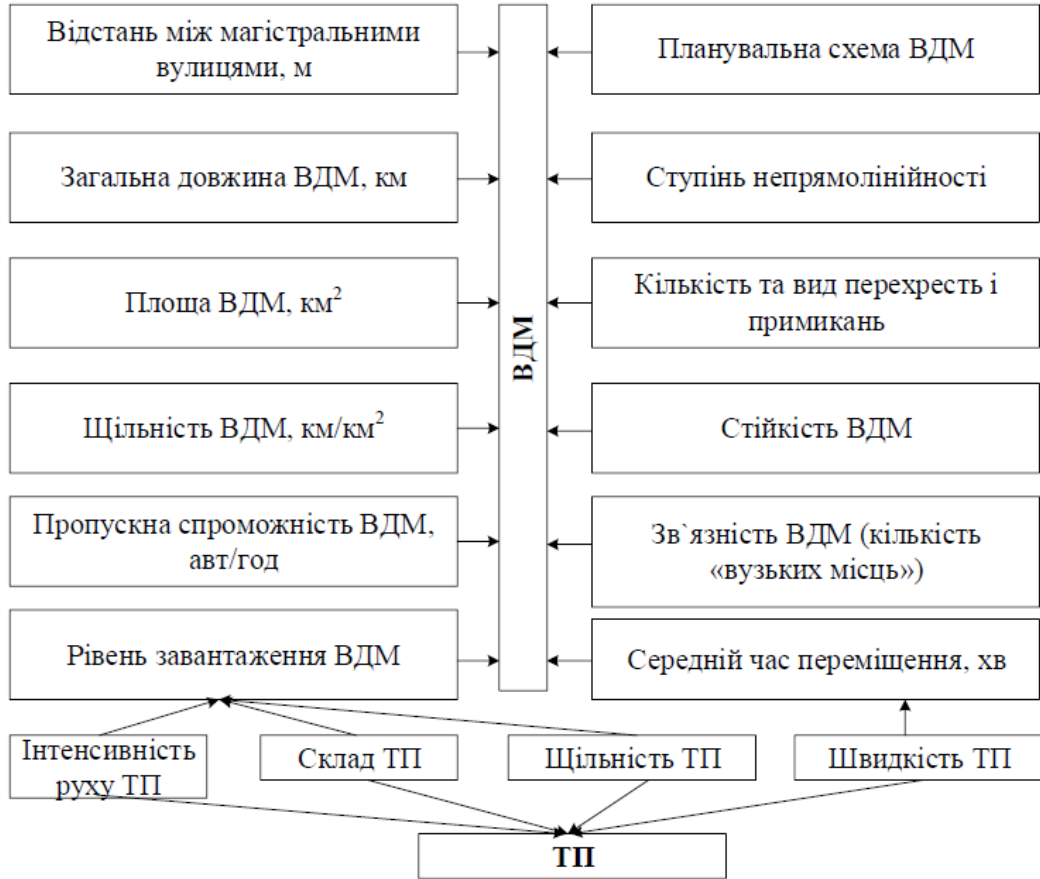


Рис. 1.3. Основні показники, які характеризують ВДМ [22]

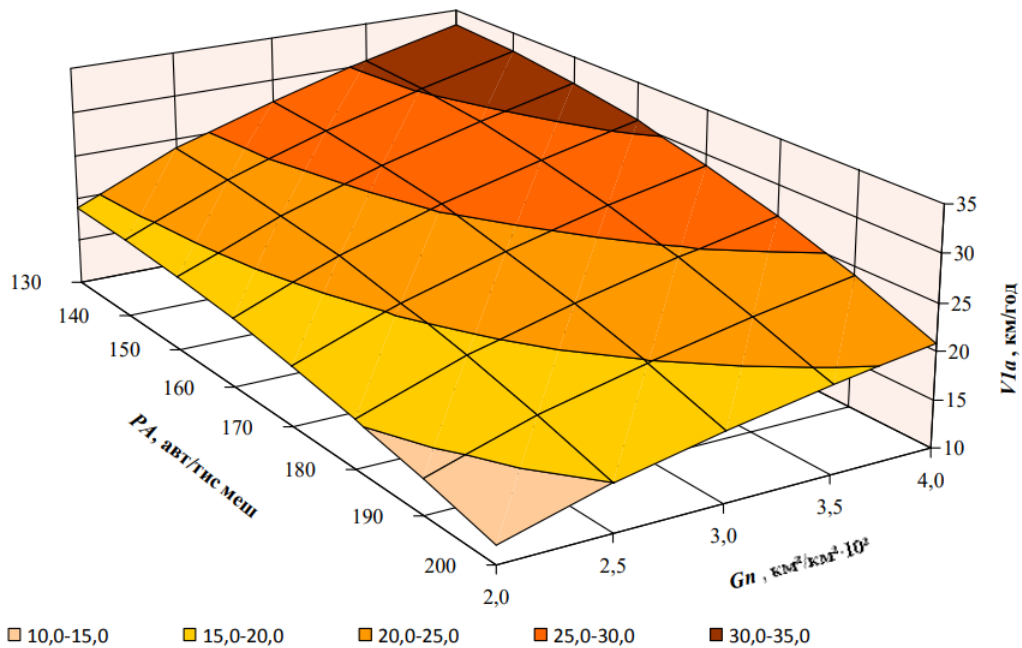


Рис. 1.4. Залежність середньої швидкості пересування мережею ( $V_{IA}$ ) від щільності транспортної мережі ( $G_n$ ) та рівня автомобілізації ( $PA$ ) [20]

З рис. 1.4 видно, що залежність між швидкістю руху і щільністю мережі є прямо пропорційною, тоді як рівень автомобілізації впливає обернено пропорційно. Тобто, середня швидкість зростатиме із зростанням щільності транспортної мережі, проте чинником, який знижуватиме цей показник є ріст рівня автомобілізації. Доцільно, припустити, що наявність більшої кількості ТЗ у населеному пункті спричинить їх більше використання, що збільшуватиме інтенсивності дорожнього руху на ВДМ.

Щільність транспортної мережі є відношенням довжини ВДМ до площі населеного пункту і розраховується за формулою [24, 25]:

$$S = \frac{\sum l_c}{A}, \quad (1.3)$$

де  $\sum l_c$  – сумарна довжина ВДМ, км;  $A$  – площа міста, що обслуговується, км<sup>2</sup>.

Межі коливання цього показника є досить широкими – (0,7-4 км/км<sup>2</sup>) і залежать від частини міста (центральна, середня, периферійна) та його групи (мале, середнє, велике, значне, найзначніше) [24].

Іншим показником, який варто також розглянути, є коефіцієнт непрямої лінійності. Як видно із категоризації геометричних схем планування міст, поданих далі, є досить важливим. Коефіцієнт непрямої лінійності ( $k_{непр}$ ) визначається як відношення шляху, що має прийти ТЗ між пунктом відправлення та пунктом призначення, до повітряної лінії між цими пунктами [25]:

$$k_{непр} = \frac{l_{ij}^{дор}}{l_{ij}^{нов}}, \quad (1.4)$$

де  $l_{ij}^{дор}$  – довжина шляху між пунктами відправлення та призначення по ВДМ, км;  $l_{ij}^{нов}$  – довжина повітряної лінії, км.

Проте, одним із найважливіших чинників, який особливо важливий в контексті дисертаційного дослідження, є конфігурація транспортної мережі [26, 27]. Згідно [25] та [28] вона впливає на різні показники, такі як: швидкість руху ТЗ, ПЗ ВДМ, безпека руху, економічна ефективність як вантажного, так і пасажирського транспорту, втрати часу.

У роботі [24] ВДМ визначається схемою розташування магістральних напрямків у місті. Загалом виділяють вісім геометричних схем, якими можна описати міську планувальну структуру:

- вільна – частіше зустрічається у старих містах. Для неї характерними є вузькі криві вулиці із непостійною шириною ПЧ, часто із одностороннім рухом (за неможливості організації двостороннього). Сьогодні її впровадження є недоцільним і може залишатися лише в історичних районах міст;

- радіальна – характеризується магістральними вулицями, що відходять від центру міста до периферії. Її основним недоліком є складність сполучення між периферійними районами, наслідком чого є перевантаження центру. Доцільною така схема може бути лише у невеликих населених пунктах із невеликою інтенсивністю ТП [29];

- радіально-кільцева – ця схема поєднує два типи магістралей (кільцеві та радіальні). Тут радіальні магістралі заводять ТП із периферії углиб міста, а кільцеві перерозподіляють потоки між радіальними і слугують зв'язком між транспортними районами, які розташовані на одному поясі міста. Ця геометрична схема має найнижчий коефіцієнт непрямолінійності (1,05 – 1,1);

- трикутна – утворюється тоді, коли елементи ВДМ перетинаються під гострим кутом. Такі перетини є досить незручними та небезпечними з погляду організації дорожнього руху, тому ця схема зараз зустрічаються у деяких історичних частинах старих міст;

- прямокутна – частіше зустрічається у новіших містах і є досить поширеною (особливо у США). За такої схеми місто не має чітко сформованого центру і дозволяє легше розподілити потоки по всій ВДМ.

Недоліком схеми є високий коефіцієнт непрямолінійності (1,4 – 1,5) та перепробіги ТЗ, що підвищують транспортні витрати;

- прямокутно-діагональна – виникає, коли у прямокутну схему впроваджуються також додаткові діагональні магістралі чи, так звані, хордові вулиці. Це дозволяє знизити коефіцієнт непрямолінійності (1,2 – 1,3), у порівнянні з прямокутною, але підвищує складність деяких перехресть, на яких може бути по п'ять-шість підходів;

- гексагональна – ця схема є комбінацією шестикутників, які при стикуванні утворюють досить прості перехрестя (три підходи), але не можуть забезпечити швидкий рух ТП, оскільки вулиці не утворюють прямолінійних напрямків;

- комбінована – ця схема найчастіше характерна для великих міст, які формувалися протягом довгого періоду часу. Так, центральні (історичні) частини найчастіше спершу були побудовані за вільною чи радіальною схемами, а далі, в процесі розвитку, додавалися кільцеві магістралі для покращення зв'язків у місті. Нові райони зазвичай добудовуються за прямокутною або прямокутно-діагональною схемами.

Не менш важливим показником, який характеризує ВДМ є ПЗ. Highway Capacity Manual [30] пояснює цей термін так: «Пропускна здатність об'єкта – це максимальний погодинний показник, за якої люди чи ТЗ обґрунтовано можуть перетинати точку або однорідну ділянку смуги чи дороги протягом певного періоду часу за переважаючих умов ПЧ, дорожнього руху та контролю». Переважаючі умови дорожнього полотна, руху та контролю визначають ПЗ. Ці умови мають бути достатньо однорідними для будь-якої ділянки об'єкта, що аналізується. Будь-яка зміна переважаючих умов змінює ПЗ об'єкта. Як і інтенсивність руху, ПЗ має одиниці вимірювання кількість ТЗ за одиницю часу, найчастіше авто/год.

У роботі [31] згадується кілька різних понять ПЗ:

- проєктна – максимальна інтенсивність руху, яка може пройти через поперечний переріз дороги з певною ймовірністю за попередньо визначених

дорожніх та погодних умов. Це значення використовується для планування та проектування доріг і ПЧ, його можна отримати за допомогою непрямих емпіричних методів оцінки ПЗ;

- стратегічна – максимальна інтенсивність руху, яку може обслуговувати ділянка дороги. Вважається корисним значенням для аналізу умов руху в дорожніх мережах (наприклад, розподіл та моделювання дорожнього руху). Вона ґрунтується на даних спостережень за ТП з використанням статичних моделей ПЗ;

- операційна – відображає фактичну максимальну інтенсивність руху на ПЧ, яка вважається корисною величиною для короткострокового прогнозування дорожнього руху і за допомогою якої можна здійснювати управління ним. Це значення ґрунтується на прямих емпіричних методах визначення ПЗ з використанням динамічних моделей.

1.3. Зональні чинники. Транспортне районування під час вивчення мобільності

Місто завжди є територією, на якій взаємодіють простори із різним функціональним призначенням – житло, промисловість, рекреація, освіта, культура тощо. І, звісно, сполучення між цими просторами забезпечується тим чи іншим способом пересування, включно із різноманітними ТЗ. Чим більше місто розвивається, тим складнішим є завдання забезпечення ефективної взаємодії мешканців та гостей із ним [32].

Розвиток транспортного планування, а особливо моделювання, впровадив систему зонування міст для полегшення роботи із ними. Проте досі не існує єдиного підходу для цього. Одним із основних є функціональне зонування території – це розподіл міської території за способом її використання (типом функцій, які на ній виконуються) [33].

Згідно ДБН Б.2.2-12:2019 [21] під час містобудівного проектування території поділяються на: сельбищну, рекреаційну, виробничу та ландшафтну.



Більш детально у містах земельні ділянки можна класифікувати за такими функціональними зонами: житлова та громадська забудови; виробнича забудова; комунально-складська забудова; ландшафтна й рекреаційна; курортно-оздоровча; озеленені території; природоохоронного призначення; історико-культурного призначення; транспортні комунікації; інженерні комунікації; спеціального призначення.

Окрім функціонального зонування цей же норматив подає й інші способи класифікації територій міста [21]:

- будівельне зонування – за щільністю населення на 1 га та поверховістю забудови;
- ландшафтне зонування – згідно співвідношення площі забудованих і відкритих просторів;
- містобудівне – залежно від відстані розташування від центру міста.

Тут виділяють центральну, серединну та периферійну зони.

Під впливом традиційного мислення, експерти з містопланування схильні до чіткого зонування під час підготовки генеральних планів міст та інших стратегічних документів. Тому транспортні потреби між цими функціональними зонами зростають, посилюючи затори на дорогах. Автори у роботі [34] висувають досить контраверсійну ідею і вважають, що місто недоцільно розглядати як низку окремих компонентів. Натомість створення багатофункціонального комплексного середовища дозволить розвантажити його ТС від непотрібних переміщень. Тобто, звичні генеральні плани із чітким розділенням на функціональні зони, створюють додатковий транспортний попит, якого можна було би уникнути зміною підходів до планування територій. Поєднання житлових, робочих, комерційних та розважально-рекреаційних функцій в одній зоні має зменшити інтенсивність ТП у мережі. Іншим подібним підходом, який допоможе знизити необхідність маятникових переміщень, є створення міст із кількома (багатьма) центрами, таким чином, мінімізуючи відстані щоденних переміщень мешканців. Надмірно централізоване одностороннє сполучення є причиною заторів у пікові години.

Наскрізним твердження у роботі є те, що структура міста є однією із першопричин заторових станів [34].

Поділ міста на зони необхідний не лише для розуміння процесів у ньому, але й також широко застосовується у транспортному моделюванні та плануванні. Для цього здійснюється поділ території, яка досліджується, на транспортні райони (англ. TAZ (traffic analysis zones) – зони аналізу дорожнього руху). Такий поділ може як ґрунтуватися на вище описаних способах, так і відбуватися із застосуваннях інших методик, притаманних галузі саме транспортних досліджень.

Транспортні райони використовуються в моделюванні попиту на транспортні послуги (ТрП) для представлення просторового розподілу пунктів відправлення та призначення поїздок, а також населення, зайнятості та інших просторових атрибутів, які генерують попит на ТрП або іншим чином впливають на нього. Міська територія поділяється на ряд взаємовиключних і сукупно вичерпних зон. Хоча подорожі фактично відбуваються з однієї точки міського регіону в іншу, всі пункти відправлення та призначення в моделі попиту на ТрП представлені на просторово агрегованому рівні переміщення від зони відправлення до зони призначення. Ці переміщення далі агрегуються в моделях мережевого призначення як такі, що починаються і закінчуються в окремих точках в межах зон відправлення і призначення – центроїдах [35].

У роботі [36] зазначається, що поділ території на численні зони є першим кроком у дослідженнях, що стосуються транспортного планування. Очікується, що системи зонування відобразатимуть характеристики території, яку вони поділяють, і це має вирішальне значення для процесу планування.

Агрегування просторових даних у транспортні райони є одним із джерел неточності транспортного аналізу, отриманого внаслідок довільного визначення меж цих районів. Визначення меж транспортних районів може вплинути на соціально-економічні характеристики підрайону (основної

проблемної території), які впливають на схеми поїздок відправлення-призначення [37].

Для формування цілей транспортного планування все частіше використовуються автоматизовані методи проектування зон та створення систем зонування [36]. Першу систематичну алгоритмічну спробу визначення транспортних районів здійснив Опеншоу (англ. Openshaw) ще у 1977 році [37], розробивши ієрархічну евристичну процедуру для вирішення задачі автоматичного зонування шляхом оптимізації цільової функції, яка вимірює продуктивність розділу з точки зору моделі та заздалегідь визначеного цільового значення.

Розробка системи транспортного районування – це значною мірою пошук компромісів серед широкого спектру критеріїв, які часто принаймні дещо суперечать один одному. Ці критерії можна умовно розділити на дві основні (але взаємопов'язані) категорії: підходи щодо моделювання та географічні підходи [35].

Зональний підхід до моделювання попиту на ТрП має багато потенційних впливів на дизайн та ефективність моделі. Питання, які слід враховувати під час розроблення системи транспортного районування з погляду моделювання, включають соціально-економічну агрегацію, просторове агрегування, моделювання коротких поїздок, проектування центроїдів та центроїдних з'єднань і визначення зони дослідження та опрацювання зовнішніх зон [35].

Серед географічних чинників, які варто враховувати під час визначення меж транспортних районів, є узгодженість із географією початкових даних, узгодженість із необхідними вихідними просторовими одиницями, зокрема, політичними межами, відповідність основним фізичним характеристикам і бар'єрам [35].

Підсумовуючи вищезгадане, Ерік Дж. Міллер (англ. Eric J. Miller) у роботі [35] виділив такі рекомендації, які важливо враховувати під час розподілу території дослідження на транспортні райони:

1. Розмір зони є важливим визначальним чинником для питань просторової агрегації, особливо для моделювання транзитних (і активних) пересувань. Розміри зон мають бути якомога меншими, відповідно до обчислювальних та інших обмежень.

2. Узгодженість з географією малих зон (виходячи з кількості мешканців відповідно до даних перепису населення) є дуже бажаною і має підтримуватися там, де це можливо (визнаючи, що деякі відхилення від ідеальної узгодженості часто є неминучими).

3. Узгодженість з основними політичними межами є важливою, а з ключовими межами планування також є дуже бажаною.

4. Варто передбачати і планувати поділ приміських і сільських зон, щоб відповідати зростанню населення в наступному році.

5. Доцільно уникати використання зон неправильної форми.

6. За можливості, визначати зони таким чином, щоб вони містили однорідне землекористування (особливо ті, що не генерують пересувань). Відокремлення житлових зон від зон зайнятості сприяє зменшенню внутрішньозональних поїздок (принаймні для поїздок на роботу).

7. Послідовно розміщувати центроїди зон у «центрі тяжіння активності» зони, визначеному за центроїдом завершень поїздок, як це спостерігалось в обстеженні базового року.

8. Зони з дуже великою чисельністю мешканців або зайнятості слід розглядати на предмет поділу на дві або більше зон, за умови, що всі інші критерії для створення зон дотримані.

#### 1.4. Формування мобільності під час надзвичайних ситуацій

Протягом всього свого існування людство постійно зазнає впливу різних катастроф як природнього, так і техногенного характеру. Надзвичайні ситуації значно впливають на наше середовище існування, інколи змінюючи його докорінно. Важливим є те, що науковці звертають увагу на такі події і

намагаються їх досліджувати аби розуміти механіку їх впливу на функціонування різних сфер життя. Вивчення змін у дорожньому русі (ТР) під час катастроф дозволяє не лише проаналізувати вплив таких подій, а й розробити систему превентивних та/або екстрених заходів, що дозволять зменшити чи уникнути збоїв у роботі ТС [38].

Однією із досить частих, але в той же час непередбачуваних надзвичайних подій є землетрус. Розуміння та моделювання попиту на пересування в такій ситуації, розглядаючи заходи щодо забезпечення функціонування дорожнього руху одразу після неї й відновлення роботи транспортних мереж, є надзвичайно важливими. У такому випадку оцінка попиту є досить непростою, крім того фізичні пошкодження транспортної інфраструктури додають складності [39].

У роботі [40] досліджено зміни у дорожньому русі під час землетрусу в Кумамото (Японія) у квітні 2016 року. Вчені зібрали та дослідили дані безпосередньо перед (історичні дані із наявних сервісів моніторингу) та після події. Результати показують, що такі місця, як притулки, супермаркети та громадські лазні були початковою та кінцевою точками пересувань. Це спричинило значні відхилення від нормальних (звичних) моделей дорожнього руху, що базуються на робочих поїздках. Пік евакуації припав на наступний день після основного поштовху, коли територію залишили 184 тис. мешканців.

Вчені розглянули основні маршрути евакуації мешканців і розрахували, що в середньому час подорожі зріс у 2,56 рази. Проте така тенденція спостерігалася лише вдень, а вночі час подорожі був близьким до норми. Це зростання спричинене як збільшенням попиту, так і закриттям певних шляхів для спеціальних ТЗ чи через руйнування. У статті доведено, що чим більшими є руйнування, тим більше кількість пересувань відхилитиметься від нормальної [40].

Дещо подібні висновки є у роботі [39]. Зростання рівня завантаження було більш значним удень, аніж вночі, а також нетипове збільшення спостерігалася поблизу лікарень.

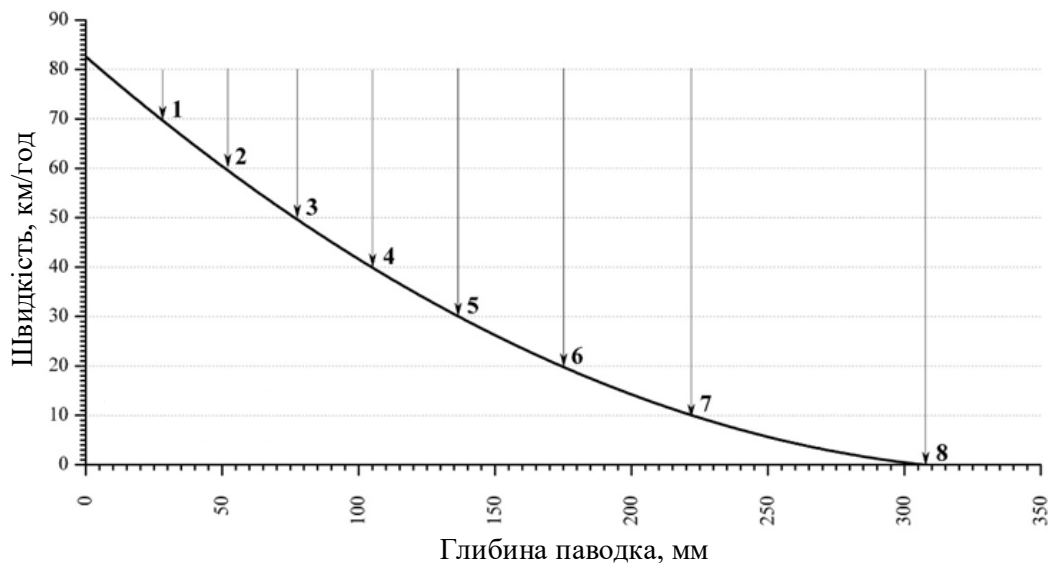
У дослідженні [41] аналізується, як землетрус може порушити ВДМ у міському середовищі та як це вплине на здатність населення пересуватися. Ймовірнісне моделювання було застосовано для міста Месіна (Сицилія, Італія) для історичної події 1908 року та для певного набору змодельованих землетрусів, які відповідають національній імовірнісній моделі сейсмічної небезпеки Італії. Так, з'ясовано, що середня тривалість поїздок збільшилася на 70 – 90% порівняно з початковими базовими значеннями, а середня довжина пересувань виросла не так значно – всього на 15 – 20%.

Іншою надзвичайною подією, яка останнім часом виникає досить часто, є паводок. Як і землетруси, паводки можуть мати прямий вплив на дорожню інфраструктуру – руйнування та затоплення, а також непрямий – вплив на звичний розподіл ТП, перерви в роботі підприємств тощо. Деякі дослідження зазначають, що однією із основних причин смертей у містах під час паводків є перебування та пересування ТЗ по ВДМ [42, 43].

Ґрунтовний аналіз літератури проведений у роботі [42] продемонстрував, що раніше розроблені моделі оцінки стану ВДМ під час паводків є недостатньо правдивими, оскільки розглядають ділянки ВДМ, які покриті водою як такі, що не використовуються для пересування. Проте спостереження свідчать, що до певної глибини водії все ж пересуваються затопленими проїжджими частинами. Тож, провівши додаткові дослідження, вчені з'ясували, що 30 см паводкової води на ВДМ є пороговим значенням, що дозволяє забезпечити безпечне пересування ТЗ, зупинку та керування без втрати контролю.

Автори дослідження [44] також досліджували вплив рівня паводкового затоплення ВДМ на швидкість руху ТЗ. Вони оптимізували поліноміальну функцію другого порядку для розуміння відношення безпечної швидкості до глибини паводку. До того ж, на основі цієї функції, автори створили ранжування вразливості доріг за дев'ятибальною шкалою (0-8) (рис. 1.5). Так, вразливі ділянки на всій мережі ВДМ класифікуються на основі категорії дороги з точки зору середньої максимальної швидкості та величини зниження

середньої максимальної швидкості, що відповідає її нормальному значенню внаслідок паводка, тобто функції безпечної швидкості.



*Рис. 1.5. Скоригована функція безпечної швидкості руху, спричиненої паводком для визначення безпечної швидкості руху відносно його рівня [42, 44]*

На основі цього ранжування розроблено шість класів вразливості до паводків ділянок ВДМ [44]:

1. Стійкий: без змін у швидкості.
2. Низький: зниження швидкості в діапазоні 1 – 10 км/год.
3. Середній: зниження швидкості в діапазоні 11 – 30 км/год.
4. Високий: зниження швидкості в діапазоні 31 – 50 км/год.
5. Дуже високий: зниження швидкості в діапазоні 51 – 70 км/год.
6. Надзвичайно високий: зниження швидкості до нуля або на більше, ніж 80 км/год.

Моделювання впливу паводків на дорожній рух у Барселоні та Брістолі довело, що вплив зростання рівня води на ВДМ не завершується одразу після завершення паводку. Навіть після сходження води мережі все ще потрібен час для відновлення, оскільки ТЗ, які раніше перешкождали, продовжують завершувати свою подорож, а їхня присутність на мережі впливає на інші ТЗ, які рухаються [45].

У дослідженні [46] автори визначили, що тривалість поїздки в під час паводку зростає в середньому на 27%, порівняно із нормальними умовами. Це значення є не надто великим, оскільки деякі ТЗ можуть пересуватися швидше, ніж зазвичай, через зниження інтенсивності руху. Це зумовлене тим, що значна кількість користувачів обирає не здійснювати пересування під час надзвичайної ситуації.

Однією із нещодавніх та досить унікальних надзвичайних подій є пандемія вірусу Covid-19. Станом на сьогодні, її вплив на ТС різних міст є досить вивчений. Запроваджені заходи для запобігання поширенню вірусу були досить суворі, хоча й варіювалися в різних містах та країнах. Соціальне дистанціювання, комендантська година, обмеження або й цілковите скасування руху громадського транспорту, заборона пересування далі, ніж на певну відстань від місця проживання, значно вплинули на транспортну поведінку населення.

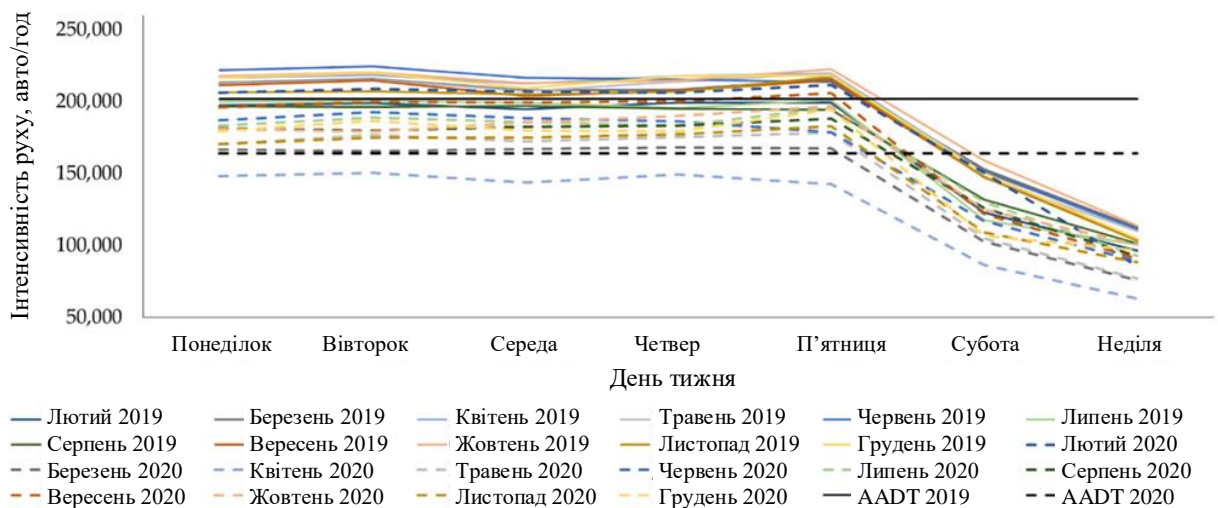
Дослідження [47] стверджує, що накладання обмежень на пересування чи на певні види діяльності генерують менше пересувань по ВДМ, а при їх послабленні спостерігалось більше активності, проте докарантинний рівень не відновлювався. Також цілковита заборона пересувань є ефективною лише на певний короткий час, а при тривалих блокуваннях з часом є тенденція ігнорування рекомендації.

У роботі [48] зазначається, що зниження попиту на пересування під час пандемії спричинене як державними обмеженнями, так і страхом перед зараженням. Ця наукова праця сфокусована на змінах у міському розподілі за способом пересування у Будапешті (Угорщина) у березні 2020 року. Загальна мобільність зменшилася в середньому на 57%, а максимальне зниження за час дослідження становило на 64%. Найбільші змін щодо зниження попиту (на 80%) спостерігалися у частці громадського транспорту. Проте, частка приватного автомобільного транспорту зазнала безпрецедентного зростання – з 43% до 65%. Використання велосипедів спостерігалось частіше більш, ніж вдвічі, проте оскільки ця частка загалом є дуже низькою (з 2% до 4%), то дані



знаходяться в межах статистичної похибки. Швидкими темпами зростає популярність велопрокату, тоді як інші системи спільного використання мобільності зменшилися нижче середнього рівня.

Порівняння інтенсивності руху в окремі дні тижня за певні місяці 2019 та 2020 років та середньорічної добової інтенсивності (AADT – The Annual Average Daily Traffic Volume) за ці ж роки демонструє значене її зниження в час пандемії. На рис. 1.6 суцільною лінією позначені дані за 2019 рік, а пунктирною – дані за 2020 рік. У робочі дні (з понеділка по п'ятницю) значення інтенсивності руху знаходяться на однаковому рівні в усі місяці 2019 та 2020 років, з незначними коливаннями в окремі дні тижня. У вихідні дні (субота та неділя) спостерігається значне зниження інтенсивності руху порівняно зі значеннями, зафіксованими в робочі дні [49].



*Рис. 1.6. Загальна інтенсивність руху на проаналізованих перехрестях у певні дні тижня в певні місяці у 2019 та 2020 роках [49]*

Згідно даних, зображених на рис. 1.6, показник середньорічної добової інтенсивності руху у 2020 році був на 19% нижчим, ніж у 2019 році. А загалом найнижчі значення під час пандемії були зафіксовані у березні та квітні, на початку впровадження обмежень. Тоді зниження інтенсивності було в межах 32 – 36%. Крім того, у роботі зазначено, що при скасуванні регуляторних обмежень рівень середньої інтенсивності все одно був нижчим від

допандемійних значень. Розподіл інтенсивності руху в окремі години доби характеризується меншою погодинною дисперсією на добу, ніж у 2020 році на всіх перехрестях, що досліджувалися. Крім того, у 2020 році ранкові та денні години пік демонструють більше згладжування, ніж у 2019 році [49].

Аналіз часу подорожей сервісом TomTom теж підтверджує значне зниження обсягів руху у багатьох містах світу. Серед них є і два українських міста: Київ (загальне зниження 51%) та Одеса (44%) [49].

Однією із надзвичайних подій, яка цілком характеризується як гуманітарний конфлікт і не може бути передбачена є теракт.

Мабуть, однією із найбільш масштабних та відомих подій є терористичний акт у Нью Йорку 11 вересня 2001 р. Результати дослідження демонструють стійке зниження попиту на авіап перевезення в США до листопада 2023 р. на 7,4%, а негайне зниження становило 26,5% [47, 50].

У зв'язку з цим, багато американців обирали для пересування приватний автомобіль замість повітряного транспорту для внутрішніх подорожей. Це спричинило не лише до зростання інтенсивності дорожнього руху, а й до збільшення кількості дорожньо-транспортних пригод (ДТП) [51]. За наступний рік після атаки у США в результаті ДТП загинуло приблизно на 1600 осіб більше, ніж раніше. А середній місячний приріст пробігу в милях на мешканця країни після вересня 2001 р. становив 27,2 милі, тоді як попередній середній приріст був 9,9 миль. До того ж, стверджується, що подібні зміни спостерігалися не лише в безпосередній близькості до місця подій, а у більшості штатів, не залежно від їх територіального розташування, проте вони були нерівномірними [52].

Науковець Лопес-Руссо у роботі [53] досліджував чи подібний ефект спостерігався після атаки на чотири потяги в Іспанії 11 березня 2004 р., проте результати були протилежними. Іспанці скоротили кількість пересувань поїздами після атаки, але також і зменшилась кількість поїздок приватними автомобілями. Це, в свою чергу, вплинуло на зниження кількості смертельних ДТП.

Після теракту у Лондоні 7 липня 2005 р. в місті зафіксовано значне зростання продажів велосипедів, що свідчить про зміну способу пересування мешканців із громадського на велосипедний транспорт [51].

### 1.5. Висновки з розділу

1. Для розуміння ТП базовими показниками є інтенсивність, швидкість та щільність ТП. Проте, для вирішення комплексних завдань організації та управління дорожнім рухом варто враховувати й інші чинники, такі як рівень моторизації, пробіг АТ, режими руху ТП, індекс завантаження ВДМ тощо.

2. Після проведеного аналізу параметрів ВДМ, які включають, першочергово, її конфігурацію, а також швидкість та тривалість пересування мережею, її щільність, коефіцієнт непрямолінійності, пропускну здатність тощо, зрозуміло, що ці особливості також впливають на формування ТП.

3. Розглянувши різні підходи до поділу міст на транспортні зони, визначено, що жоден з них не задовольняє всі вимоги транспортного планування, але він є необхідним як для розуміння процесів функціонування міста, так і для моделювання та подальшого планування.

4. Аналіз досліджень щодо впливу надзвичайних подій на ТС показав, що ця тема має широкий інтерес у науковців. Найбільш репрезентованою у транспортній літературі є нещодавня пандемія Covid-19. Інші катастрофи, такі як землетрус, теракт чи паводок, найчастіше ґрунтуються на оцінці наслідків, які виявляються в ТС після самої події.

5. Вплив масштабного гуманітарного конфлікту (війни) на ТС та транспортну поведінку є мало вивченим і потребує ґрунтовного дослідження, особливо в контексті функціонування міст в умовах воєнних дій та масштабної евакуації.

## РОЗДІЛ 2

### АНАЛІЗ ТРАНСПОРТНИХ МОДЕЛЕЙ ТА ОБГРУНТУВАННЯ МЕТОДУ МОДЕЛЮВАННЯ

#### 2.1. Транспортне моделювання, його типи та методики

Сьогодні управління ТС вже важко уявити без застосування додаткових засобів моделювання, що допомагають та спрощують процес прийняття рішень під час планування.

Потреба в моделях попиту на ТрП була визнана міськими та транспортними планувальниками та дослідниками ще в середині дев'ятнадцятого століття, коли вперше було описано макроекономічне моделювання просторових потоків людей і товарів [54].

*2.1.1. Чотириступенева модель.* У середині ХХ століття розроблено послідовний процес оцінки попиту на ТрП, що ґрунтується на агрегованих підходах, який став відомим як чотириступенева модель [55]. Вона і сьогодні є основою транспортного планування та прогнозування. Вперше розроблена у 1950-х роках під час досліджень дорожнього руху в метрополії Детройта та транспортного дослідження зони Чикаго і є однією з перших моделей транспортного попиту. Першочерговою її ціллю було знаходження зв'язку між поведінкою користувачів транспортних систем та землекористуванням [56, 57].

Етапи цієї моделі включають [56, 57] (рис. 2.1):

1. генерування (привабливість) пересувань – скільки їх буде здійснено;
2. розподіл пересувань – куди вони будуть спрямовані;
3. розподіл за способом пересування (modal split) – яким способом ці пересування будуть реалізовані (пішки чи за допомогою певного виду транспорту);
4. призначення маршруту – яким маршрутом це переміщення буде здійснене.

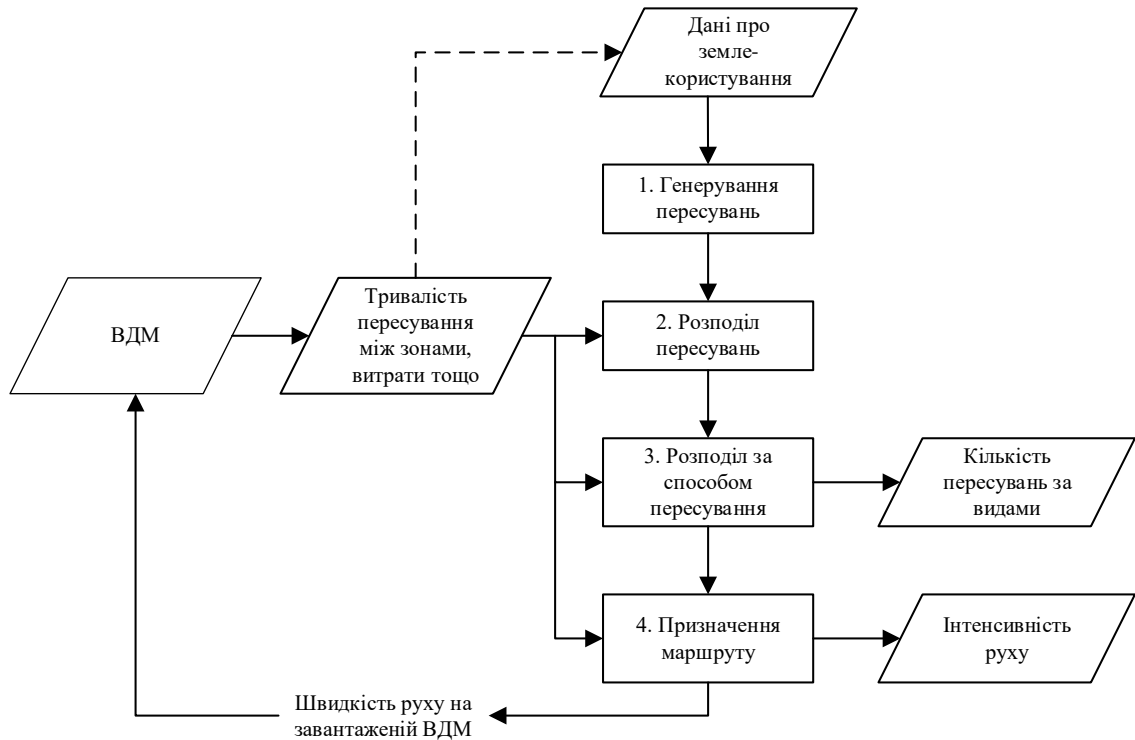


Рис. 2.1. Схема чотириступеневої моделі [58]

Автори у роботі [59] зобразили класичну чотириступеневу модель (рис. 2.2), як приклад оцінки попиту на пасажирські перевезення, проте загалом її підхід застосовується до будь-якого способу пересування.



Рис. 2.2. Схема процесу вивчення та аналізу попиту на перевезення пасажирів [59]

**Перший етап** цієї моделі (генерування) визначає частоту початку або завершення пересувань у кожній зоні за метою, що є функцією

землекористування, соціально-економічних чинників та загальних демографічних характеристик домогосподарств [56].

Цей крок широко використовується для прогнозування попиту на пересування. Саме ж продукування пересувань ґрунтується в основному на характеристиках домогосподарств, а привабливість – на рівні зайнятості в досліджуваній зоні [60].

Під час **другого кроку** (розподіл пересувань) відбувається співставлення пунктів відправлення та призначення. Для цього часто використовується гравітаційне моделювання, що враховує відносну активність у пунктах відправлення і призначення, а також вартість подорожі між ними [56]. Результатом цього етапу є створення матриці кореспонденцій – таблиці, яка відображає кількість пересувань між кожними пунктами відправлення та призначення [60].

У роботі [59] подано спосіб визначення місць концентрації поїздок за допомогою гравітаційної моделі. Суть моделі полягає в тому, що значення функції, яке демонструє величини потоків, буде зменшуватись із зростанням відстані між транспортними зонами. У той же час, самі поїздки між двома зонами ( $i$  та  $j$ ) є функцією двох змінних, враховуються кількість поїздок у зоні  $i$  й відносна привабливість зони  $j$  відносно до всіх інших зон.

Математично теорія гравітаційної моделі подається так [61]:

$$T_{(i-j)} = \frac{P_i A_j F_{(t_{i-j})} K_{(i-j)}}{\sum_{x=1}^n A_x F_{(t_{i-x})} K_{(i-x)}}, \quad (2.1)$$

де  $T_{(i-j)}$  – пересування, згенеровані у зоні  $i$  та притягнуті у зону  $j$ ,  $P_i$  – пересування, згенеровані у зоні  $i$ ,  $A_j$  – пересування, притягнуті у зону  $j$ ,  $F_{(t_{i-j})}$  – емпірично виведений коефіцієнт часу в дорозі (один на кожну 1 хв приросту часу в дорозі,  $t_{i-j}$ ), який виражає середній (по всій території) вплив просторового розділення на пересадки між зонами,  $K_{(i-j)}$  – специфічний

коефіцієнт коригування між зонами, що дозволяє врахувати вплив соціально-економічних зв'язків, які інакше не враховуються у формулі гравітаційної моделі, на схеми пересування.

Для гравітаційного моделювання одним із важливих, але не надто поширених показників, є імпеданс перегону (відрізка). Він відображає складність руху між вузлами у мережі. Імпеданс перегону може виражатися як відстань, але доцільнішими показниками автор вважає час у русі або видимі (явні) витрати [60].

**Третій етап** (вибір способу пересування) дозволяє обчислити частку пересувань між кожним пунктом призначення та відправлення, які здійснюється визначеним способом – пішки або певним видом транспорту [56].

Цей етап є одним із найважливіших у процесі моделювання. Тут функція корисності вимірює ступінь задоволення, яке отримують користувачі від власного вибору способу пересування. Тоді як функція некорисності репрезентує загальні витрати, які пов'язані з кожним таким вибором [60].

Найбільш поширеним способом отримання розподілу за способом пересування є використання логіт-моделей. Вони передбачають порівняння вищезгаданих функцій корисності та некорисності між двома пунктами пересування для різних способів, які в цей момент доступні. Функція некорисності є поєднанням тривалості подорожі, витрат та зручності за певного способу пересування між точками відправлення та призначення [60].

Найскладніший у чотириступеневій моделі є **четвертий етап** – призначення маршруту. Він полягає у розподілі пересувань між пунктами відправлення та призначення певним способом за певним маршрутом. Тобто, це поєднання всіх попередніх етапів [56].

Для визначення потреб, витрат та вигод системи необхідно знати кількість користувачів кожного маршруту та перегону. Для цього спершу між всіма пунктами відправлення та призначення розраховується найкоротший шлях (з мінімальною тривалістю руху). Тоді отримані маршрути

розподіляться між перегонами і на кожному перегоні значення сумуються. Наступним етапом є співставлення отриманих значень із ПЗ. Якщо все ж інтенсивність перевищує ПЗ, то час руху на цій ділянці збільшується, що, в свою чергу, означає, що попередньо визначений найкоротший маршрут також може змінитися. Такі ітерації проводяться до того моменту, поки рівновага між попитом та пропозицією не буде досягнута [60].

Тим часом, модель попиту на подорожі значно еволюціонувала від простих чотириступневих моделей 1960-х років. Прогрес в економетричному моделюванні спричинив до прийняття дезагрегованих моделей вибору в рамках чотириступневої моделі. Подальші вдосконалення були пов'язані з концептуальними досягненнями, такими як встановлення зв'язків між поїздками, що спричинило появу чотириступневих моделей, які базуються на пересуваннях. Зміна парадигми відбулася з розвитком підходу до моделювання попиту на пересування з урахуванням мети діяльності [62]. Цей підхід, який є прямим результатом зростання досліджень з вивчення туристичної поведінки, визнає, що туристичні потреби особи (або організації) визначаються її бажанням або необхідністю брати участь у діяльності в різних географічних точках. Таким чином, моделі, які ґрунтуються на діяльності, зміщують акцент з описового аналізу потоків на глибоке розуміння процесу прийняття рішень різними суб'єктами. Незважаючи на те, що існує велика кількість досліджень з моделювання на основі діяльності, а сучасний рівень розвитку таких моделей є досить високим, існує небагато повністю функціональних моделей попиту на подорожі на основі діяльності [55].

*2.1.2. Методики розподілу транспортних потоків.* Ву Дик Мінґ у своїй дисертаційній роботі [63] описав методики розподілу ТП і розділив їх на дві групи:

- методики, які розглядають моделювання ТП по ВДМ в цілому;
- методики, які описують поведінку ТП і використовують їх моделі розподілу лише на певних відрізках або перехрестях.



У першій групі найпоширенішою методикою є рівноважний розподіл ТП, який ґрунтується на засадах Уордропа [63].

Рівновага Уордропа широко використовується як концепція розв'язання мережевих ігор під час моделювання транспортних і телекомунікаційних мереж з перевантаженнями. Ця концепція припускає, що «гравці» обирають маршрут, який мінімізує тривалість або витрати, пов'язані з його проходженням [64, 65].

Перший принцип Уордропа записується так: «Час у дорозі на всіх маршрутах, які фактично використовуються, є рівним або меншим, ніж час, який би витратив один транспортний засіб на будь-якому невикористаному маршруті». ТП, які відповідають цьому принципу, зазвичай називають потоками «користувацької рівноваги», оскільки кожен користувач обирає маршрут, який є найкращим. Зокрема, рівновага, оптимізована для користувача, досягається тоді, коли жоден з них не може знизити свої транспортні витрати за рахунок односторонніх дій, тобто зміни тільки одного власного маршруту [5, 64, 65].

Другий принцип Уордропа стверджує, що в стані рівноваги середня тривалість подорожі є мінімальною. Це означає, що всі користувачі діють спільно під час вибору своїх маршрутів, щоб забезпечити найбільш ефективне використання всієї системи. ТП, що задовольняють другий принцип Уордропа, зазвичай вважаються оптимальними для системи [5, 64, 65]. Проте, такий стан не досягається сам по собі, а вимагає зовнішнього впливу на систему.

Узагальнено розподіл кореспонденцій шляхами прямування за принципом Уордропа можна математично зобразити так [63]:

$$G_l(\kappa^\dagger) = \min_{o \in J_h} G_o(\kappa^\dagger) = \zeta_h(\kappa^\dagger), \quad (2.2)$$

де  $G_l(\kappa^{\dagger})$  – витрати учасників дорожнього руху при прямованні по дорозі  $l$  при завантаженні ВДМ, яке визначається вектором  $\kappa^{\dagger}$ ;  $o$  – набір шляхів з усіх доступних  $J_h$  для реалізації певної кореспонденції  $h$ ;  $J_h$  – набір доступних шляхів для реалізації певної кореспонденції;  $\zeta_h(\kappa^{\dagger})$  – мінімальні витрати учасників руху по шляхах, які доступні для реалізації кореспонденції  $h$ ;  $h \in H$ ;  $H$  – набір кореспонденцій, які розглядаються, при завантаженні ВДМ.

Величини потоків  $\kappa^{\dagger}$  можна отримати із розв'язанням варіаційної нерівності, якщо фіксовані значення кореспонденцій задані для кожної пари «відправлення-призначення»:

$$G(\kappa^{\dagger}) \cdot (\kappa - \kappa^{\dagger}) \geq 0, \forall \kappa \in K, \quad (2.3)$$

де  $\kappa$  – вектор фактичних значень ТП, які визначають навантаження на ВДМ;  $K$  – вектор усіх можливих значень ТП на ВДМ,  $\kappa^{\dagger} \in K$ .

Автори у праці [66] розділяють формування ТП на два етапи. Спершу, згідно потреб у пересуванні між районами ВДМ визначаються відповідні кореспонденції. Згодом, відповідно до вже визначених кореспонденцій, ділянки мережі завантажуються та формують транспортні потоки.

Безпосередньо маршрути є наслідком кореспонденцій, проте, на думку цих авторів, станом на сьогодні все ще немає ефективних критеріїв, аби оцінити рішення, що спонукають водіїв обрати той чи інший маршрут.

Щодо вибору маршруту, то всі ТЗ можна розділити на дві групи [66]:

- які рухаються за попередньо розробленим та узгодженим маршрутом (маршрутні ТЗ);
- індивідуальні ТЗ (легкові та вантажні автомобілі, велосипеди тощо).

З однієї сторони, водій (окрім маршрутних ТЗ) обирає свій шлях, незалежно від інших. Проте, в той же час, на користувачів мережі впливають методи й способи обрання маршруту пересування кожного окремого водія [66].

2.1.3. *Інші моделі.* Розвиток моделей землекористування та попиту на ТрП (land use – transport (LU-T)) можна представити у трьох різних напрямках. Один напрямок пов'язаний з розробкою моделей попиту на ТрП від ранніх чотириступневих моделей до сучасних моделей попиту на ТрП, що ґрунтуються на видах діяльності. Другий напрямок пов'язаний з розробкою оперативних інтегрованих моделей землекористування – транспорт, в яких чотириступнева модель переважно формує транспортний компонент. І третій напрямок пов'язаний з розробкою вдосконалених моделей «наступного покоління» LU-T, які є дезаггегованими і використовують підхід на основі видів діяльності в транспортному компоненті [55]. Узагальнена інформація щодо цих моделей подана у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1

Типи транспортних моделей [55]

Напрямок моделювання	Тип моделі	Загальний опис
1	2	3
Моделі транспортного попиту	Аггеговані моделі	Моделі на основі поїздок на агрегованому рівні. Кількість поїздок, що генеруються із зони, вважається пропорційною чисельності мешканців в зоні, тоді як кількість поїздок, що притягуються до зони, вважається пропорційною кількості джерел тяжіння в зоні. Крім того, подорожі між зонами вважаються обернено пропорційними до відстані між зонами (яку також називають «імпедансом») [67, 68].
	Дезаггеговані моделі на основі пересувань	Моделі використовують дезаггеговані дані про поїздки, здійснені окремими особами між зонами досліджуваної території, і застосовують такі методології моделювання, як оптимізація з обмеженнями та випадкова максимізація корисності. Іншими словами, вони враховують вплив індивідуальних соціально-демографічних характеристик (або характеристик організації) на вибір, пов'язаний із пересуваннями [67, 69, 70].

1	2	3
	Моделі на основі турів	Моделі упорядковують пересування в одиниці, які називаються турами. Тури – це пересування, які починаються і закінчуються в тому ж місці. Наприклад, коли людина їде на роботу і повертається додому, це тур дім-робота. Тур може складатися з двох або більше поїздок [71–73].
	Моделі на основі діяльності	Моделі враховують потреби населення в подорожах, які визначаються їх потребою брати участь у діяльності, розподіленій у часі та просторі. Особливості активності та пересування особи визначаються як повний набір видів діяльності, що здійснюються нею протягом дня. Вони характеризуються місцем розташування, часом доби та способом пересування між пунктами [74–77].
Операційні інтегровані моделі LU-T	Статичні моделі	Моделі ґрунтуються, як правило, на гравітаційних формулюваннях або формулюваннях «вхід-вихід». Принцип використання моделі полягає у розподілі фіксованої кількості мешканців та робочих місць за зонами регіону, враховуючи відоме місцезнаходження частини з них та транспортні характеристики регіону [78].
	Динамічні моделі	Розвиток удосконалених методологій моделювання, таких як взаємодія на основі ентропії, теорія випадкової корисності, теорія біфуркацій і нелінійна оптимізація, а також значний прогрес в обчислювальній техніці сприяли розробленню декількох систем динамічних моделей землекористування і транспорту [55, 79]. Ці системи динамічних моделей класифікують на моделі загальної просторової рівноваги [80] і мікроімітаційні моделі на основі агентів [81].

## Продовження таблиці 2.1

1	2	3
Інтегровані моделі LU-T наступного покоління		Моделі, незалежно від того, чи є вони статичними або динамічними, складаються з транспортного компонента і компонента землекористування. Найпоширеніший зв'язок між цими двома компонентами – це зв'язок доступності. Показники доступності, отримані з особливостей землекористування, вводяться в моделі попиту на ТрП, а також вбудована система зворотного зв'язку для оновлення показників доступності, – як відповідь на результати, отримані з моделей попиту на ТрП [82].

2.1.4. *Методики транспортного моделювання.* Вибір методики моделювання зазвичай визначається концептуальною структурою моделі, наявністю даних та обчислювальними можливостями. Якщо ранні методології моделювання підтримували макроекономічні теорії, то більш сучасні методології підтримують класичні мікроекономічні та поведінкові теорії прийняття рішень [55].

Серед популярних методик транспортного моделювання є такі:

- максимізація гравітації та ентропії. Першим підходом до розгляду переміщень і потоків у просторі була макроекономічна гравітаційна модель, яка ґрунтувалася на теорії гравітації Ньютона, що з'явилася наприкінці 1800-х років. Вона обчислює кількість поїздок між пунктами відправлення та пунктами призначення, як просту функцію розмірів цих пунктів і відстані між ними з використанням масштабного коефіцієнта [55]. Це формулювання поступилося місцем більш загальному, яке визнає, що взаємозв'язки можуть змінюватися залежно від типів поїздок і соціально-економічних характеристик зон. Нове формулювання також визнає, що багато атрибутів походження та призначення, а не лише дві змінні розміру, потенційно можуть впливати на структуру потоків [83]. Наступним важливим кроком у макроекономічному

моделюванні просторових потоків стала розробка теорії максимізації ентропії, яка дала початок різновиду моделей просторової взаємодії, включаючи гравітаційну модель, модель з обмеженим виробництвом, модель з обмеженим притяганням та модель з подвійним обмеженням [84];

- оптимізація з обмеженнями. Моделі обмеженої оптимізації будують корисність особи, яка приймає рішення (індивід, домогосподарство, підприємство тощо), як функцію попиту та пропозиції, де ресурси споживаються, а корисність отримується в різній мірі залежно від вибору альтернативи. Тут особа, яка приймає рішення, обирає альтернативу, що максимізує корисність за умови обмежених ресурсів (час або гроші). Ці моделі в першу чергу використовуються як аналітичні інструменти для кращого розуміння поведінки пасажирів в умовах часових та фінансових обмежень, а також застосовуються для представлення рішень про вибір місця розташування фірми або промислового підприємства [85];

- ланцюг Маркова. Ця стохастична модель описує послідовність можливих подій, за яких ймовірність кожної наступної події залежить лише від стану, якого було досягнутого у попередній події [86]. Зокрема, ланцюгові моделі Маркова щодо вибору місця для здійснення покупок були розроблені для дослідження адаптивної або еволюційної поведінки осіб, які приймають рішення [55, 86, 87];

- мультиатрибутивна перевага. Цей підхід використовується для моделювання суб'єктивного елементу індивідуального вибору. Такі моделі, як правило, ґрунтуються на результатах опитувань, а ці у свою чергу – на індивідуальних відповідях експериментально розроблених запитань [88];

- випадкова максимізація корисності. Згідно з теорією випадкової корисності, люди пов'язують певну корисність з кожною альтернативою і обирають одну з найвищою корисністю [89];

- евристичні підходи. Це моделі на основі правил, які також відомі як моделі обчислювальних процесів. Деякі з інструментів, що застосовуються у цих моделях, включають дерева рішень, нейронні мережі, неформальний

аналіз карт і аналіз поверхні тренду. Підхід моделювання фокусується на процесі прийняття рішень і фіксує евристики та найкоротші шляхи, на противагу припущенню про переважну парадигму, таку як максимізація корисності [74];

- модель Алонсо (англ. “bid rent model” – модель орендної ставки). Зазвичай використовуються для представлення ринкових процесів у системі землекористування. Це географічна теорія, яка стосується того, як ціна та попит на землю змінюються зі збільшенням відстані до центрального ділового району. Вона ґрунтується на міркуванні, що чим більш доступною є територія, тим більш прибутковою вона буде [90].

2.2. Технічні засоби та програмне забезпечення транспортного моделювання

*2.2.1. Програмне забезпечення для транспортного моделювання.* Перші транспортні моделі отримувались за допомогою звичайних математичних розрахунків. З часом та розвитком потужності обчислювальних машин можливості та масштаби пропорційно зростали. Сьогодні найчастіше прийняття транспортних рішень відбувається із попереднім їх моделюванням за допомогою різноманітних технічних засобів.

Вибір відповідного програмного забезпечення для транспортного моделювання залежить від його безпосередніх завдань. Фахівці розрізняють такі його три рівні [91, 92]:

- мікромоделювання (рівень перехрестя, ділянки вулиці чи дороги, частини району, до 10-20 перехресть);
- мезомоделювання (певні райони міста, 30-100 перехресть);
- макромоделювання (рівень міста, регіону чи навіть цілої країни).

Їх ієрархію подано на рис. 2.3.

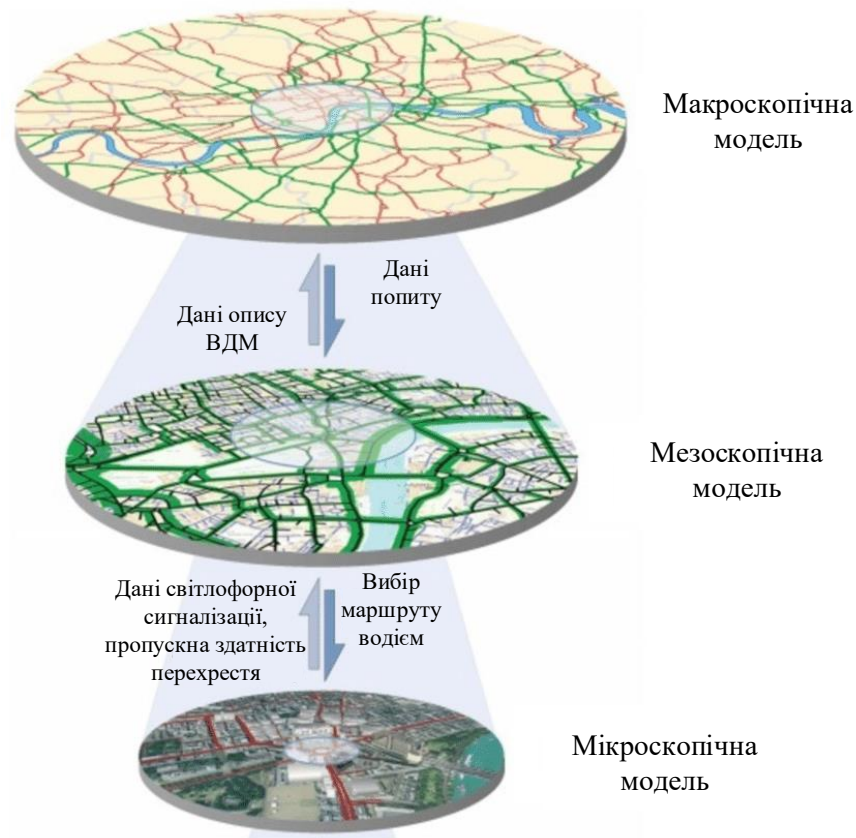


Рис. 2.3. Ієрархія транспортного моделювання [92]

Макроскопічний підхід – це високорівневе моделювання, яке зосереджене на розподілі дорожнього руху великою територією, тобто на оцінці маршрутів і потоків руху в мережі. У цьому підході моделі використовують формули із середніми значеннями параметрів, таких як потік ТЗ та ПЗ за певний період часу. Ці моделі можуть бути використані для оцінки та аналізу великих схем управління дорожнім рухом (наприклад, пішохідна частина дороги, будівництво велосипедного маршруту тощо) [92].

На мезоскопічному рівні модель має справу з більш детальною інформацією, ніж макроскопічне моделювання, і враховує окремі ТЗ [92].

Найдетальнішим рівнем моделювання є мікроскопічне моделювання, на якому моделюється окремий ТЗ. Воно дає можливість змоделювати поведінку кожного ТЗ / водія під час руху ВДМ на основі їх характеристик та поведінки [92].



У дослідженнях [93, 94] детально подано розподіл різних категорій технічних засобів транспортного моделювання. Узагальнену інформацію занесено до таблиці 2.2.

Таблиця 2.2

## Типи транспортних моделей [93–95]

<b>Категорія моделювання</b>	<b>Рівень моделювання</b>	<b>Основні характеристики моделі</b>	<b>Приклади програмного забезпечення</b>
1	2	3	4
Стратегічне моделювання	Макроскопічний, Попиту, Мультимодальні, Призначення маршрутів на магістралях	Оцінка поїздок між пунктами відправлення та призначення в певні періоди часу. Оцінка вибору способу пересування та вибору маршруту. Оцінка статистики пересувань відрізками, маршрутами, територією та мережею.	- PTV Visum - TransCAD - OmniTRANS - Aimsun - Cube - Voyager - EMME - QRS II - STRADA - TRACKS
Симуляції	Мезоскопічний	Імітація окремих ТЗ шляхом поширення потоку в дискретних часових інтервалах вздовж послідовності ланок на основі спрощеного набору поведінкових та експлуатаційних параметрів. Статичний та динамічний розподіл дорожнього руху.	- PTV Visum/Vissim - OmniTRANS - Aimsun - Cube Avenue - Dynameq - SATURN - MATSim
	Мікроскопічний	Детальне моделювання окремих ТЗ та їх взаємодії між собою на основі складної системи поведінкових та експлуатаційних параметрів. Статичний та динамічний розподіл дорожнього руху.	- PTV Vissim - SUMO - CORSIM - Cube - SYNCHRO - Aimsun - Commuter - Dynasim - Paramics

## Продовження таблиці 2.2

1	2	3	- 4
Моделювання перехресть	Моделювання перехресть та коридорів	Розрахунок продуктивності та функціонування перехресть на основі складних алгоритмів та теорії дорожнього руху. Статичний розподіл дорожнього руху.	- PTV Vistro - TRANSYT - TRANSYT-7F - LinSig - SCATES - SIDRA

Оскільки війна є подією великого масштабу, то для моделювання транспорту доцільно застосовувати саме макроскопічний рівень. Найпопулярнішими з них є PTV Visum та TransCAD.

PTV Visum – це комплексний програмний пакет для аналізу, прогнозування та управління даними на основі геоінформаційних систем (ГІС) на міському, регіональному та національному рівнях. Він об'єднує всі види транспорту та їх взаємодію в єдину модель. Складні інструменти для управління, імпорту/експорту та редагування елементів мережі, попиту на ТрП та пов'язаних з ними наборів даних дозволяють ефективно будувати великі транспортні моделі. Включені методи охоплюють моделювання та прогнозування попиту, різні методи розподілу, адаптовані до різних типів руху (різні процедури розподілу автомагістралей, динамічний розподіл руху, мезоскопічний розподіл, розподіл громадського транспорту на основі розкладу руху, стохастичний розподіл для повільних видів транспорту тощо), а також різноманітні інструменти опрацювання та аналізу даних. Всі методи можуть бути вбудовані в комплексне середовище управління сценаріями, що дозволяє розробляти і порівнювати різні варіанти транспортної інфраструктури і політики [96, 97].

Сфера застосування PTV VISUM охоплює багато різних областей моделювання, таких як моделювання попиту, розроблення та калібрування моделі, управління даними, аналіз доступності, планування інфраструктури та визначення її розмірів, інженерні дослідження дорожнього руху, планування

громадського транспорту, аналіз даних громадського транспорту, планування та стратегування роботи громадського транспорту з аналізом вартості проїзду для громадського транспорту або платних доріг [97].

TransCAD – це ГІС, розроблена спеціально для використання фахівцями транспортної галузі з метою зберігання, відображення, управління та аналізу транспортних даних. Він поєднує в собі можливості ГІС і транспортного моделювання в єдиній інтегрованій платформі. TransCAD можна використовувати для всіх видів транспорту, в будь-якому масштабі і з будь-яким рівнем деталізації. На додаток до стандартних шарів точок, ліній, площ і зображень на ГІС-карті, TransCAD підтримує шари маршрутної системи і має інструменти для створення, редагування і відображення маршрутів. Програмне середовище використовує мережеву структуру даних для підтримки моделей маршрутизації та оптимізації мережі. Він включає моделі генерування поїздок, розподілу, вибору способу пересування і розподілу дорожнього руху, які, у свою чергу, підтримують планування перевезень і прогнозування попиту на перевезення. TransCAD має набір інструментів динамічної сегментації та лінійної прив'язки для управління автомобільними, залізничними, трубопровідними та іншими мережами. Це програмне забезпечення повністю інтегрує ГІС з функціями моделювання попиту та логістики. Наприклад, відстань у мережі та час у дорозі ґрунтуються на фактичній формі мережі доріг і правильному представленні розв'язок на магістралях [98, 99].

Макромодельовання є важливим для планування ТС на великих територіях, проте інколи проекти вимагають як опрацювання масивів даних на значній площі, так і деталізації на деяких її ділянках. Це зумовлює необхідність поєднання мезо- та мікропідходів у нових гібридних симуляторах дорожнього руху, де великомасштабні мережі моделюються мезоскопічно, а області складних взаємодій отримують вигоду від тонкої деталізації мікроскопічного моделювання. У роботі [100] представлено нову системну архітектуру, реалізовану в програмному середовищі Aimsun (рис. 2.4).

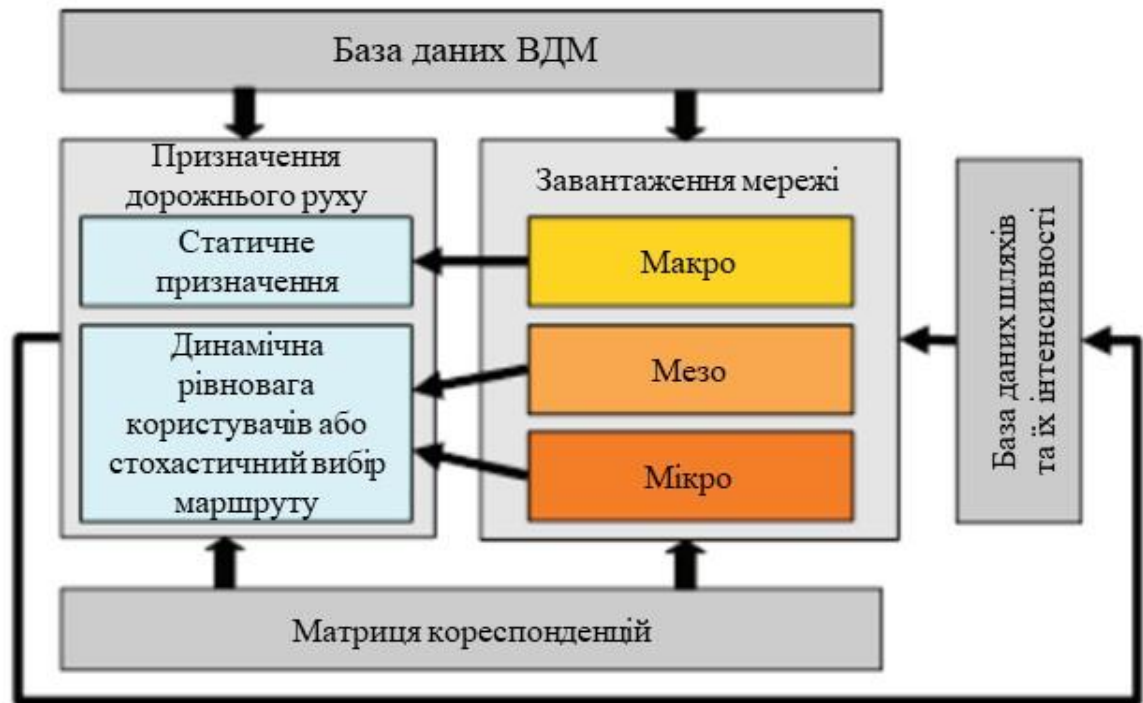


Рис. 2.4. Внутрішня архітектура Aimsun

Це гібридна модель з особливим акцентом на узгодженість переходу від мезоскопічної моделі до мікроскопічної, і навпаки, яка ще й доповнюється за допомогою результатів обчислень у великій за розміром мережі.

2.2.2. *Збір початкових даних для транспортного моделювання.* Традиційною системою отримання початкових даних про пересування мешканців є опитування мобільності, які проводяться у домогосподарствах міст, що кілька років (найчастіше – раз на п'ять років). Їх недоліком є трудомісткість, затратність, а також те, що результати цих опитувань часто є вже застарілими на момент опрацювання даних. Такі дані є корисними для моделей довгострокового планування, але не є ідеальними для щоденного аналізу трафіку та розробки операційних стратегій [101–103].

Серед інших способів отримання початкових даних для створення та калібрування моделей є підрахунок інтенсивності та складу ТП у польових умовах вручну або за допомогою різноманітних детекторів. Проте робота [104] ставить під сумнів якість матриць кореспонденцій із використанням цього методу, а у дослідженні [105] зазначено, що близько третини таких детекторів продукували зміщені дані. До того ж, їх встановлення та обслуговування є

досить дорогим, що не дозволяє отримати вибірку для всього регіону дослідження [106].

Як додаткові системи та методи отримання даних, окрім підрахунку ТЗ, інколи використовуються такі [106]:

- сканери Bluetooth, встановлені на узбіччях. Їх недоліком, як і у випадку з детекторами є обмежене просторове охоплення. Також деякі ідентифікатори Bluetooth у ТЗ можуть бути клонованими, що спричиняє помилки у підрахунках [107];

- автомобілі, що вільно пересуваються (free-floating cars) в мережі, зазвичай, таксі. На жаль, вони іноді можуть не відображати реальні умови руху через обмежене поширення в мережі [108];

- системи розпізнавання та відслідковування появи в мережі реєстраційного номера ТЗ. Перевагою цього методу є можливість отримання інформації про клас ТЗ, рух по смугах та відсоткову частку поворотних ТЗ. Оскільки, першочергове призначення цих систем є спостереження та виявлення правопорушень на складних ділянках, то їх просторове покриття теж обмежене [109, 110];

- записи даних від мобільних операторів із можливістю оцінки пересувань між вишками зв'язку. Перевагою є пасивний характер збору даних, але негативна особливість – самі мобільні телефони мають бути постійно в робочому стані, що не завжди можливо. Додатковою проблемою є неможливість визначення точного місцезнаходження користувача. До того ж, потік дзвінків контролюється операторами і, залежно від рівня активності, може відбуватися перерозподіл підключень на інші вишки, що формує викривлені дані [111, 112];

- подібно до даних мобільних операторів, також використовуються дані соціальних мереж, а точніше геомітки, залишені користувачами під час публікування дописів. Серед переваг методу є широке охоплення та універсальна доступність, проте через низьку надійність визначення місць проживання та роботи ці дані досить складно застосовувати саме для оцінки

матриць кореспонденцій. До того ж, частіше мітки залишаються користувачами, що перебувають в місті із туристичною метою, а їх транспортна поведінка є відмінною від місцевих мешканців [113, 114];

- всеохопні (всепроникні) дані з повсюдних навігаційних платформ. Їх отримання є схожим на дані із ТЗ, що вільно пересуваються, проте рівень проникнення є значно вищим. Точна часова роздільна здатність та всебічне просторове покриття є безсумнівною перевагою цього методу. Він дозволяє отримати інформацію (швидкість та/або час в дорозі) про кожну ділянку мережі, якою пересуваються ТЗ [106, 115]. Саме цей метод отримання початкових даних для транспортного моделювання використано у дисертаційному дослідженні.

### 2.3. Оперативне планування транспортних систем із використанням всеохопних даних про дорожній рух

Всеохопні дані про дорожній рух є надзвичайно корисними за необхідності отримання його показників терміново (наприклад, у зв'язку із надзвичайними подіями), а також у регіонах із складним доступом до збору даних. Цей підхід надає пріоритет швидкості над деталізацією, що відповідає функціональним вимогам у регіонах з недостатньою кількістю даних, які потребують швидкого отримання інформації на високому рівні для попереднього планування [116].

Якісне транспортне планування потребує надійної та всебічної інформації про генеруючі чинники, пункти відправлення та призначення пересувань, співвідношення між видами транспорту та маршрути, якими будуть здійснюватися поїздки [117]. Для підтвердження цього, науковці у роботі [116] зазначають, що ефективне транспортне планування потребує високоякісних значних за обсягом вибірок і пов'язаних з ними моделей, які дають змогу прогнозувати майбутні умови. Технологія смартфонів революціонізувала можливість відстежувати моделі мобільності та

використання транспортної інфраструктури, що спричинило появу «даних про дорожній рух, отриманих з натовпу» («crowd sourced traffic data»).

Найбільш поширеними та всеохопними є краудсорсингові дані, отримані за допомогою мереж Google та TomTom. Вони забезпечують економічно ефективні способи отримання великих обсягів даних (в деяких випадках в режимі реального часу) для цілей транспортного аналізу та управління [116].

Ці дані формують надзвичайно великі бази інформації і їх ручна обробка є майже неможливою. Тому фахівці Університету Нового Південного Уельсу розробили та представили у 2021 році новий інструмент для оцінки матриць кореспонденцій із використанням всеохопних даних про дорожній рух [106]. Ними розроблено новітнє програмне забезпечення Rapidex для автоматизованого транспортного моделювання будь-якого міста світу в будь-який час.

*2.3.1. Принцип роботи інструменту оперативного транспортного планування Rapidex.* Першим етапом моделювання у Rapidex є визначення й **отримання вулично-дорожньої мережі та її зонування**. Для цього в програмному рядку спершу вказуються координати рамки, що охоплює місто, або ж сама назва необхідного міста. За замовчуванням в мережу включаються автомагістралі, міські магістралі, первинні та вторинні вулиці й дороги. Третинні та житлові вулиці під час моделювання не враховуються. Далі можна задати максимальний та мінімальний розмір комірки (зони). Після цього програма завантажує ВДМ із картографічного сервісу OpenStreetMaps і розподіляє всю мережу на сітку із заданим максимальний розміром зон. Якщо ж отримана щільність вузлів у певній комірці є високою, то відбувається подальший поділ на зони меншого розміру. Варто зазначити, що всі комірки є квадратної форми.

У кожній зоні інструмент визначає певні вузли, що будуть її центроїдами, які забезпечуватимуть в'їзд та виїзд ТЗ з мережі. За

замовчуванням, таких центроїдів є мінімум 3 і максимум 4. Далі встановлюються значення ПЗ для різних типів доріг та вулиць.

Усі згадані параметри є встановлені за замовчуванням, проте користувач може їх змінювати або й навіть імпортувати попередньо визначену структуру зонування (наприклад, за допомогою перепису населення). По завершенню цього етапу, атрибути кожної ділянки та зони можна візуалізувати.

Наступним важливим кроком є **отримання тривалості пересування** по всіх відрізках раніше визначеної мережі. Такі агрегатори всеохопних даних як TomTom чи Google, надають як тривалість пересування в реальному часі, так і типову тривалість пересування за допомогою їх API (application programming interface – інтерфейс прикладного програмування). Ключ API – це код, який є унікальним і використовується, щоб ідентифікувати й автентифікувати певного користувача чи програму [118]. Інколи тривалість пересування в режимі реального часу може не відображати повсякденні умови руху, а типова тривалість пересування розраховується як середнє кількох спостережень (той самий день тижня та час відправлення). Rapidex дозволяє збирати обидва ці показники, але основний підхід інструменту полягає в тому, щоб виокремити типову тривалість пересування відрізком та обчислити тривалість пересування за кореспонденціями (парами зон відправлення та призначення), використовуючи алгоритм найкоротшого шляху. Цей показник пізніше буде використаний для розрахунку функції похибки.

Основним етапом такого моделювання є **оцінка кореспонденцій**. Для цього використовується дворівневий підхід до оптимізації, який, зазвичай слугує для оцінки перевантажених мереж. Він складається із верхнього та нижнього рівнів, які вирішуються за допомогою ітерацій доки обидва рівні не будуть збігатися. Проблемою верхнього рівня є оцінка матриці кореспонденцій із використанням інформації про відрізки, які досліджуються, та має на меті зменшити похибки між спостережуваними та прогнозованими значеннями. Проблемою нижнього рівня є визначення рівноваги між користувачами на рівні мережі, що описує їх взаємодію з різноманітними



ситуаціями у дорожньому русі. У кожній ітерації нижній рівень повертає на верхній рівень особливості дорожнього руху, включаючи інтенсивність та тривалість пересування, тоді як верхній рівень надає оцінений попит на кореспонденції як початкові дані для програми нижнього рівня. За такого підходу попит на пересування та призначення маршрутів є взаємозалежними, тож краще відтворюють умови перевантаженого руху. Маючи визначену функцію похибки  $E$ , автори пропонують дворівневу модель процесу оцінювання кореспонденцій таким чином:

- верхній рівень:

$$\min E, \quad (2.4)$$

де  $E$  – функція похибки;

- нижній рівень:

$$z(x(f)) = \min \sum_{a \in A} \int_0^{x_a} t_a(v) dv, \quad (2.5)$$

де  $a$  – певний відрізок ВДМ;  $A$  – набір відрізків ВДМ;  $x_a$  – інтенсивність на відріжку  $a$ . авто/с;  $t_a$  – тривалість пересування відрізком  $a$ , с;

• за умови дотримання обмежень на збереження потоку та невід’ємність, як описано нижче:

$$\begin{aligned} x_a &= \sum_{r \in N} \sum_{s \in N} \sum_{k \in \pi_{rs}} f_k^{rs} \delta_{a,k}^{rs} \quad \forall a \in A \\ \sum_{k \in \pi_{rs}} f_k^{rs} &= d_{rs} \quad \forall r, s \in N \\ f_k^{rs} &\geq 0 \quad \forall r, s \in N, \quad \forall k \in \pi_{rs}, \end{aligned} \quad (2.6)$$

де  $r, s$  – зональні центроїди;  $k$  – середня найкоротша відстань між парами зон  $r$  та  $s$ , коли ВДМ незавантажена;  $\pi_{rs}$  – множина ациклічних шляхів, що

з'єднують зону  $r$  із зоною  $s$ ;  $f_k^{rs}$  – інтенсивність руху на шляху  $k$ ;  $d_{rs}$  – попит між зонами  $r$  та  $s$ .

Функції продуктивності відрізка вимірюють рівень обслуговування (LOS – level of service), пов'язаний з відрізками, що представляють міську мережу. Вони можуть включати тривалість пересування, безпеку, вартість проїзду, стабільність потоків тощо. Однак, тривалість пересування зазвичай використовується як єдиний показник LOS, оскільки інші показники тісно корелюють із нею.

Для розрахунку тривалості пересування на основі оціненої інтенсивності, Rapidex використовує функцію Бюро громадських доріг (BPR, англ. The Bureau of Public Roads):

$$T = T_0 \cdot \left( 1 + \alpha \cdot \left( \frac{v}{c} \right)^\beta \right), \quad (2.7)$$

де  $T$  – тривалість пересування, с;  $T_0$  – тривалість пересування при вільному русі, с;  $\alpha$ ,  $\beta$  – параметри BPR (часто встановлюються на рівні 0,15 і 4 відповідно);  $v$  – інтенсивність руху (авто/год);  $c$  – практична пропускна здатність (авто/год).

Для реальних і великомасштабних мереж пошук глобального оптимуму за допомогою дворівневого підходу є складним, оскільки вони, як правило, не є оптимальними. Щоб подолати це обмеження інколи використовувалися генетичні алгоритми (ГА). ГА – це стохастичні техніки, методи пошуку яких моделюють природну еволюцію [119]. Блок-схема етапів роботи алгоритму зображена на рис. 2.5.

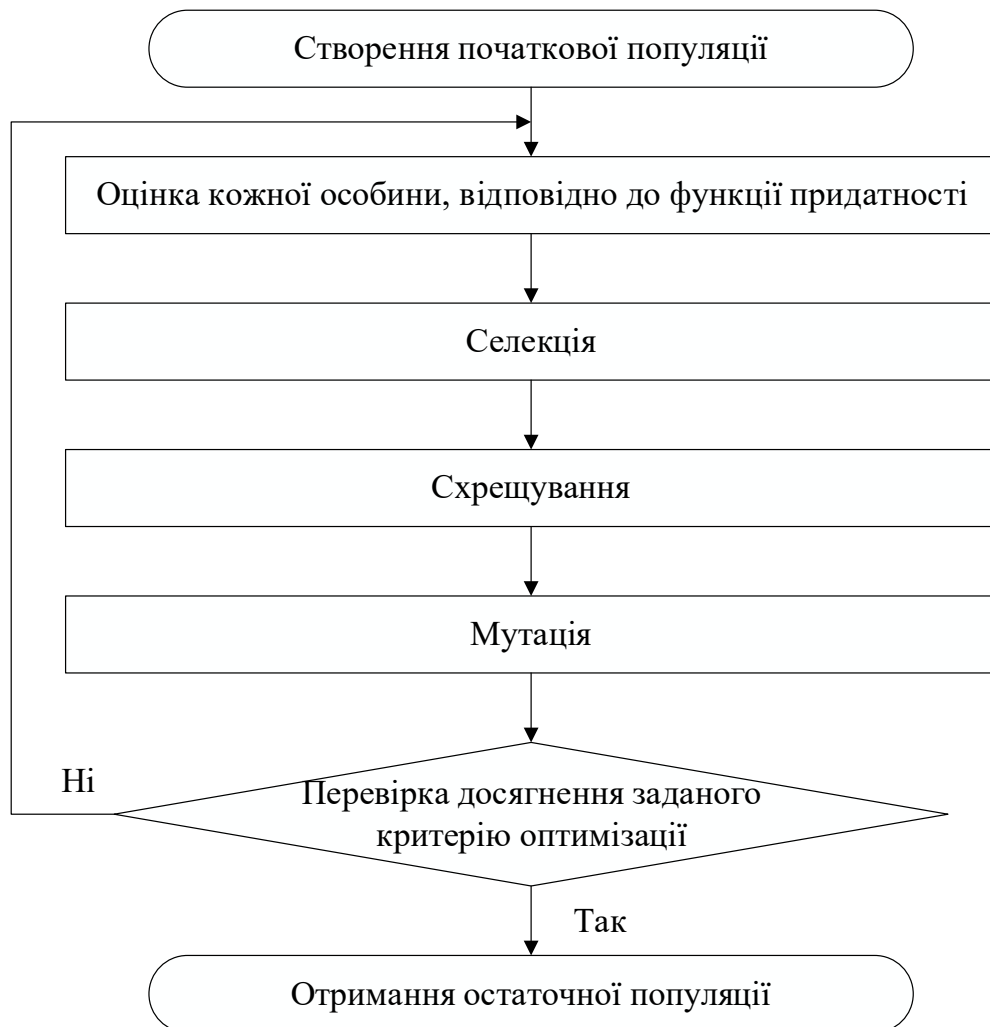


Рис. 2.5. Блок-схема генетичного алгоритму [120]

У ГА функція придатності (фітнес-функція) є певною умовою, яка дозволяє розрізнити вдалі та невдалі рішення. Селекція дозволяє обрати найкращі індивідуальні хромосоми для подальшого схрещування, яке полягає у поєднанні інформації цих двох обраних батьківських хромосом. Пізніше отримані нащадки піддаються мутації, що, як правило, означає створення нової хромосоми. Після цих кроків нащадки потрапляють у загальну популяцію, створюючи нове покоління. Так триває доти, доки остаточно популяція на задовольнятиме критерій оптимізації [119–121]. У Rapidex використано саме цей підхід, проте його адаптовано для оцінки попиту на кореспонденції.

Оскільки для одного і того ж набору значень тривалості пересування може існувати кілька розв'язків матриці кореспонденцій, то надання точних

початкових рішень (матриць) є критично важливим для досягнення достовірного кінцевого рішення. Автори [106] надають різні ймовірні початкові розв'язки (таблиця 2.3), але всі з них мають форму гравітаційної моделі і підпадають під дію таких умов:

$$D = \sum_{rs} d_{rs}, \quad (2.8)$$

де  $D$  – загальний попит в мережі,  $d_{rs}$  – попит між конкретною кореспонденцією між зонами  $r$  та  $s$ .

Таблиця 2.3

## Початкові рішення матриць кореспонденцій, запропоновані Rapidex

Абревіатура	Назва методу	Керуюче рівняння	Номер формули
TFM (Travel time free-flow travel time model)	Модель «час пересування – час пересування вільного потоку»	$d_{rs} = \frac{\frac{TT_{rs}^{obs}}{TT_{rs}^f}}{\sum_{rs} \frac{TT_{rs}^{obs}}{TT_{rs}^f}} \cdot D$	(2.9)
FDM (Free-flow travel time distance model)	Модель «час пересування вільного потоку – відстань»	$d_{rs} = \frac{\frac{TT_{rs}^f}{k_{rs}^2}}{\sum_{rs} \frac{TT_{rs}^f}{k_{rs}^2}} \cdot D$	(2.10)
TDM (Travel time distance model)	Модель «час пересування – відстань»	$d_{rs} = \frac{\frac{TT_{rs}^{obs}}{k_{rs}^2}}{\sum_{rs} \frac{TT_{rs}^{obs}}{k_{rs}^2}} \cdot D$	(2.11)
CGM (Custom gravity model)	Користувацька гравітаційна модель	$d_{rs} = \frac{\frac{G_r A_s}{k_{rs}^2}}{\sum_{rs} \frac{G_r A_s}{k_{rs}^2}} \cdot D$	(2.12)

де  $TT_{rs}^{obs}$  – спостережувана (з будь-якої платформи всеохопних даних) тривалість пересування між парою зон «відправлення ( $r$ ) – призначення ( $s$ )»;  $TT_{rs}^f$  – спостережувана тривалість пересування вільного потоку між парою зон «відправлення ( $r$ ) – призначення ( $s$ )»;  $k_{rs}^2$  – середня найкоротша відстань між парою зон «відправлення ( $r$ ) – призначення ( $s$ )», коли ВДМ незавантажена;  $G_r$  – визначене користувачем значення пропорції зони  $r$ , де  $\sum G_r = 1$ ;  $A_s$  – визначене користувачем значення пропорції зони  $s$ , де  $\sum A_s = 1$ .

Користувач моделі може вирішити використання одного або комбінації цих початкових рішень для першого генерування. Кожне початкове рішення вимагає певної величини загального попиту. Користувач має два варіанти генерування загального попиту на рішення. По-перше, він може вибрати загальний попит початкового рішення як випадкову величину з діапазону попиту, який він вказав для мережі. Крім того, діапазон попиту можна розділити порівну для кожного типу початкового рішення, що використовується. Ці точки поділу є сумарним попитом, який призначається початковим рішенням.

Після того, як кожна з матриць кореспонденцій в межах генерування розв'язана до збіжності, тобто до заданого відносного розриву, кожне рішення має бути оцінене за допомогою функції похибки. Функція похибки є найбільш важливим аспектом ГА, оскільки вона диференціює різні рішення і визначає їх прийнятність. Rapidex пропонує кілька функцій помилок, з яких користувач може вибрати одну або комбінацію функцій помилок (таблиця 2.4). Можна також застосовувати метод зважування, якщо користувач надає перевагу (або більше довіряє) одному набору даних над іншим. Тобто певному методу призначити відповідну «вагу», що визначає його важливість під час оцінки.

Таблиця 2.4

**Початкові рішення матриць кореспонденцій, запропоновані Rapidex**

Абревіатура	Назва методу	Керуюче рівняння	Номер формули
1	2	3	4
MAPE-ODTT (Mean absolute percentage error of OD travel times)	Середня абсолютна відсоткова похибка тривалості пересування кореспонденціями	$E = \sum_{rs} d_{rs} \cdot \frac{ TT_{rs}^{est} - TT_{rs}^{obs} }{TT_{rs}^{obs}}$	(2.13)
RMSE-ODTT (Root mean square error of OD travel times)	Середньоквадратична похибка тривалості пересування кореспонденціями	$E = \sqrt{\frac{\sum_{rs} (TT_{rs}^{est} - TT_{rs}^{obs})^2}{N_{OD}}}$	(2.14)

Продовження таблиці 2.4

1	2	3	4
MAPE-LF (Mean absolute percentage error of link flows)	Середня абсолютна відсоткова похибка інтенсивності руху відрізками	$E = \sum_{ij} \frac{ f_{ij}^{est} - f_{ij}^{obs} }{f_{ij}^{obs}}$	(2.15)
RMSE-LF (Root mean square error of link flows)	Середньоквадратична похибка інтенсивності руху відрізками	$E = \sqrt{\frac{\sum_{ij} (f_{ij}^{est} - f_{ij}^{obs})^2}{N_f}}$	(2.16)
RMSE-LTT (Root mean square error of link travel times)	Середньоквадратична похибка тривалості пересування відрізками	$E = \sqrt{\frac{\sum_{ij} (t_{ij}^{est} - t_{ij}^{obs})^2}{N_t}}$	(2.17)
MAPE-LTT (Mean absolute percentage error of link travel time)	Середня абсолютна відсоткова похибка тривалості пересування відрізками	$E = \sum_{ij} \frac{ t_{ij}^{est} - t_{ij}^{obs} }{t_{ij}^{obs}}$	(2.18)
MAPE-C (Mean absolute percentage error of corridor travel times)	Середня абсолютна відсоткова похибка тривалості пересування коридором (маршрутом)	$E = \sum_i \frac{ R_i^{est} - R_i^{obs} }{R_i^{obs}}$	(2.19)

де  $E$  – значення похибки;  $TT_{rs}^{est}$  – розрахована (із розв’язку) тривалість пересування між парою зон «відправлення ( $r$ ) – призначення ( $s$ );  $TT_{rs}^{obs}$  – спостережувана (із будь-якої платформи всеохопних даних) тривалість пересування між парою зон «відправлення ( $r$ ) – призначення ( $s$ );  $N_{OD}$  – кількість кореспонденцій;  $f_{ij}^{est}$  – розрахована (із розв’язку) інтенсивність руху між відрізками ВДМ  $i$  та  $j$ ;  $f_{ij}^{obs}$  – спостережувана (із транспортного детектора чи іншого джерела) інтенсивність руху між відрізками ВДМ  $i$  та  $j$ ;  $N_f$  – кількість відрізків ВДМ, для яких відомі значення інтенсивності руху;  $t_{ij}^{est}$  – розрахована (із розв’язку) тривалість пересування між відрізками ВДМ  $i$  та  $j$ ;  $t_{ij}^{obs}$  – спостережувана (із будь-якої платформи всеохопних даних) тривалість пересування між відрізками ВДМ  $i$  та  $j$ ;  $N_t$  – кількість відрізків ВДМ, для яких відомі значення тривалості пересування;  $R_i^{est}$  – розрахована (із розв’язку) тривалість пересування маршрутом користувача (коридором  $i$ );  $R_i^{obs}$  – спостережувана (із будь-якої платформи всеохопних даних) тривалість пересування маршрутом користувача (коридором  $i$ );  $N_R$  – кількість коридорів, визначених користувачем.

Щоб перейти до наступної ітерації (генерування) ГА, необхідно створити нові матриці кореспонденцій на основі попереднього генерування. Спочатку вибираються рішення з попереднього покоління, а потім об'єднуються. Ці обрані рішення називаються батьківськими. Rapidex пропонує різні методи для вибору батьківських рішень.

Найпростіший метод – випадковий вибір двох різних розв'язків з попереднього покоління. Другий метод – турнірний відбір. Він є дещо покращеним порівняно, з випадковим відбором, зберігаючи при цьому простоту. Під час турнірного відбору рішення випадковим чином обираються до потрібної кількості (у нашому випадку два) і обирається рішення з найкращою пристосованістю (або найменшою похибкою). Це повторюється ще раз, в результаті чого з'являються два батьківські рішення, які гарантовано не є найгіршими з попереднього покоління. Для того, щоб гарантувати, що наступне покоління не погіршиться, застосовується елітарний відбір, за допомогою якого наступне покоління отримує найкращих представників попереднього покоління. Кількість еліт, які переходять у наступне покоління, визначається користувачем.

Після того, як батьківські рішення визначені, вони об'єднуються за допомогою методу схрещування (кросовера) для отримання нової дочірньої хромосоми. Rapidex пропонує кілька методів для «створення» нащадків, тобто нового батьківського рішення. У методі рівномірного схрещування вибирається попит кореспонденції будь-якого з батьків для будь-якої пари. У методі одноточкового схрещування значення попиту кореспонденцій для пар від одного з батьків копіюються до тих пір, поки певна пара, а потім і решта, не будуть скопійовані від іншого батька. В арифметичному методі для кожної кореспонденції попит визначається як середньозважене арифметичне двох батьківських попитів.

Хоча ці загальні процеси дадуть результати, індивідуальний підхід до схрещування зробить їх кращими, оскільки характеристики саме певної проблеми можуть бути використані для більш ефективного схрещування

батьківських рішень. Виконання методу схрещування залежить від ймовірності схрещування, визначеної користувачем. У випадках, коли метод схрещування пропускається, один з батьків стає нащадком.

Останнім етапом створення хромосоми є мутація, за допомогою якої можна змінювати попит кореспонденцій. Мутація має вирішальне значення для того, щоб ГА не концентрувався лише на локальному просторі пошуку, а міг досліджувати весь простір пошуку. Однак, занадто велика кількість мутацій призведе до нестабільності ГА і зупинить його збіжність. Таким чином, як і у випадку зі схрещуванням, існує задана користувачем ймовірність мутації, яка обмежує їх на рівні поколінь. Поряд з цим, існує також визначена користувачем мутаційна мінливість, яка вказує, скільки ознак нащадка буде мутовано. Rapidex тут також надає кілька методів мутації, з яких користувач може обирати.

Метод заміни випадковим чином обирає дві кореспонденції й змінює їхні вимоги місцями (бітовий метод). Цей метод випадковим чином обирає кореспонденцію та перевертає біт двійкового числа, що представляє значення попиту. Тоді випадковий метод випадковим чином обирає кореспонденцію і присвоює їй значення в заданому діапазоні. Після мутації хромосома готова до вирішення проблеми збіжності та обчислення її похибки. Цей ітеративний процес триває доти, доки генетичний алгоритм не виконає достатню кількість ітерацій. Процес може бути достроково зупинений, якщо похибка досягає адекватного значення.

Модуль оцінки кореспонденцій завершується після досягнення попередньо визначеного значення похибки або максимальної кількості поколінь, залежно від того, що буде досягнуто раніше. Наприкінці цього модуля Rapidex надає всі основні результати на додаток до оціненої матриці кореспонденцій у вигляді електронних таблиць, а саме: інтенсивність дорожнього руху за відрізками, тривалість пересування відрізками та оцінену тривалість пересування за кореспонденціями. Rapidex також дозволяє просторову візуалізацію всіх цих показників на фоновій карті. Крім того, він



генерує середні показники по всій мережі, такі як довжина пересування, час у дорозі, рівень заторів (відношення часу в дорозі до часу вільного руху), пробіг ТЗ тощо, які можна використовувати для швидкої перевірки.

Розв'язання задачі рівноваги користувачів є найбільш трудомістким аспектом через необхідність пошуку найкоротшого шляху десятки, сотні чи навіть тисячі разів (залежно від відносного розриву) на кожному хромосому. Тому для використання паралельних обчислень було впроваджено алгоритм Дейкстри, щоб значно пришвидшити процес.

Окрім отримання фактичних даних про мережу, інструмент також дозволяє створювати та тестувати сценарії. Користувач може змінити попит або початкові параметри мережі та оцінити вплив порівняно з базовим сценарієм [106].

2.3.2. *Приклади застосування інструменту оперативного транспортного планування Rapidex.* Вперше Rapidex було використано для перевірки та валідації його роботи на прикладі міста Сідней (Австралія). На рис. 2.6 зображено отриману ВДМ міста.

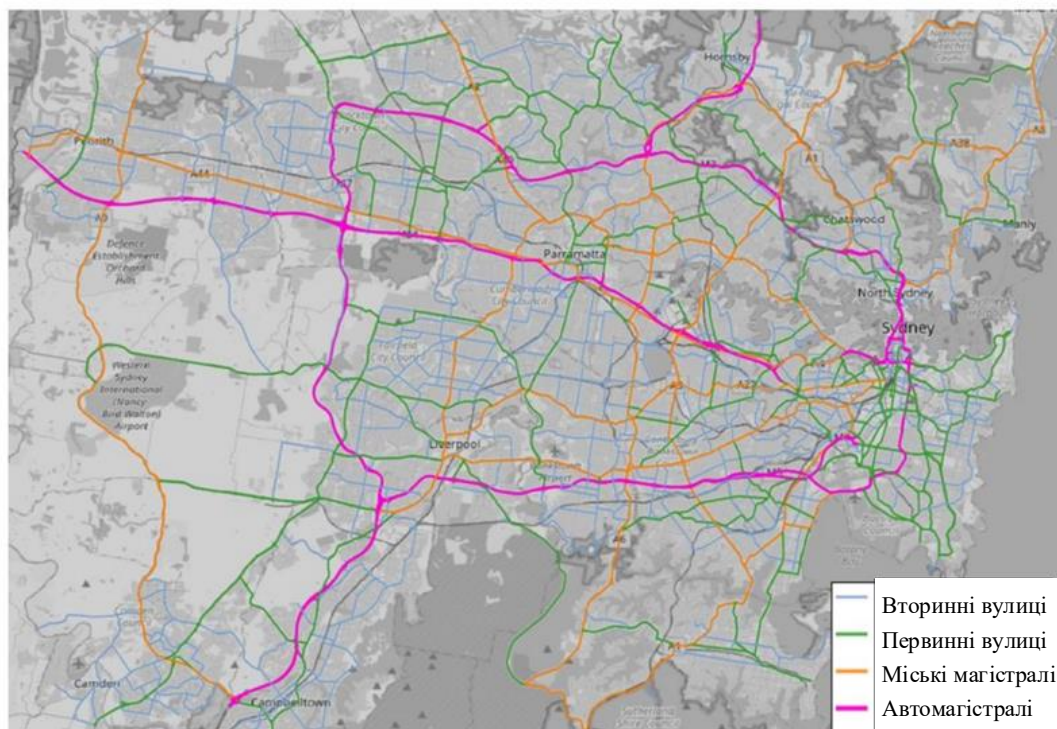
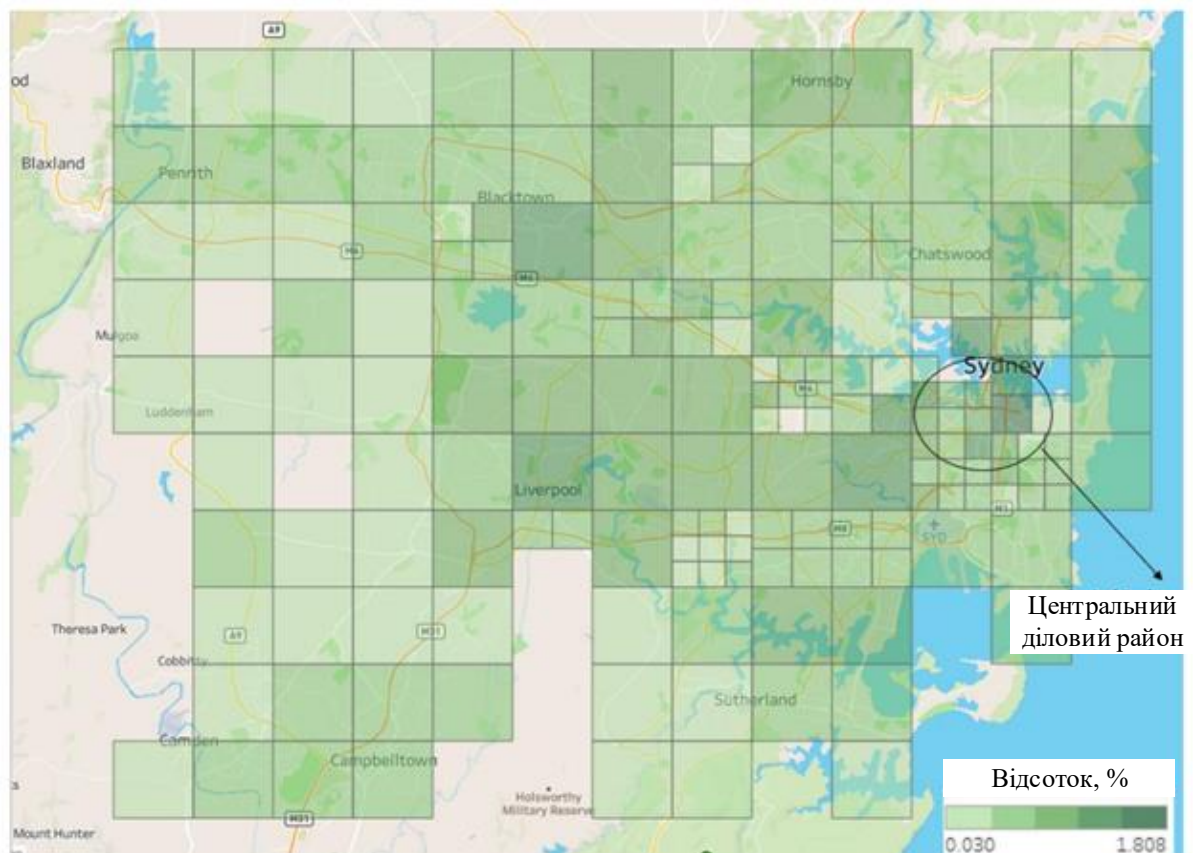


Рис. 2.6. Вулично-дорожня мережа міста Сідней (Австралія), згенерована у Rapidex, використовуючи картографічний сервіс OpenStreetMaps [106]

Тривалість пересування відрізками було отримано із агрегатора Google Maps для ранкового пікового періоду (8:00) 31 березня 2021 року. Середня довжина поїздки всією мережею становила 11,9 км, середня тривалість пересування – 20,73 хв, середній індекс завантаження – 1,66, а середній пробіг ТЗ – 7875392 авто-км. Загальний попит у всій мережі був визначений на рівні 657000 ТЗ для цього періоду.

На рис. 2.7 – рис. 2.10 показано зональну структуру та результати опрацювання вибірки, отримані за допомогою Rapidex. Помітно, що райони, розташовані ближче до центрального ділового району (CBD – central business district) і ті, що мають вищу щільність вузлів, автоматично поділяються на менші зони.



*Рис. 2.7. Зональне тяжіння пересувань (у відсотках від загального попиту) [106]*

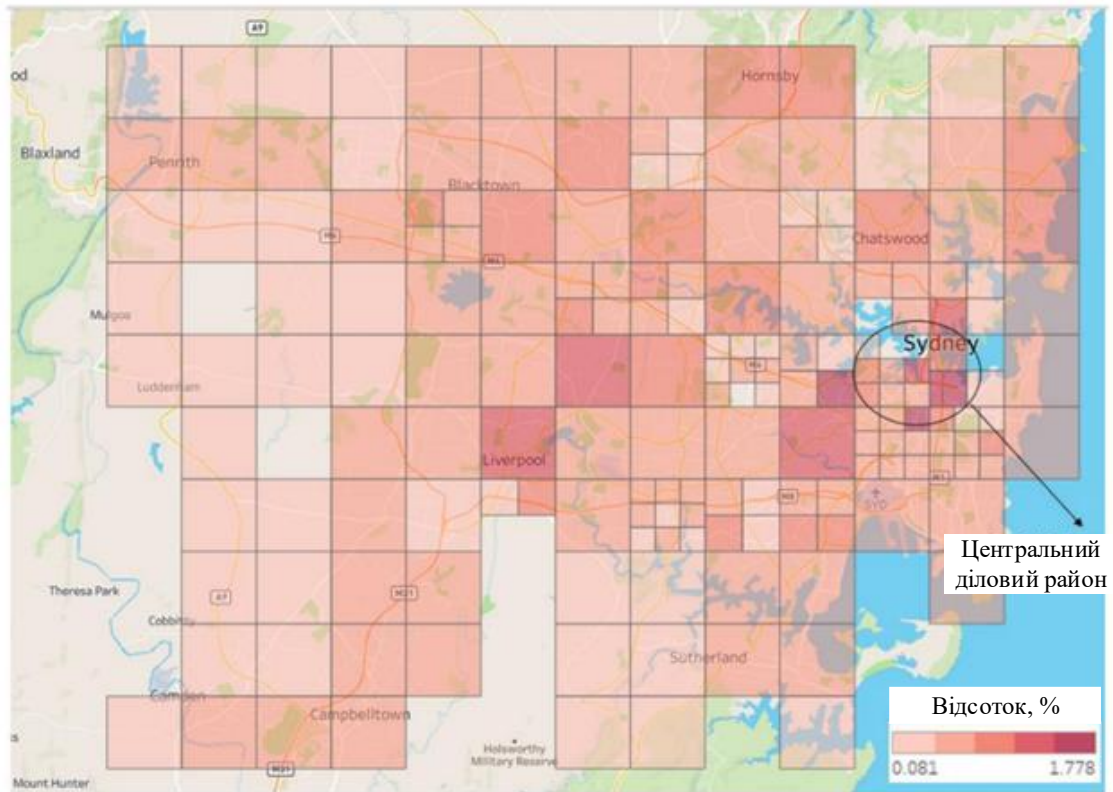


Рис. 2.8. Зональне генерування пересувань (у відсотках від загального попиту) [106]

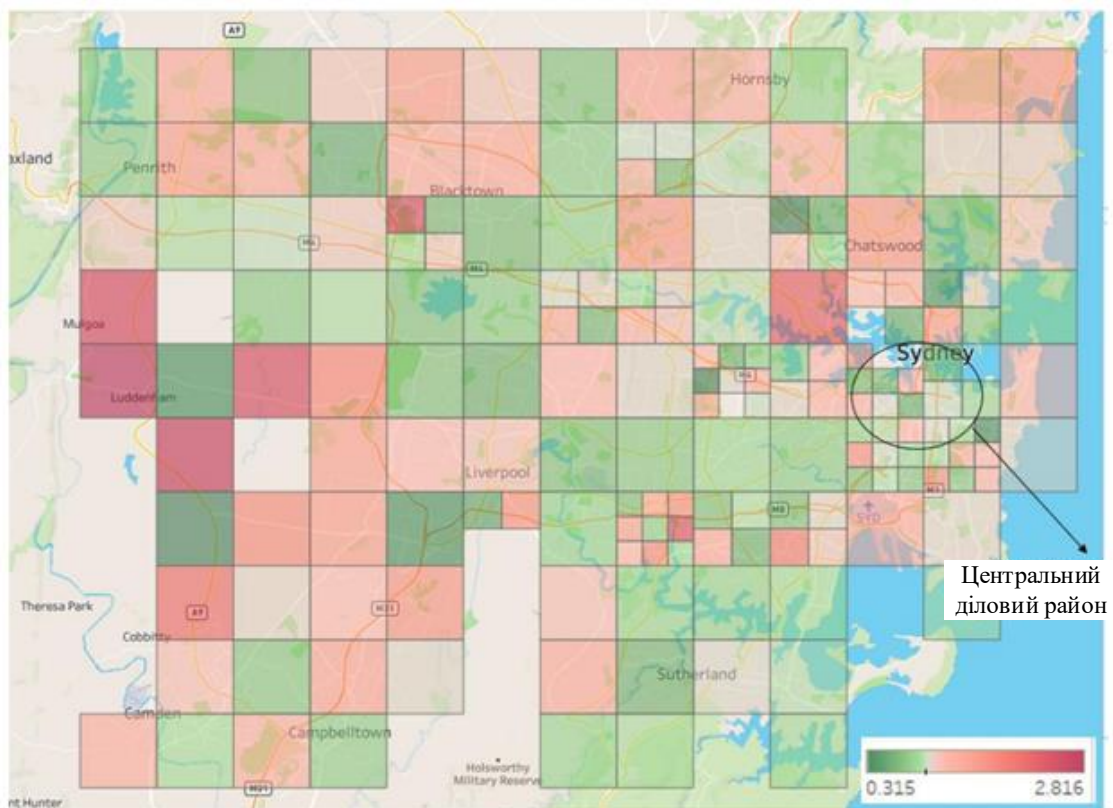
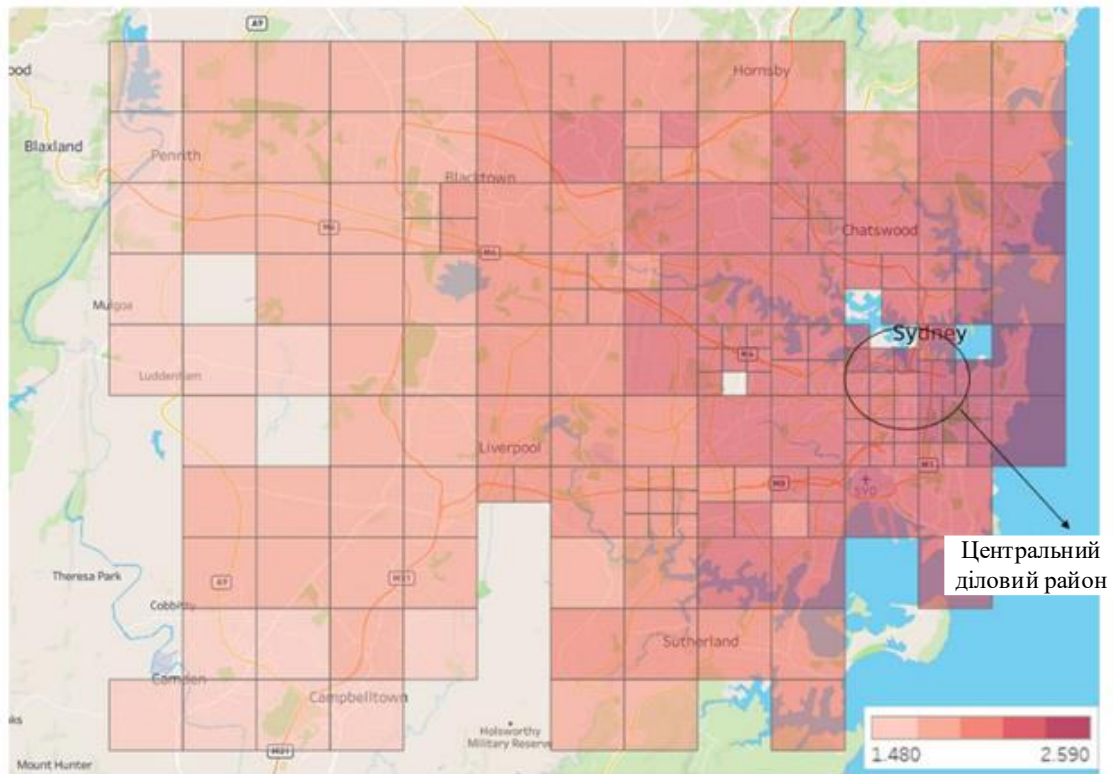


Рис. 2.9. Зональний мережевий внесок (співвідношення генерування та притягання пересувань) [106]



*Рис. 2.10. Зональний індекс завантаження пункту призначення (відношення часу в дорозі до часу безперешкодного проїзду до зони з усіх інших зон) [106]*

На рис. 2.7 зображено частку попиту, який припадає на кожну зону в мережі. Чим темніший зелений колір, тим вища привабливість зони для поїздок. Рис. 2.8 демонструє частку від загального попиту, що генерується кожною зоною. На цьому рисунку темніший червоний колір означає, що зона генерує відносно більшу кількість поїздок, ніж інші зони. На рис. 2.9 показано чистий внесок, тобто співвідношення генерування та привабливість поїздок у різних зонах. Темно-червоний колір вказує на те, що зона генерує більше поїздок, ніж приваблює в ранковий піковий період. З іншого боку, темно-зелений колір вказує на те, що в цих зонах закінчується більше поїздок, ніж починається. З цього рисунку видно, що зони, віддалені від CBD, генерують більше поїздок, ніж приваблюють у період дослідження.

Рис. 2.10 показує середній рівень заторів (відношення часу в дорозі до часу безперешкодного руху), необхідний для досягнення кожної зони мережі з кожної іншої зони в ранковий піковий період. Темно-червоний колір вказує

на те, що для досягнення таких зон необхідно значно більше часу, ніж для інших. Тут видно, що зони, розташовані ближче до CBD, мають більш темний червоний колір, ніж ті, що знаходяться далі. У ранкову годину пік можна очікувати більшої кількості поїздок у напрямку до CBD, а отже, і зростання індексу завантаження [106].

У дослідженні [17] науковці оцінювали вплив різних показників, отриманих за допомогою Rapidex, на екологію та сталий розвиток міст. Так, було зібрано дані про дорожній рух у 26 містах світу за допомогою інтерфейсу прикладного програмування (API) Google Maps. Для всіх міст визначено довжини пересувань на ВДМ (рис. 2.11, а). Рис. 2.11, б демонструє як досліджувані міста диференціюються між собою за тривалістю поїздок. На обох рисунках зазначено 50-ти (медіанний) та 85-ти відсоткові забезпечення розподілів.

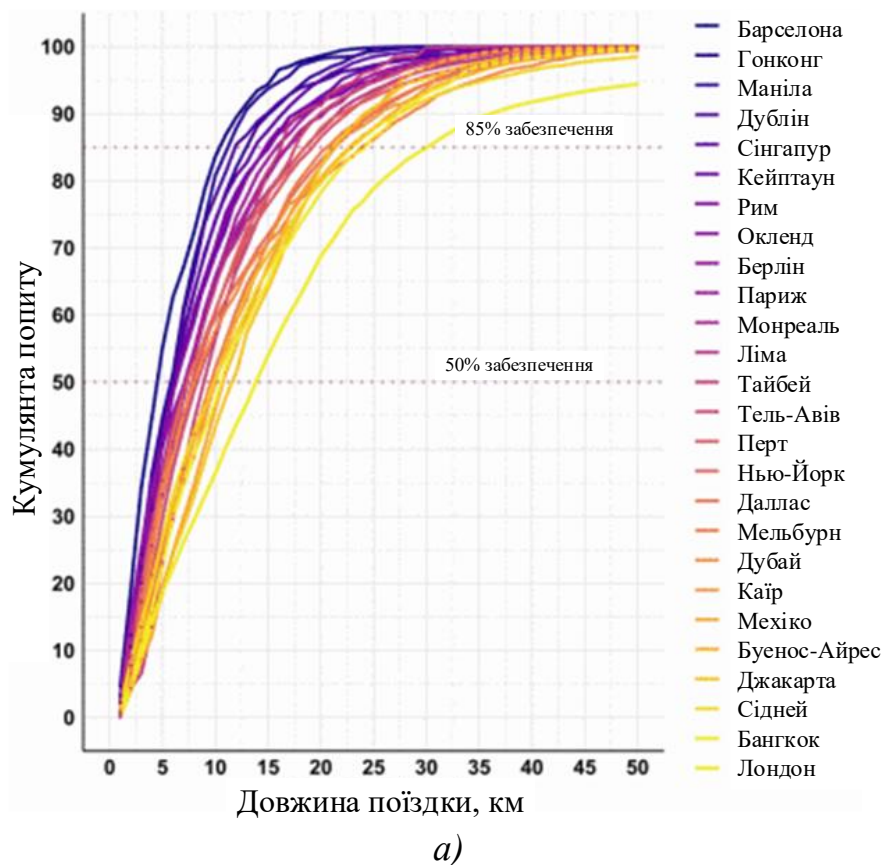
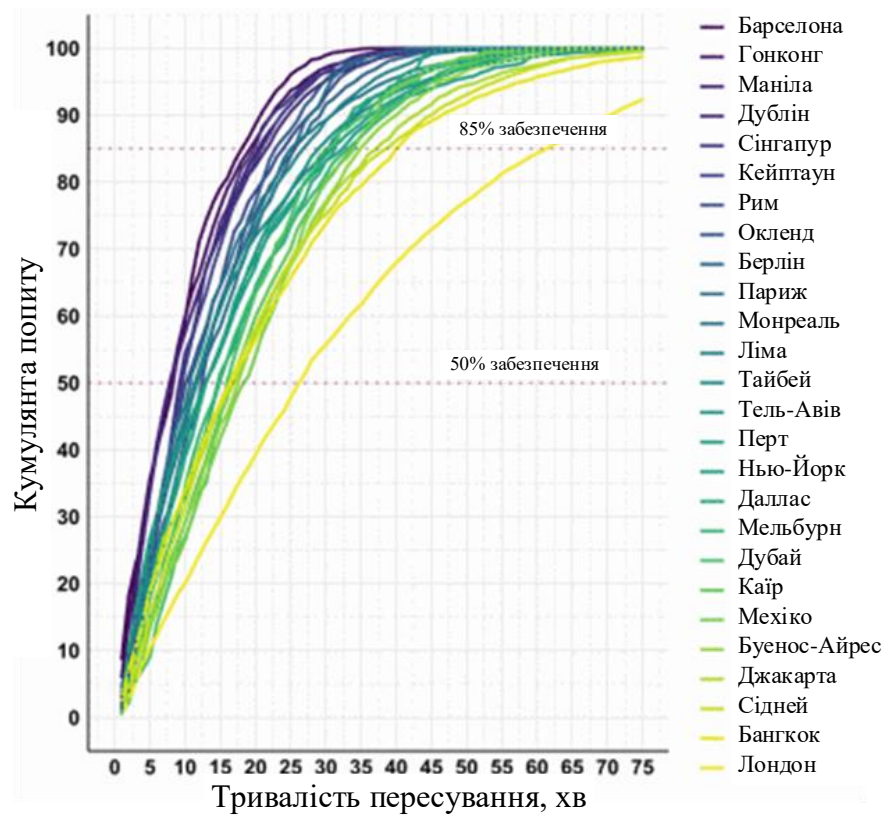


Рис. 2.11. Розподіл оціненої тривалості поїздок та необхідного часу в дорозі для здійснення цих поїздок (а – тривалість поїздки та кумулятивний відсоток попиту, б – розподіл часу в дорозі з кумулятивним відсотком попиту) [17]



б)

*Продовження рис. 2.11*

Барселона (Королівство Іспанія), Гонконг (Особливий адміністративний район Гонконг) і Маніла (Республіка Філіппіни) увійшли до трійки міст з найкоротшою середньою тривалістю поїздки. На відміну від них, жителі Лондона (Сполучене Королівство), Сіднея (Австралія) та Бангкока (Королівство Тайланд) подорожують на великі відстані. Лондон має найбільшу середню довжину поїздки – близько 15 км, тоді як Барселона – близько 5 км. Потенційною причиною такої ситуації може бути значна відстань між міською забудовою Лондона порівняно з Барселоною. Те ж саме можна сказати і про решту міст з більшою середньою довжиною поїздки. Цікаво, що спільним елементом, який об'єднує міста з найкоротшою середньою тривалістю поїздки, є порівняно вужча відстань між міською забудовою. У таких ситуаціях транспортні планувальники та органи влади можуть надавати пріоритет розвитку інфраструктури для велосипедів,

електровелосипедів та пішохідних доріжок, щоб заохочувати сталі способи пересування.

#### 2.4. Висновки з розділу

1. Основою транспортного планування та прогнозування сьогодні все ще залишається чотириступенева транспортна модель, на якій ґрунтуються більшість сучасних моделей.

2. Різноманітність технічних засобів та програмного забезпечення для транспортного моделювання дозволяє вирішувати завдання транспортного планування на трьох рівнях: макро, мезо та мікро. Більшість доступних інструментів вимагають значних часових та фінансових ресурсів.

3. Методи збору початкових даних для транспортного моделювання значно відрізняються за їх можливостями, доступністю та оглядовістю. Для роботи над дисертаційним дослідженням обрано всеохопні дані з повсюдних навігаційних платформ.

4. Для збору даних про дорожній рух, а також з метою оцінки попиту й інших показників ВДМ та дорожнього руху обрано інструмент Rapidex, оскільки він дозволяє отримати дані про тривалість пересування відрізками ВДМ в режимі реального часу для майже будь-якої ВДМ. Це є особливо актуальним для такої надзвичайної події, як війна.

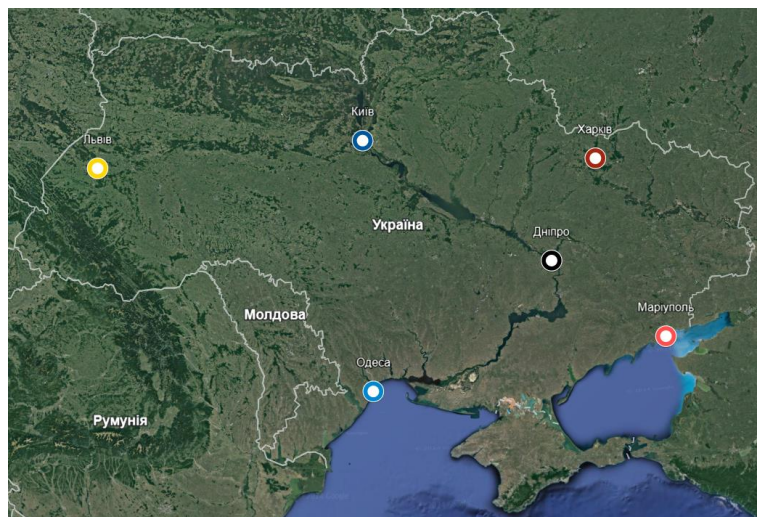
## РОЗДІЛ 3

### ДОСЛІДЖЕННЯ ТРАНСПОРТНОЇ ПОВЕДІНКИ ТА ТРИВАЛОСТІ ПЕРЕСУВАННЯ НАСЕЛЕННЯ В УМОВАХ ВІЙНИ

#### 3.1. Системний аналіз вулично-дорожніх мереж

24 лютого 2022 року РФ здійснила повномасштабне вторгнення в Україну із Півночі (із території Республіки Білорусь включно), Сходу та Півдня. Території поблизу лінії фронту перебували під постійними артилерійськими та авіаційними обстрілами, а ті, що розташовані далі від російського та білоруського кордонів, також були атаковані ракетами дальнього радіусу дії. Однією з перших правових реакцій на вторгнення став указ про введення воєнного стану в Україні, підписаний Президентом 24 лютого 2022 року, який передбачав введення обмежень на пересування людей. З цього часу в населених пунктах була введена нічна комендантська година.

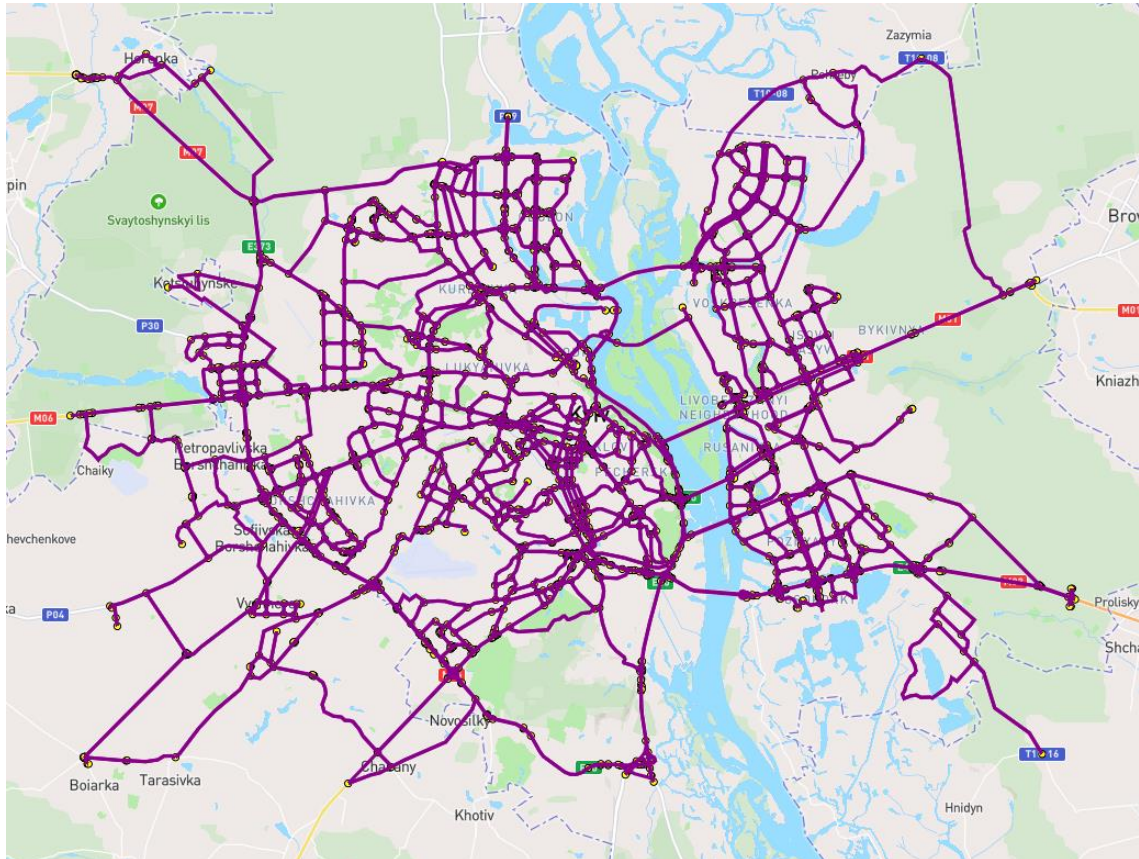
Під час війни кожне місто перебуває в різних умовах, залежно від його географічного розташування, рівня розвитку міської інфраструктури, транспортного сполучення тощо. Нижче подано характеристики шести критично важливих міст України (Київ, Львів, Харків, Одеса, Дніпро та Маріуполь), які розглядаються в цьому дослідженні (рис. 3.1).



*Рис. 3.1. Супутниковий знімок України із позначенням міст, які досліджувалися*



ВДМ цих міст отримані з картографічного сервісу OpenStreetMaps за допомогою інструменту Rapidex та зображені на рис. 3.2 – 3.7. Конфігурації отриманих мереж визначено за класифікацією, описаною у розділі 1.



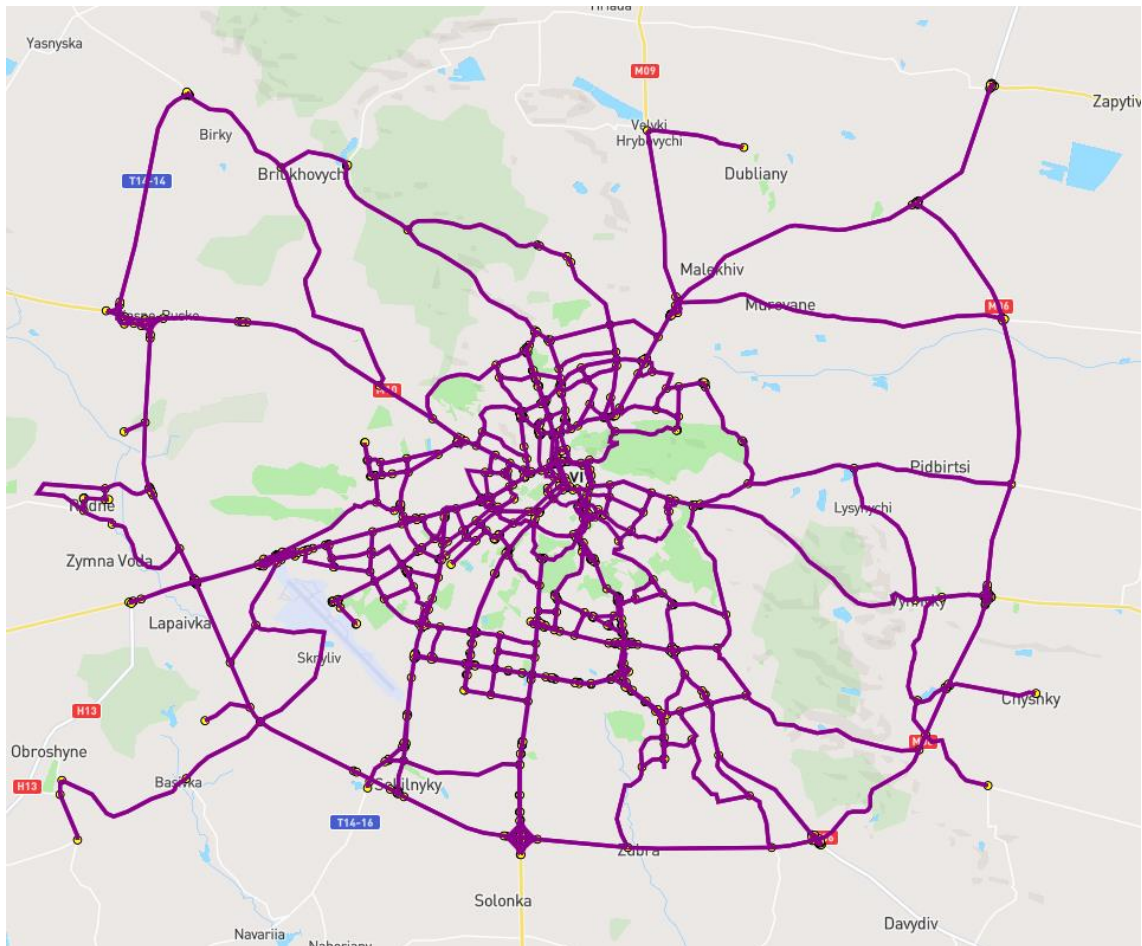
*Рис. 3.2. ВДМ міста Києва*

**Київ**, як столиця, був головною метою РФ. Проте під окупацію потрапили лише приміські міста на північному сході Києва, евакуація з яких була майже неможливою. З огляду на загрозу, кияни намагалися виїхати з першого ж дня вторгнення.

Особливістю міста є річка Дніпро, що розділяє його на дві частини. Тому, мости мають особливу важливу роль у функціонуванні ВДМ Києва. Із початком повномасштабного вторгнення вони були (частково) закриті для проїзду приватного автотранспорту.

Конфігурацію ВДМ можна визначити як радіальну-кільцеву, проте самі кільцеві вулиці та дороги не є чітко визначеними і через географічні особливості не замкнені. Також, в окремих районах зустрічається

гексагональна (наприклад, Оболонь) та прямокутна (Поділ, лівий берег міста) схеми.

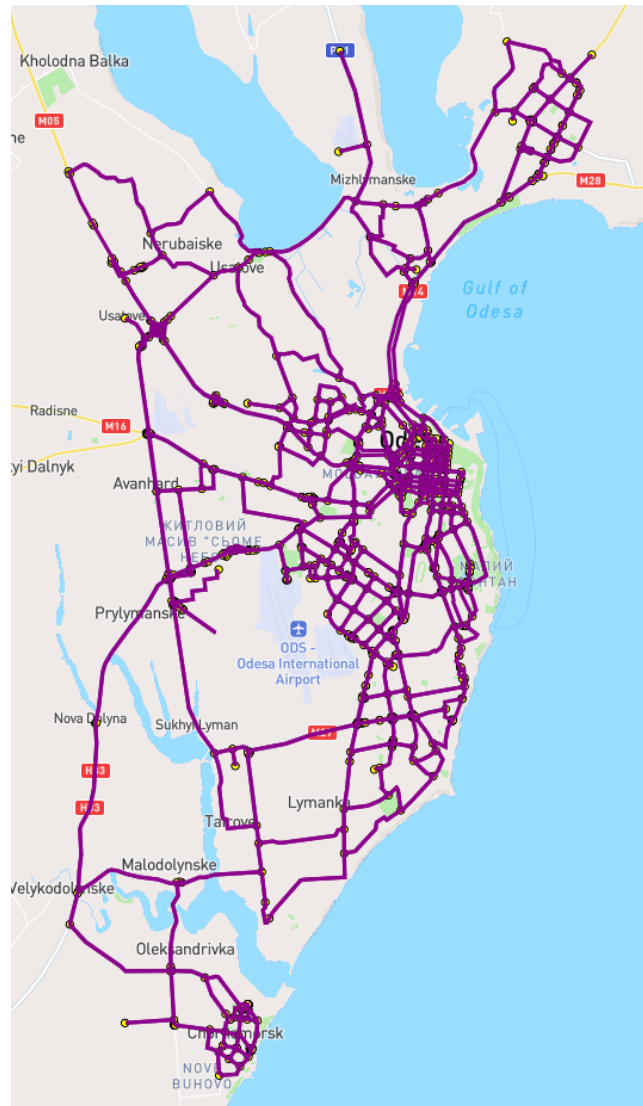


*Рис. 3.3. ВДМ міста Львова*

**Львів** розташований на заході України (70 км від польського кордону) і має пряме залізничне сполучення з Республікою Польща. З початком повномасштабної війни він став величезним логістичним і гуманітарним хабом. Мільйони людей з усієї країни прибували до міста і залишалися там або продовжували свої подорожі до менших населених пунктів чи за кордон. Крім того, багато гуманітарної допомоги з європейських країн надходило до Львова, а потім розподілялася в інші місця.

ВДМ Львова також має радіально-кільцеву конфігурацію із елементами вільної та прямокутної схем в центральній частині міста. Проте малі кільця у місті є (частково) незамкнутими через географічні особливості, а об'їзна кільцева дорога має відсутню ланку на Півночі. Це має негативний вплив на

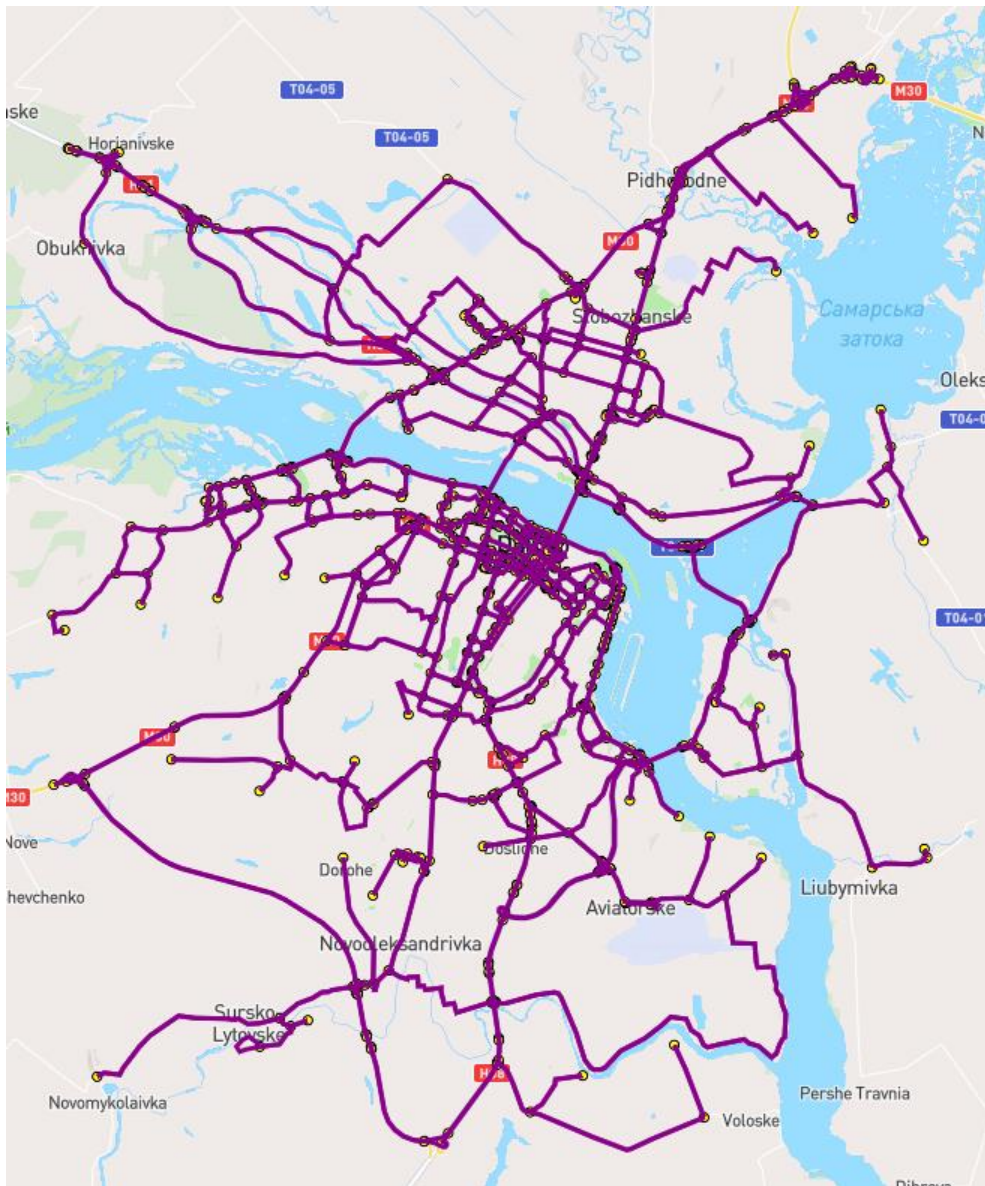
стан дорожнього руху в місті, оскільки транзитний транспорт із європейського автошляху E40 часто змушений заїжджати у саме місто для уникнення перепробігів.



*Рис. 3.4. ВДМ міста Одеси*

**Одеса** розташована на березі Чорного моря. Як портове місто, вона відіграє важливу роль у розподілі вантажів у та з України, особливо у постачанні агросектору.

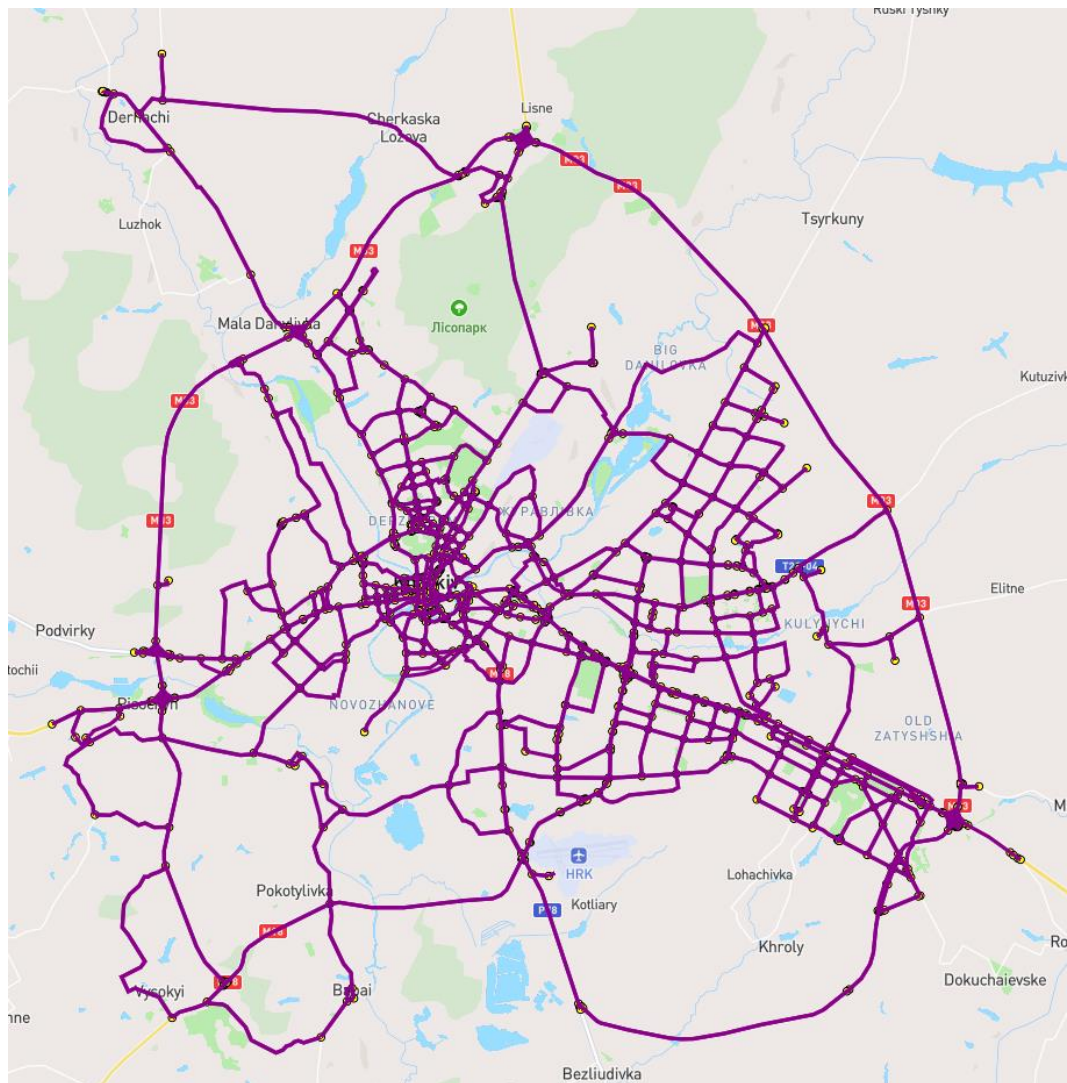
Конфігурація ВДМ визначається як прямокутна, оскільки сучасне місто є досить молодим та забудованим відповідно до попередньо розробленого плану. Проте зараз із центральної частини також відходять радіальні вулиці, що зв'язані між собою півкільцем.



*Рис. 3.5. ВДМ міста Дніпро*

**Дніпро** можна назвати медичним хабом України в часі війни. Багато поранених зі сходу та півдня країни спершу потрапляють саме сюди. А також – це одне з міст (разом із Запоріжжям), куди прибував евакуаційний транспорт із окупованих територій.

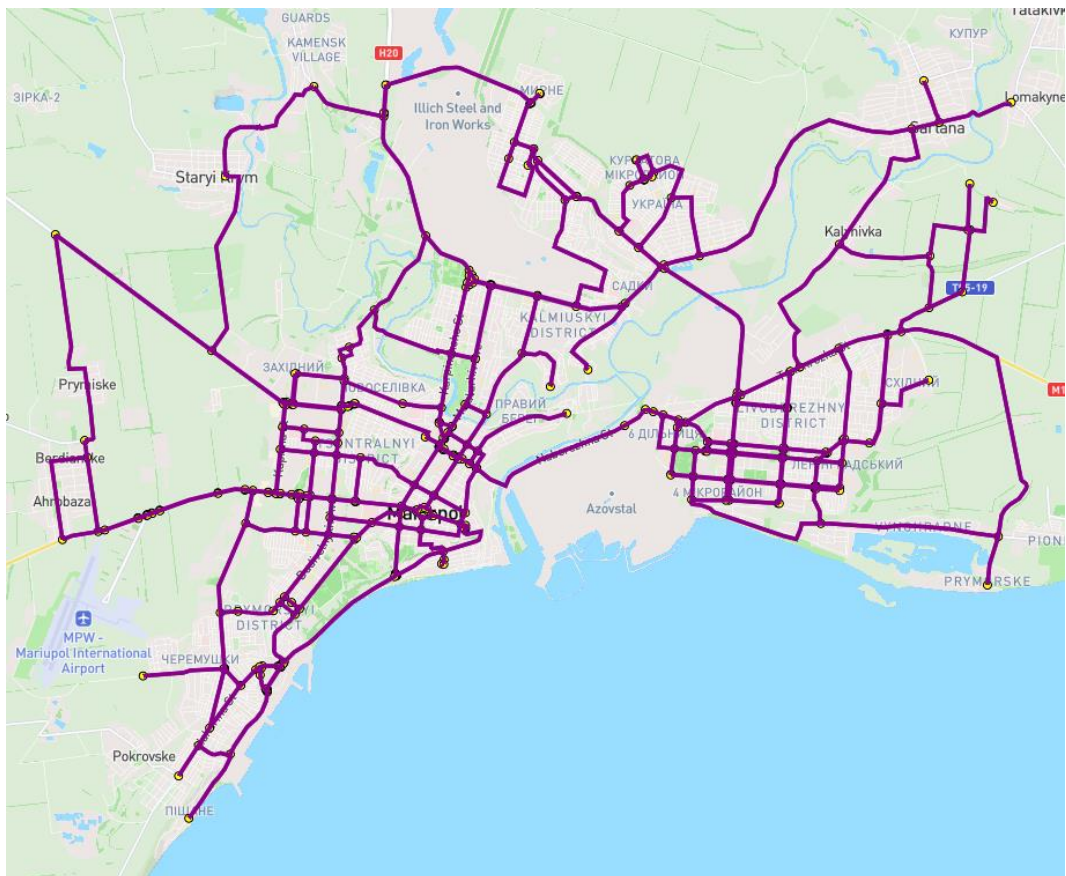
Як і Київ, Дніпро розділене річкою Дніпро, в яку також, в межах міста, впадає річка Самара. Зважаючи на це, конфігурацію магістральної ВДМ можна визначити радше як вільну, тоді як для інших вулиць та доріг вона є чітко прямокутною.



*Рис. 3.6. ВДМ міста Харкова*

**Харків** – друге за чисельністю населення місто України. Він розташований лише за 30 км від російського кордону і також зазнав нападів з першого дня повномасштабної війни. Постійні обстріли міста російськими військами спричинили величезну хвилю евакуації. Як наслідок, за деякими даними, місто покинули близько 1 мільйона мешканців [122].

Харків загалом має радіальну конфігурацію ВДМ із однією кільцевою дорогою на периферії, а також із певними прямокутними елементами в деяких частинах (Індустріальний район, північ Салтівського району).



*Рис. 3.7. ВДМ міста Маріуполь*

**Маріуполь** є єдиним великим містом або великим бар'єром для РФ для створення сухопутного коридору з російської території до тимчасово окупованої Автономної Республіки Крим, тому він став однією з головних окупаційних цілей. З 1 березня 2022 року місто було оточене російськими військами і піддавалося постійним обстрілам. Більшість будівель було зруйновано, а більшість спроб евакуації були зірвані окупаційними силами. Також з середини березня почалася примусова депортація населення на територію РФ.

Це єдине місто серед досліджуваних, що не є обласним центром, проте, зважаючи на його значущість у воєнних подіях, його було включено до роботи.

Подібно до Одеси, Маріуполь є портовим містом на березі Азовського моря та одним із основних промислових центрів країни в галузі металургії.

ВДМ має прямокутну структуру із магістральними вулицями, що радіально відходять від центру міста.

### 3.2. Дослідження транспортної поведінки населення України під час початкової фази повномасштабного вторгнення

Як відомо із Розділу 1, знання про вплив сучасної війни на транспорт є обмеженим у науковій спільноті. Це може пояснюватися складністю доступу до інформації, рідкістю і масштабністю таких подій. Крім того, етичні міркування та уникання політизації науки можуть також ускладнювати дослідження у цій області.

Період виникнення та завершення більшості надзвичайних ситуацій, описаних у Розділі 1, є обмеженим та часто короткотривалим. Тоді як важливою особливістю гуманітарних конфліктів порівняно з іншими катастрофами, є те, що жителі не мають точної інформації про те, коли ці конфлікти завершаться та як вони можуть розвиватися в майбутньому.

Повномасштабне вторгнення РФ в Україну, незважаючи на попередження і прогнози, стало для більшості мешканців несподіваним. Навіть ті, хто мав попередньо підготоване тимчасове укриття, не завжди мали можливість діяти за попередньо спланованим сценарієм. Це спричинило серйозні затори на різних відрізках ВДМ, переважно у напрямку західних областей країни та пунктів пропуску через кордони з країнами Європейського Союзу (ЄС) і Республікою Молдова.

Розуміння процесів евакуації в умовах таких масштабних подій є важливим для визначення особливостей утворення, тенденцій та напрямків ТП у населених пунктах та на міжміських дорогах і вулицях.

У звіті Міжнародної організації з міграції при ООН (МОМ) [123] за перший рік після початку повномасштабного вторгнення зазначено, що після 24 лютого 2022 року в Україні зафіксовано близько 19,5 мільйонів людей, які залишили свої постійні місця проживання. Це число включає 5,4 мільйона внутрішньо переміщених осіб, 5,5 мільйона осіб, які повернулися додому, 8 мільйонів осіб, які зареєстровані за кордоном як шукачі притулку, та 0,6 мільйона громадян третіх країн, які покинули Україну. Населення України на

початок 2022 року становило 41,1 мільйона осіб, не враховуючи тимчасово окуповані території [124]. Згідно розрахунку близько 47,5% населення було евакуйовано.

Дані у звітах МОМ переважно зосереджені на інформації щодо внутрішньо переміщених осіб. Проте важливо враховувати, що для повного розуміння транспортної поведінки населення потрібно розглядати всі напрямки евакуації, а не лише внутрішню міграцію.

Щоб детальніше оцінити процеси евакуації населення з початку повномасштабного вторгнення проведено онлайн-опитування, деякі результати якого опубліковані у статті [125]. У цьому дослідженні, евакуація – це залишення особами своїх постійних місць проживання і переміщення в (умовно) безпечне місце після 24 лютого 2022 року. Місцем завершення евакуації вважалося те, де особа пробувала принаймні 1 місяць. У дослідженні також враховувалася ситуація, коли особа залишала своє постійне місце проживання на короткий період (до 1 місяця), але потім поверталася додому. Це також вважалося евакуацією. У разі, якщо особа під час евакуації перебувала кілька днів у різних місцях, весь цей період вважався тривалістю евакуації.

У проведеному опитуванні отримано 644 відповіді з усіх областей України (за винятком тимчасово окупованої АР Крим) та усіх вікових груп. Згідно методології, описаної у [126], для такого дослідження достатня вибірка із 95% довірчою ймовірністю для випадкового неповторного відбору розраховується за формулою:

$$n = \frac{N}{e^2 \cdot N + 1}, \quad (3.1)$$

де  $N$  – обсяг генеральної сукупності;  $e$  – ймовірність похибки (0,05).

Провівши розрахунок, отримано таке значення необхідного розміру вибірки:



$$n = \frac{41100000}{0,05^2 \cdot 41100000 + 1} = 400 \text{ осіб}$$

Помилка репрезентативності розраховується за формулою [127]:

$$\mu = \sqrt{\frac{\sigma_x^2}{n} \left(1 - \frac{n}{N}\right)}, \quad (3.2)$$

Тоді, для отриманої кількості відповідей 644, помилка репрезентативності становить:

$$\mu = \sqrt{\frac{0,5^2}{644} \left(1 - \frac{644}{41100000}\right)} = 0,02.$$

Згідно отриманих розрахунків, опитування можна вважати достатньо репрезентативним. Його зміст подано у Додатку А.

Згідно його результатів, 51,7% серед опитаних евакуювалися зі свого місця проживання із початком повномасштабного вторгнення, тоді як 48,3% залишилися на місці.

Найбільш поширеною причиною відмови від евакуації було те, що в місці проживання або поблизу не велися активні бойові дії (63,3%). 22,4% осіб не могли залишити близьких людей, що з певних причин не планували евакуюватись, а 11,4% не бажали залишати тварин. 17,9% респондентів зазначили, що їм не було куди евакуюватися, а 9,4% взагалі не мали можливості покинути свої первинні місця проживання. Розподіл підстав відмови від виїзду зображено на рис. 3.8. Важливо додати, що респонденти у цьому запитанні могли обрати більше однієї відповіді.

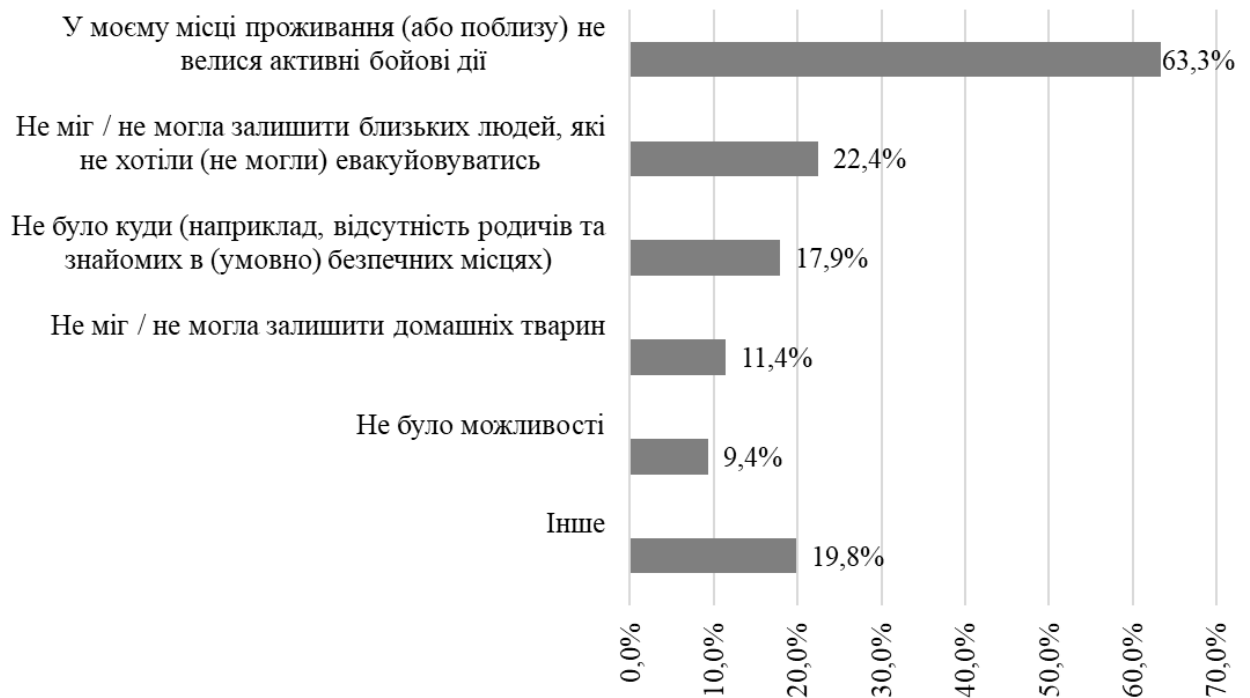
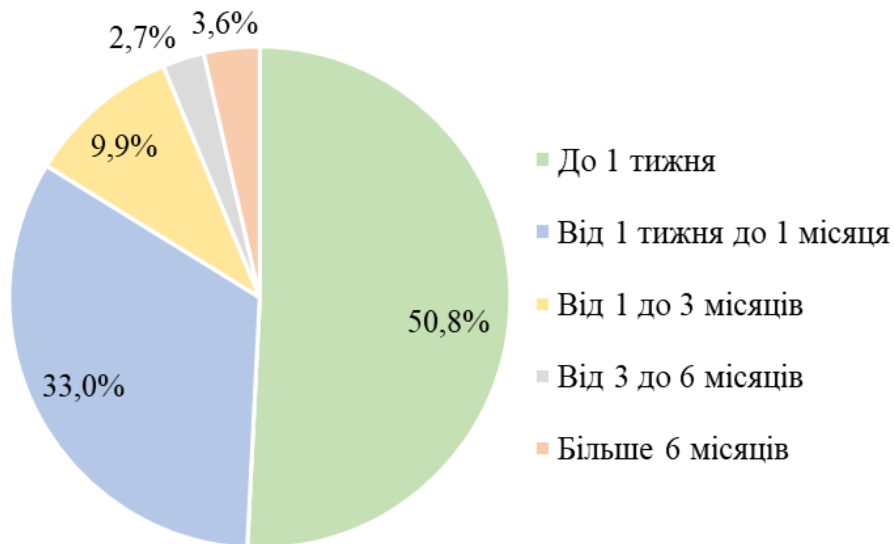


Рис. 3.8. Розподіл підстав відмови від евакуації

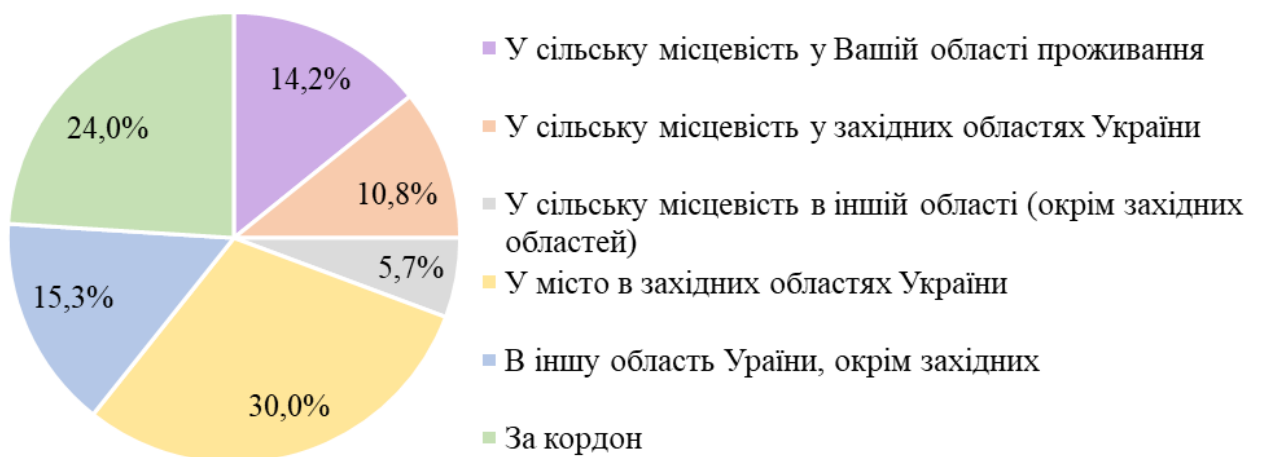
Для вивчення особливостей евакуації також важливо розуміти умови, за яких люди залишають свої місця проживання. За результатами опитування більшість осіб (70,3%) мали можливість виїхати без значних перешкод, оскільки їхні населені пункти не були ані окуповані, ані оточені. 23,1% опитаних були змушені евакуйовуватися з територій під окупацією, а 5,4% – з оточених зон. Тільки 1,2% прийняли рішення про переміщення після звільнення регіону.

Понад половина опитаних (50,8%) прийняла рішення про евакуацію майже одразу після початку повномасштабного вторгнення – протягом першого тижня. Ще 33,0% евакуйовувалися протягом першого місяця. Найменшу частку (2,7%) складає період від трьох до шести місяців. Через шість місяців або пізніше евакуйовувалося 3,6%. Цей невеликий приріст, можливо, пов'язаний зі зміною сезону (холодної пори). Різке зниження частки в пізніші терміни свідчить про адаптацію та звикання населення до надзвичайних подій. Діаграма розподілу евакуаційних пересувань за часом їх здійснення показано на рис. 3.9.



*Рис. 3.9. Діаграма розподілу евакуаційних пересувань за часом їх здійснення від початку повномасштабного вторгнення*

За цим ж опитуванням найбільший відсоток серед напрямків евакуації (40,8%) займають західні області України, такі як Чернівецька, Хмельницька, Тернопільська, Івано-Франківська, Волинська, Рівненська, Львівська та Закарпатська. 24% респондентів продовжили свій шлях за межі держави. 14,2% для тимчасового перебування переїхали у сільські райони області, в якій проживали. Значну частку (15,3%) також склали переміщення до інших регіонів, окрім західних областей. На рис. 3.10 представлено розподіл кінцевих пунктів евакуації.



*Рис. 3.10. Діаграма розподілу евакуаційних пересувань за напрямками*

Під час масштабних подій, таких як війна, евакуація стає особливо складною через різке зростання інтенсивності дорожнього руху, що часто супроводжується перевищенням ПЗ як міжміських магістралей, так і міської ВДМ. Різні превентивні події, такі як руйнування шляхопроводів та мостів, не дозволяють використовувати звичні маршрути. Окупація російськими військами окремих регіонів також ускладнює евакуацію, іноді навіть унеможливаючи її. Тому тривалість пересування до пункту призначення іноді зростала у декілька разів, порівняно із звичною (в умовах відсутності перешкод).

Евакуйовані особи часом могли не знати точного місця призначення, оскільки в (умовно) безпечних місцях не мали знайомих людей. У такому випадку пошук прихистку вимагав значних витрат часу. 3,1% респондентів знадобилося 3-4 тижні, щоб дістатися кінцевого пункту евакуації, а для 3,9% більше чотирьох тижнів. Однак найбільша частка опитаних (41,7%) пересувалася менше однієї доби. Розподіл тривалості евакуаційних пересувань подано на рис. 3.11.

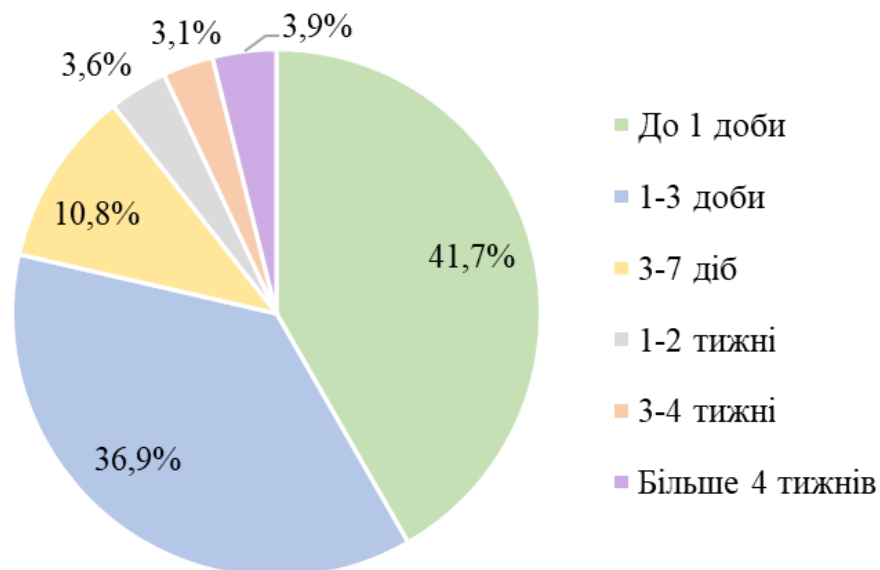


Рис. 3.11. Діаграма розподілу тривалості евакуаційних пересувань до кінцевого пункту

Іншим важливим аспектом є оцінка відстані до кінцевого пункту евакуації. Розподіл діапазонів відстаней є не дуже вираженим (рис. 3.12).

Найбільшу частку (24,9%) складає варіант «більше 1000 км», тоді як найменшу (13,8%) – «до 100 км». Між частками решти діапазонів немає такого значного відхилення.

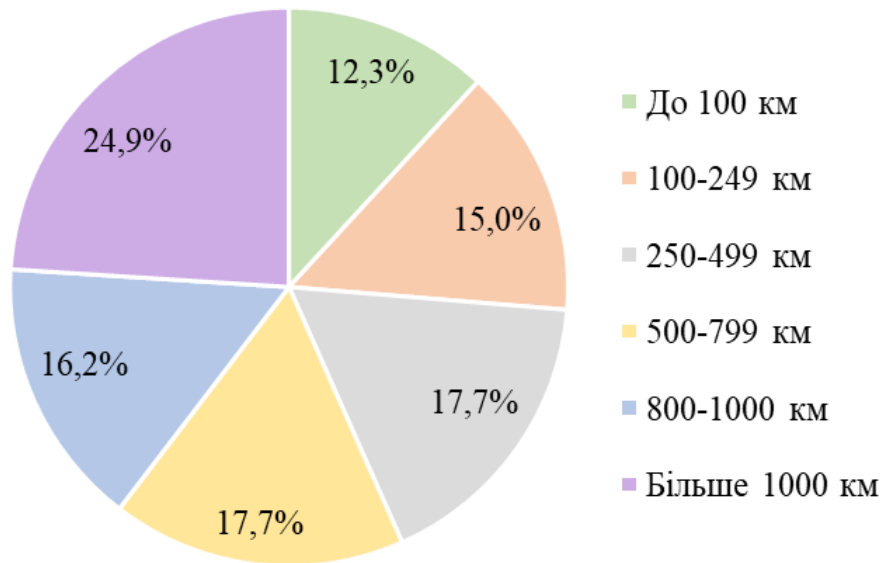


Рис. 3.12. Діаграма розподілу діапазонів відстані евакуації

Під час подальшого аналізу відповідей визначено певні додаткові особливості транспортної поведінки мешканців України в умовах війни. Серед тих, хто виїжджав із свого населеного пункту на відстань до 100 км у сільській місцевості своєї області зупинилося 80,5%, а тривалість пересування становила до 1 доби для 98%. Важливо зазначити, що рішення про евакуаційні пересування на незначну відстань люди найчастіше приймали в перший тиждень повномасштабного вторгнення (76%), серед них 90,2% повернулися до свого первинного місця проживання (більшість до 3 місяців після евакуації).

Для виїзду із оточення чи окупації 18,5% опитаних витратили від 1 тижня для досягнення кінцевого пункту, з яких 7,7% – більше 4 тижнів. Із цієї групи респондентів на відстань більше 1000 км змушені були виїхати 38,5%. Найбільшу частку серед пунктів призначення становили західні області (50,8%) й інші держави (21,5%).

### 3.3. Аналіз хронології воєнних подій у досліджуваних містах

Як згадано у Розділі 1, відмінною особливістю війни від інших катастроф є її тривалість та непередбачуваність для мешканців, тобто важко спрогнозувати (особливо в початкову фазу конфлікту) коли / чи люди зможуть повернутися якнайшвидше у свої первинні місця проживання.

Попередньо описана транспортна поведінка населення України зумовлена певними подіями воєнного характеру. З діаграми на рис. 3.9 зрозуміло, що найбільша частка осіб (83,8%) евакуювалися в перший місяць від повномасштабного вторгнення. Ця інформація дозволяє припустити, що основним тригером є не окремі події (обстріли, руйнування інфраструктури тощо), а сам факт війни. Підтвердженням цього також є евакуація людей із регіонів, які віддалені від бойових дій. Проте одним із завдань дослідження є перевірка впливу окремих подій на транспортну поведінку населення.

Для аналізу воєнних подій їх прокласифіковано в певні групи, блок-схема яких подана на рис. 3.13.

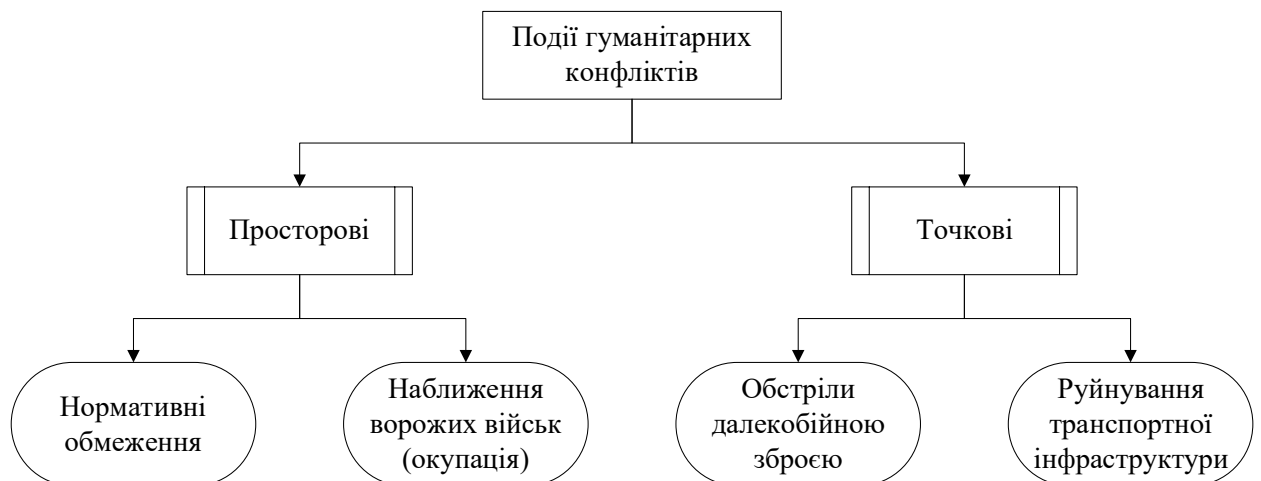


Рис. 3.13. Блок-схема класифікації подій гуманітарних конфліктів

Поділ подій включає:

- Просторові – це події чи заходи, які відбуваються / впроваджуються на певній території країни. Серед них є такі:

- нормативні обмеження. Найяскравішим прикладом цієї групи є впровадження комендантської години у населених пунктах України;
- наближення ворожих військ, до якої також включено окупацію регіонів та артилерійські обстріли, оскільки вони тісно зв'язані із безпосередньою дислокацією військ;
- точкові – події, що мають конкретне місце на мапі та дозволяють визначити їх чіткі координати. Вони також поділяються на дві підгрупи:
  - обстріли далекобійною зброєю, наприклад ракетами та дронами;
  - руйнування транспортної інфраструктури (мостів, шляхопроводів тощо). Ця група є унікальною, тому що не завжди руйнування здійснюються ворожими військами, інколи цей захід необхідний для покращення лінії оборони та стримування просування окупаційної армії. Також сюди включена заборона проїзду певними ділянками ВДМ, з метою підсилення захисту та запобігання діяльності диверсійно-розвідувальних груп. Частково руйнування чи обмеження руху певними відрізками ВДМ мають і просторові наслідки, оскільки змушують користувачів обирати альтернативні маршрути для пересування.

Для оцінки впливу війни на дорожній рух зібрано дані про воєнні події, які відбувалися у досліджуваних містах.

У першій ітерації дослідження таблиця подій за період 24.02.2022 – 12.04.2022 (Додаток Б) включала таку інформацію: подія, дата, ступінь небезпеки та примітку [128].

Ступінь небезпеки коливався у градації від 1 до 3 і залежав від тяжкості наслідків подій (кількість загиблих та/або поранених цивільних осіб), де 1 – руйнування без значного впливу на функціонування міста та без людських жертв, 2 – поранення людей та / або руйнування цивільної інфраструктури, 3 – особливо значні руйнування (особливо цивільної інфраструктури) та / або загибель людей, а також спроби окупації населених пунктів. Для таких подій,

як впровадження комендантської години, закриття / підрих мостів, деокупація територій тощо, цей показник не визначався.

Систематизовані дані про воєнні події за критерієм найвищого рівня небезпеки з таблиці Додатку Б, щодо яких перевірялася кореляція із показниками дорожнього руху, подано у таблиці 3.1 [128]. Слід звернути увагу, що для певних подій, для яких співпадає дата настання, присвоєно однаковий порядковий номер.

Таблиця 3.1

**Воєнні події із найвищим рівнем небезпеки  
у період 24.02.2022 – 12.04.2022**

№	Подія	Дата
1	2	3
<b>Київ</b>		
1	Серія потужних авіаударів по різних об'єктах у Києві. Ракетні та артилерійські удари по Бучі, Ірпеню, Гостомелю, Ворзелю, Бородянці	24.02.2022
2	Бої на проспекті Перемоги та вулиці Дегтярівській	25 – 26.02.2022
3	Ракетний обстріл житлового будинку	26.02.2022
3	Комендантська година	26 – 28.02.2022
4	Влучання в пункт захоронення радіоактивних відходів київської філії «Об'єднання «Радон»»	28.02.2022
5	Влучання в телевежу	1.03.2022
6	Російський снаряд влучив у торговий центр Lavina Mall	14.03.2022
7	Комендантська година	15 – 17.03.2022
8	Російський снаряд частково зруйнував торговий центр «Ретровіль»	20.03.2022
9	Деокупація всієї Київської області	2.04.2022
<b>Харків</b>		
1	Російські війська почали обстріл Харкова	24.02.2022
2	Масований обстріл житлових кварталів. Кілька російських танків увійшли до Харкова	26.02.2022
3	Ракетний обстріл площі Свободи; частково зруйнована будівля облдержадміністрації; бомби, ракети та снаряди влучили в житлові будинки та цивільні об'єкти (жертви: 23)	1.03.2022
4	Масований обстріл житлових кварталів, найбільше постраждав мікрорайон Північна Салтівка (зруйновано 40 багатоквартирних будинків, жертви: 34 особи)	3.03.2022



## Продовження табл. 3.1

1	2	3
5	Ракетні удари по будівлі облдержадміністрації, Успенському кафедральному собору та університету ім. Каразіна. Обстріли спальних районів	4.03.2022
6	Російські війська намагалися штурмувати Харків.	15.03.2022
7	Обстріляно ринок «Барабашово» та місто Мерефа, зруйновано школу та будинок культури (жертви: 28 осіб)	17.03.2022
8	Щонайменше 50 обстрілів протягом дня. Російські військові підірвали один із затворів дамби Оскільського водосховища (жертви: 11 осіб)	3.04.2022
9	Вночі за допомогою артилерії росіяни дистанційно розкидали міни сповільненої дії в різних районах (жертви: 7 осіб)	11.04.2022
<b>Маріуполь</b>		
1	Рух танків з Донецька до Маріуполя (знищені українською армією)	27.02.2022
2	Увечері в більшості районів міста відключили електрику, газ та інтернет	28.02.2022
3	Оточення та початок блокади міста РФ	1.03.2022
3	Удари по всіх районах міста, в тому числі по об'єктах критичної та комунальної інфраструктури. Чергова спроба прориву оборони Маріуполя	1.03.2022
4	Російські війська обстріляли торговий центр «Епіцентр», 22-й і 17-й мікрорайони та станцію переливання крові	3.03.2022
5	Взяття російськими військами Мангуша та їх вихід до моря	8.03.2022
6	Внаслідок авіаудару зруйновано пологовий будинок та лікарню в центрі міста	9.03.2022
7	Взяття населених пунктів Найдєнівка, Ляпін, Виноградар, Сартана	10.03.2022
8	Захоплення Волновахи та східних передмість Маріуполя	12.03.2022
9	«Зелений коридор» для евакуації	15 – 18.03.2022
10	Авіаудар по Маріупольському драматичному театру. Російська армія прорвалася у східну частину міста.	16.03.2022
11	Українські військові контролюють лише половину міста, а окупанти – 17-23 мікрорайони, Лівий берег та інші частини Маріуполя	17.03.2022
12	Бої за окремі будівлі та цілі квартали	23-28.03.2022

1	2	3
<b>Дніпро</b>		
1	Авіаудари по дитячому садку, житловому будинку та взуттєвій фабриці	11.03.2022
2	Ракетний обстріл міжнародного аеропорту «Дніпро»	15.03.2022
3	Ракетний обстріл нафтобази та підприємства в Новомосковську	30.03.2022
4	Ракетний обстріл військової частини в Дніпропетровській області (жертви: 2 особи)	31.03.2022
5	Ракетний обстріл зруйнував об'єкт цивільної інфраструктури	2.04.2022
6	Ракети влучили в нафтобазу з пальним та завод	6.04.2022
7	Три обстріли російськими військами Синельниківського та Криворізького районів (жертви: 4 особи)	7.04.2022
8	Численні влучання в різних частинах області. Сім ударів по місту за ніч, включно із аеропортом «Дніпро»	10.04.2022
<b>Львів</b>		
1	Атаковано три військові частини	24.02.22
2	Авіаудар по Міжнародному центру миротворчості та безпеки	13.03.22
3	Ракетний удар по Львівському державному авіаремонтному заводу	18.03.22
4	Ракетних удари по нафтобазі та Львівському бронетанковому заводу	26.03.22
<b>Одеса</b>		
1	Початок евакуації громадян потягами	27.02.2022
2	Ракетним обстрілом пошкоджено газопровід	1.03.2022
3	Авіаудари по селу Біленьке та місту Затока	3.03.2022
4	Російські війська завдали ударів по населених пунктах в Одеській області, а також атакували з кораблів	15 – 16.03.2022
5	Два кораблі обстріляли прибережну зону в південній частині міста	21.03.2022
6	Обстріляно Одеський нафтопереробний завод та кілька нафтосховищ	3.04.2022
7	Ракетний удар трьома керованими ракетами	7.04.2022
8	Комендантська година	9 – 11.04.2022

Подальші дослідження продемонстрували, що для якіснішого аналізу взаємозв'язку між подіями та характером дорожнього руху необхідна краща

деталізації даних. Тому в другій ітерації дослідження в таблицю подій (Додаток В) записано: дата, час, (також дата і час завершення у випадку подій неточкового характеру), подія, точне місце розташування та координати (приховано із додатку В з міркувань обмеженого доступу), толерантність до місця розташування (у випадку, якщо точні координати невідомі) та група. Тривалість дослідження збільшено до 15.05.2022 р.

Таблиця подій сформульована на основі узагальнення даних, зібраних з різних джерел, включаючи офіційні ЗМІ, громадсько-політичні організації, офіційні канали комунікації обласних військових (державних) адміністрацій, міжнародні аналітичні центри тощо. Інформація була перехресно перевірена на достовірність з використанням декількох джерел даних.

Для чіткого визначення координат події, за умов відсутності офіційних даних, застосовувалися методи та інструменти OSINT (open source intelligence – розвідка на основі відкритих джерел) [129].

#### 3.4. Первинний аналіз тривалості пересування відрізками ВДМ досліджуваних міст

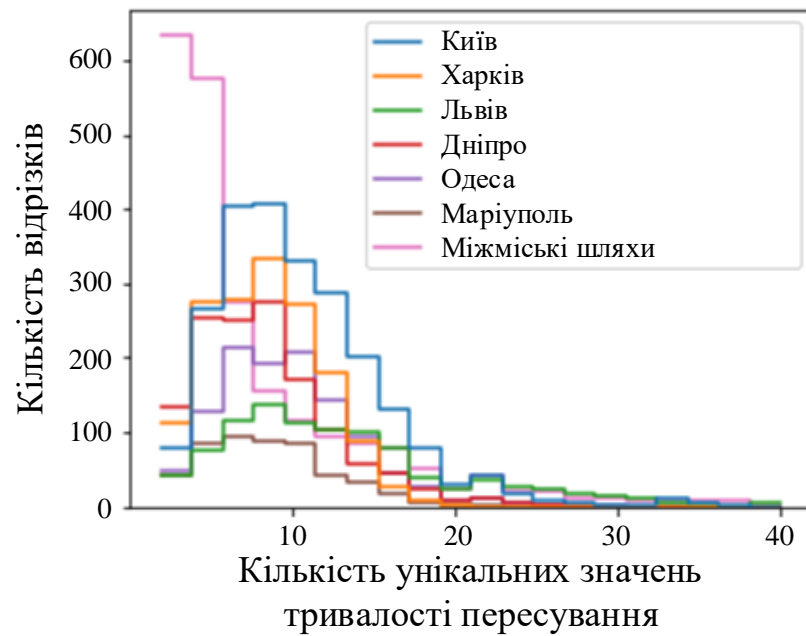
Із Розділу 2 відомо, що первинним показником дорожнього руху, який можна отримати за допомогою інструменту Rapidex, є тривалість пересування відрізком ВДМ. Його зміна в часі може бути пов'язана із зміною інтенсивності руху або зниженням ПЗ. Саме щоб виключити чи підтвердити останнє, використовується таблиця воєнних подій – перевірка наявності перешкод в зоні, що розглядається.

Для першої ітерації дослідження (результати якого представлено у роботах [128, 130]) було використано методологію оцінки кореспонденцій, описану у Розділі 2, для 7 схем ВДМ (6 міських мереж та 1 мережа міжміських шляхів по всій країні) в Україні. По-перше, отримано дані дорожньої мережі з OpenStreetMap для кожної ВДМ на основі координат обмежувальної рамки. Потім отримано дані про час у дорозі з TomTom для всіх мереж. Збір даних

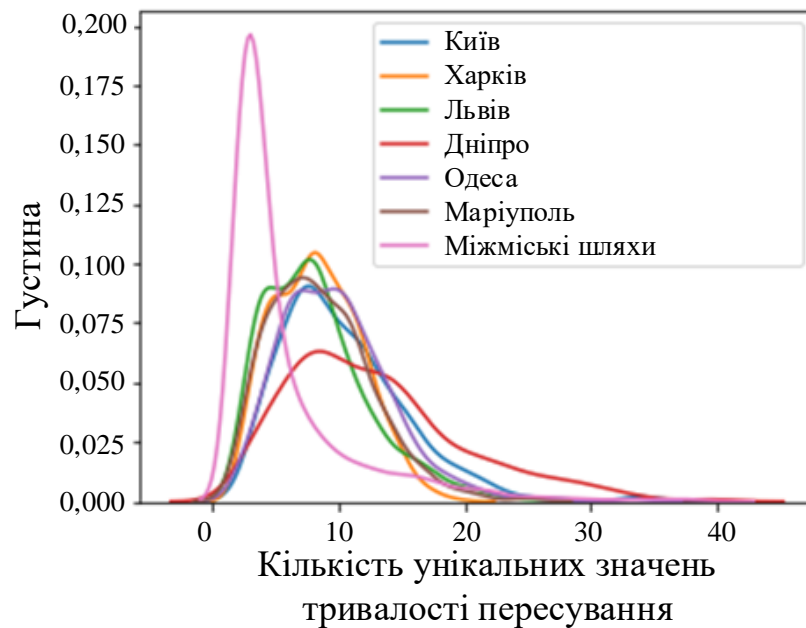
проводився у два періоди: з 25 лютого по 16 березня та з 25 березня по 12 квітня 2022 року. Протягом періоду збору даних було встановлено щонайменше три різні часи відправлення: вранці о 9 годині, вдень о 13 годині та ввечері о 17 годині.

Хоча всеохопні дані про дорожній рух є потенційно корисними під час катастроф, їхня надійність, як правило, не оцінювалася через нечисленність таких подій. Наприклад, використання усереднених або історичних значень дорожнього руху у випадках, коли не виявлено жодних джерел інформації, є звичайною практикою для навігаційних провайдерів, таких як Google і TomTom. Тому частина зібраних даних може відображати лише повторювані в історичному контексті / усереднені умови роботи мережі. Такі випадки також можуть бути присутніми, зокрема, при вторгненні в Україну, коли деякі навігаційні платформи тимчасово вимикали функцію прямого ефіру. Тому також важливо оцінити надійність даних, перш ніж робити висновки про попит на поїздки або аналізувати моделі мобільності.

Щоб виміряти надійність зібраних даних з TomTom, встановлено таку метрику, як частоту унікальних значень тривалості пересування. Ми припускаємо, що оновлення тривалості пересування є новими лише тоді, коли вони відрізняються від інших виявлених значень (з точністю до 2 знаків після коми). Також відфільтровано відрізки малої довжини, тобто коротші за 100 метрів для всіх міст і коротші за 500 метрів для мережі міжміських автомагістралей, які можуть розмити результати. На рис. 3.14, *а* показано гістограму кількості сполучень з відповідними унікальними значеннями тривалості пересування, що спостерігалися протягом періоду дослідження (40 днів), а на рис. 3.14, *б* наведено функції щільності ймовірності тривалості пересування для всіх міст, щоб забезпечити нормалізоване порівняння всіх міст.



а)



б)

Рис. 3.14. Аналіз надійності даних TomTom.

А – гістограма унікальних значень тривалості пересування відрізками, б – функції щільності розподілу ймовірностей для унікальних значень тривалості пересування відрізками

У таблиці 3.2 наведено відповідні статистичні дані. Очевидно, що серед усіх міст Львів має найчастіше оновлювані дані за 40 днів, з середнім значенням 12,85, а за 25-м і 75-м перцентиліями значення становлять 8 і 16 відповідно. Всі інші мережі оновлюються в середньому на рівні 10 або менше з відносно нижчими значеннями перцентилів, незалежно від їхнього розміру.

Аналогічно, мережа автомобільних доріг України демонструє найменшу частоту оновлення з середнім значенням 7,7, а за 75-м процентилем – лише 10. Таким чином, для Львова функція щільності ймовірності тривалості пересувань також є найбільш рівномірно розподіленою. Мережа автомобільних доріг України є найбільш зміщеною вліво, тоді як інші міста мають більш симетричне розміщення функції щільності.

Таблиця 3.2

**Статистика кількості унікальних значень тривалості пересування відрізками ВДМ від TomTom**

<b>Мережа</b>	<b>Київ</b>	<b>Харків</b>	<b>Львів</b>	<b>Дніпро</b>	<b>Одеса</b>	<b>Маріуполь</b>	<b>Міжміська мережа</b>
<b>Показник</b>							
Кількість відрізків	2304	1571	960	1335	1128	495	2220
Кількість днів	40	40	40	40	40	40	40
Середнє значення	10.4	8.34	12.85	8.29	9.74	8.56	7.7
Стандартне відхилення	5.1	3.45	7.03	4.29	4.4	4	6.63
25-й перцентиль	7	6	8	5	6	5	3
50-й перцентиль	9	8	11.5	8	9	8	5
75-й перцентиль	13	11	16	10	12	11	10
Максимальне значення	38	20	40	28	34	25	40

Для таких деструктивних явищ, як війна, тривалість пересування найкраще підходить для аналізу транспортних моделей та їхнього зв'язку з різними конкретними воєнними подіями. Тому в роботі використано дані про тривалість пересування Україною: а) для просторового аналізу варіабельності тривалості пересування, усередненої за досліджуваний період; б) для часового аналізу варіабельності тривалості пересування та індексу завантаження протягом досліджуваного періоду.

Для оцінки надійності тривалості пересування використовується коефіцієнт варіації тривалості пересування, який враховує як варіацію, так і середню тривалість пересування відрізком. Це дозволяє продемонструвати нормовану варіацію тривалості пересування.

Ці рівняння дозволяють розрахувати коефіцієнти варіації тривалості пересування:

$$CoV_i^{dW} = \frac{\sigma_i^{dW}}{\mu_i^{dW}}, \quad (3.3)$$

$$CoV^{dW} = \frac{\sum CoV_i^{dW}}{n}, \quad (3.4)$$

де  $CoV_i^{dW}$  – коефіцієнт варіації тривалості пересування відрізка  $i$  протягом ковзного вікна руху тривалістю  $W$  днів для часу відправлення  $d$ ;  $\sigma_i^{dW}$  та  $\mu_i^{dW}$  – відповідно середньоквадратичне відхилення та середню тривалість пересування для відрізка  $i$  протягом ковзного вікна  $W$  днів для часу відправлення  $d$ ;  $i \in I$ , де  $I$  є набором  $n$  відрізків мережі;  $CoV^{dW}$  – середній коефіцієнт варіації мережі.

У цьому дослідженні співвідношення отриманої тривалості пересування та тривалості пересування за безперешкодного руху відрізком розглядається як міра рівня завантаження відрізка (індекс завантаження). Деяко модифіковане рівняння (1.2) показують процес розрахунку ковзного середнього індексу завантаження для всієї мережі:

$$CI_i^{dx} = \frac{T_i^{dx}}{F_i^{dx}}, \quad (3.5)$$

$$CI^{dx} = \frac{\sum CI_i^{dx}}{n}, \quad (3.6)$$

де  $CI_i^{dx}$  – індекс завантаження відрізка  $i$  в час відправлення  $d$  у певний день  $x$ ;  $T_i^{dx}$  та  $F_i^{dx}$  – відповідно тривалість пересування отримана за результатами дослідження та тривалість пересування за вільного руху для відрізка  $i$  в час відправлення  $d$  у певний день  $x$ ;  $CI^{dx}$  – середньомережевий рівень завантаження;  $n$  – кількість відрізків.

На рис. 3.15 просторово візуалізовано коефіцієнт варіації тривалості пересування ( $CoV$ ) як метрику тривалості пересування для кожного відрізка мережі за весь досліджуваний період (ранковий час відправлення).

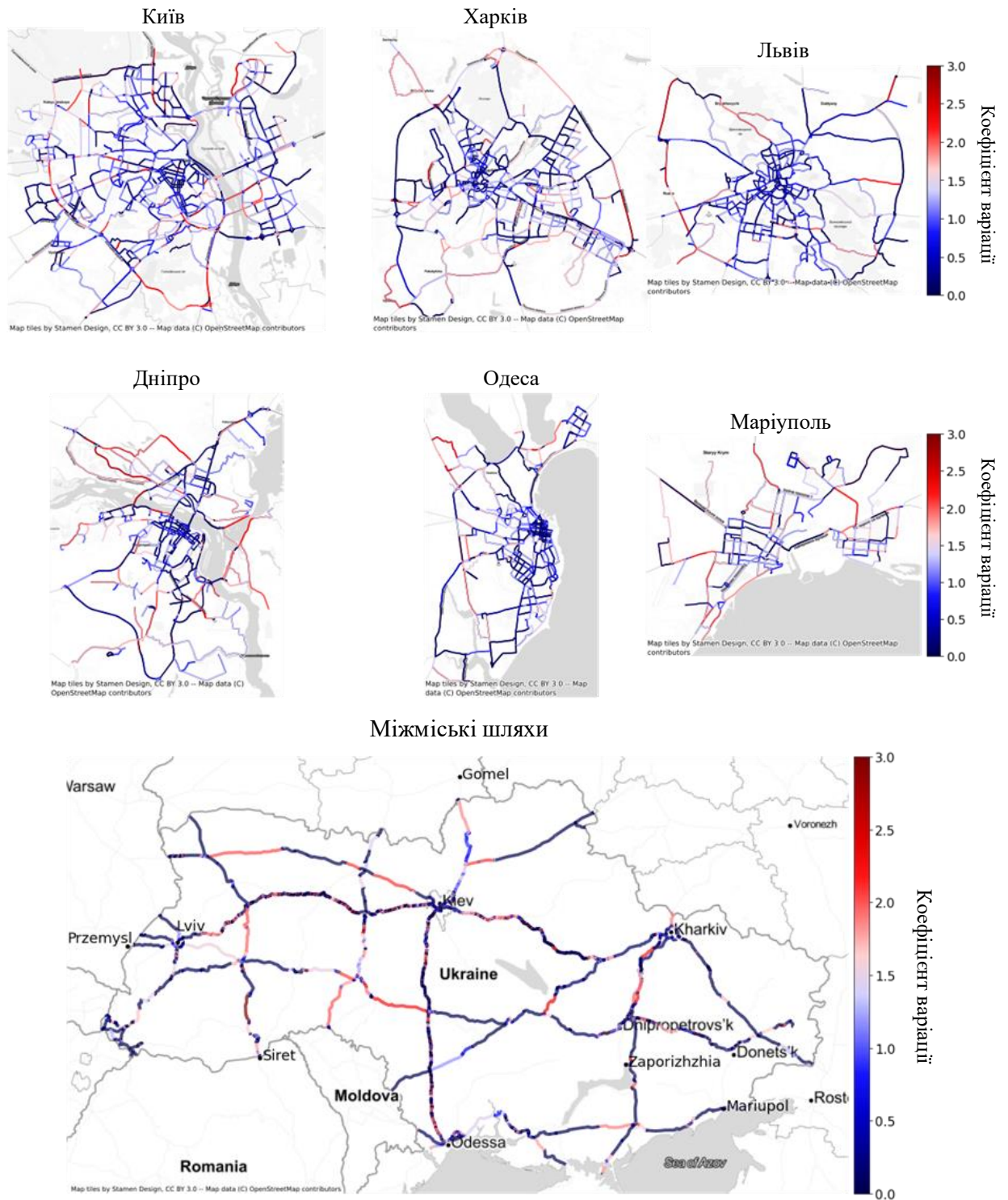


Рис. 3.15. Теплові карти коефіцієнта варіації тривалості пересування за відрізками для всього періоду дослідження



Отриманий показник масштабується за допомогою шкали відтінків, яка варіюється від темно-синього, що відображає нижчу варіабельність, до темно-червоного, що відображає вищу варіабельність. Аналізуючи рис. 3.15, можна помітити, що для всіх міст зв'язок у зовнішніх районах міста демонструє значно вищу варіабельність, ніж у внутрішніх (або в центрі міста). Отримані закономірності можна інтерпретувати так: оскільки внутрішні райони міста є густонаселеними, мають високу частку регулярних поїздок на роботу, вони можуть спричинити менші, але постійні затори на дорогах. Для порівняння, більша мінливість і перебої у зовнішніх районах зумовлені такими чинниками, як нерегулярне блокування/доступність доріг і нерегулярні схеми колективної міграції у/з міст, що постраждали від воєнних дій.

Щодо окремих міст, то Київ, Харків та Маріуполь зазнали спроб окупації з перших днів повномасштабної війни, і вплив цього видно на рис. 3.15, де карти відтінків усіх трьох міст демонструють загалом вищу варіабельність тривалості пересування порівняно з іншими містами (від більш світлого синього тону до червоного). Серед них, Маріуполь, який найбільше постраждав від російського вторгнення та був окупований протягом періоду дослідження, демонструє найвищу варіабельність, тоді як Київ, демонструє найменшу варіабельність тривалості пересування всередині міста, а Харків – вищу у північному, південному та південно-східному районах, які містять радіальні зв'язки, що з'єднують місто з РФ та окупованими територіями.

Інші три міста, Львів, Дніпро та Одеса, демонструють схожу картину, де більшість регіонів мають найменшу варіабельність тривалості пересування, тоді як деякі – дуже високу. Оскільки Дніпро разом із Запоріжжям були містами, куди прибували евакуаційні машини з окупованих територій, майже всі радіальні зв'язки для доступу до міста мають високу варіабельність тривалості пересування, а Львів, як місто, що найменше постраждало від російських атак, демонструє найменшу. Для Львова, незважаючи на те, що він виступав логістичним і гуманітарним центром, куди постійно прибували мільйони людей з усієї країни, східні міські відрізки ВДМ демонструють

досить помірну варіабельність тривалості пересування порівняно з Дніпром, тоді як західні відрізки – дуже високу.

Вплив воєнних подій на особливості транспортної поведінки для всієї мережі міжміських шляхів України є досить очевидними (див. рис. 3.15). Усі міграційні маршрути, включно із західною мережею автошляхів, яка з'єднує Львів з ЄС, а також шляхами до Молдови, демонструють значно більшу варіабельність тривалості пересування. Аналогічно, маршрут з Дніпра до Харкова також характеризується високою варіабельністю, оскільки це місто є одним із пунктів призначення евакуаційних ТЗ. Крім того, дороги, що ведуть до Києва з півночі та північного заходу, і дорога до Харкова з півночі, перебували під російською окупацією під час дослідження і також демонструють високу варіабельність. У той час як магістраль, що з'єднує Київ із заходом України, була заблокована російськими військами і міст на шляху був підірваний. Аналогічно, інші під'їзні шляхи до Києва та Харкова також демонструють поєднання високої та низької варіабельності тривалості пересування (може бути пов'язано із блокуванням, зруйнованими мостами, обмеженою доступністю даних тощо), що відображає різний характер заторів на дорогах.

Другий етап дослідження полягав у зборі часових рядів даних про дорожній рух в українських містах та їх подальше перетворення в моделі розподілу дорожнього руху, які використовуються для генерування часових показників попиту та завантаження. Набори даних часових рядів цих показників використовуються для аналізу значних порушень у зв'язку з війною та їхнього подальшого впливу на пересування.

Для цього було розроблено більш детальну базу воєнних подій (Додаток В) а також розширено часовий діапазон збору даних про дорожній рух – з 25 лютого по 15 травня (за винятком періоду з 17 по 24 березня) 2022 року для ранкового часу відправлень о 9 годині ранку. Тут теж використовувалися дані про тривалість пересування з джерела всеохопних даних «TomTom» для двох міст України – Київ і Львів.

Як і у попередній методиці дослідження, для моделювання завантаження мережі використано метрику індексу завантаження для кожного відрізка мережі (рівняння (3.5)).

Аналогічно для вимірювання доступності в усіх регіонах мережі використовуються індекси завантаження зон відправлення та призначення на рівні транспортних зон.

Індекс завантаження зони відправлення вимірює можливість доступу з неї до решти мережі, тоді як індекс завантаження зони призначення вимірює її доступність для решти мережі. Індекси завантаження відрізків зон відправлення ( $O CI_i^{dt}$ ) та призначення ( $D CI_i^{dt}$ ) розраховуються так:

$$O CI_i^{dt} = \sum_{z \in Z} \frac{T_{iz}^{dt}}{F_{iz}}, \quad (3.5)$$

$$D CI_i^{dt} = \sum_{z \in Z} \frac{T_{zi}^{dt}}{F_{zi}}, \quad (3.6)$$

де  $T_{iz}^{dt}$  – тривалість пересування від транспортної зони  $i$  до  $z$  у час відправлення  $t$  та день  $d$ ;  $F_{iz}$  – тривалість пересування за вільного руху від транспортної зони  $i$  до  $z$  у час відправлення  $t$  та день  $d$ ;  $Z$  – множина всіх зон;  $T_{zi}^{dt}$  – тривалість пересування від транспортної зони  $z$  до  $i$  у час відправлення  $t$  та день  $d$ ;  $F_{zi}$  – тривалість пересування за вільного руху від транспортної зони  $z$  до  $i$  у час відправлення  $t$  та день  $d$ .

Описані методики застосовано для подальшого аналізу мережевих схем пересування та для визначення впливу просторово-часових порушень на пересування.

### 3.5. Висновки з розділу

1. Для дослідження обрано ВДМ шести міст України із різними

особливостями розташування та їх роллю в умовах повномасштабної війни, а також мережу автошляхів України.

2. Результати опитування щодо транспортної поведінки населення під час початкової фази повномасштабного вторгнення продемонстрували, що більше 50% мешканців України евакуювалися із своїх місць проживання протягом першого тижня після 24 лютого 2022 року. Основним напрямком міграції були західні області держави та країни ЄС.

3. Події гуманітарних конфліктів розділено на дві основні групи: точкові та просторові.

4. Статистичний аналіз надійності даних TomTom продемонстрував достатню якість початкових даних для проведення дослідження.

5. Коефіцієнт варіації тривалості пересування відрізками ВДМ є вищим для тих міст, які зазнали безпосередніх спроб окупації російськими військами – Київ, Харків та Маріуполь. Загалом для мереж всіх міст, коефіцієнт варіації є вищим для периферійних відрізків ВДМ.

## РОЗДІЛ 4

ЗАКОНОМІРНОСТІ ЗМІНИ ІНДЕКСУ ЗАВАНТАЖЕННЯ НА ВІДРІЗКАХ  
ВУЛИЧНО-ДОРОЖНЬОЇ МЕРЕЖІ, ВИЗНАЧЕНІ НА ОСНОВІ ТРИВАЛОСТІ  
ПЕРЕСУВАННЯ В УМОВАХ ГУМАНІТАРНОГО КОНФЛІКТУ

4.1. Аналіз та моделювання мережевих схем пересування під час повномасштабного вторгнення в Україну на основі краудсорсингових всеохопних даних про дорожній рух

Проведено часовий аналіз впливу воєнних подій в Україні з використанням показників варіабельності тривалості пересування та індексу завантаження мережі. На рис. 4.1 показана часова варіація тривалості пересування з використанням середнього (по мережі) значення 7-денного ковзного коефіцієнта варіації тривалості пересування (рівняння (3.4)) для тривалості пересування відрізком для трьох періодів відправлення: ранковий, вечірній та цілоденний. Цей показник допомагає зрозуміти ковзну часову варіабельність невизначеності тривалості пересування протягом тижневого періоду. На рис. 4.2 зображено 7-денні ковзні усереднені мережеві індекси завантаження маршрутів (рівняння (3.6)). Для зручнішої інтерпретації тенденцій, на графіках також позначено номери ключових подій, що відбулися в кожному місті протягом досліджуваного періоду (таблиця 3.1).

Далі проаналізовано отримані результати для кожного з міст.

**Київ.** У Києві спостерігаються дві помітні тенденції у варіабельності тривалості пересування (рис. 4.1): перша – після подій 3 (26 – 28 лютого) та 7 (15 – 17 березня), які позначають безперервну комендантську годину спостерігається чітке збільшення варіабельності тривалості пересування; друге – два періоди часу демонструють чітку (спадаючу) тенденцію до зменшення та рівномірності у структурі заторів, один між 1 та 14 березня, коли зафіксовано дещо меншу інтенсивність обстрілів міста та після деокупації Київської області (2 квітня) (тенденція до зниження варіабельності тривалості

пересування вранці та впродовж дня). Аналогічно, єдина помітна тенденція, яку можна побачити на рис. 4.2, пов'язана з подією 9 (2 квітня – деокупація Київської області), коли ранковий індекс завантаження постійно зменшується до вихідних (тобто до найспокійнішого ранку за весь досліджуваний період).

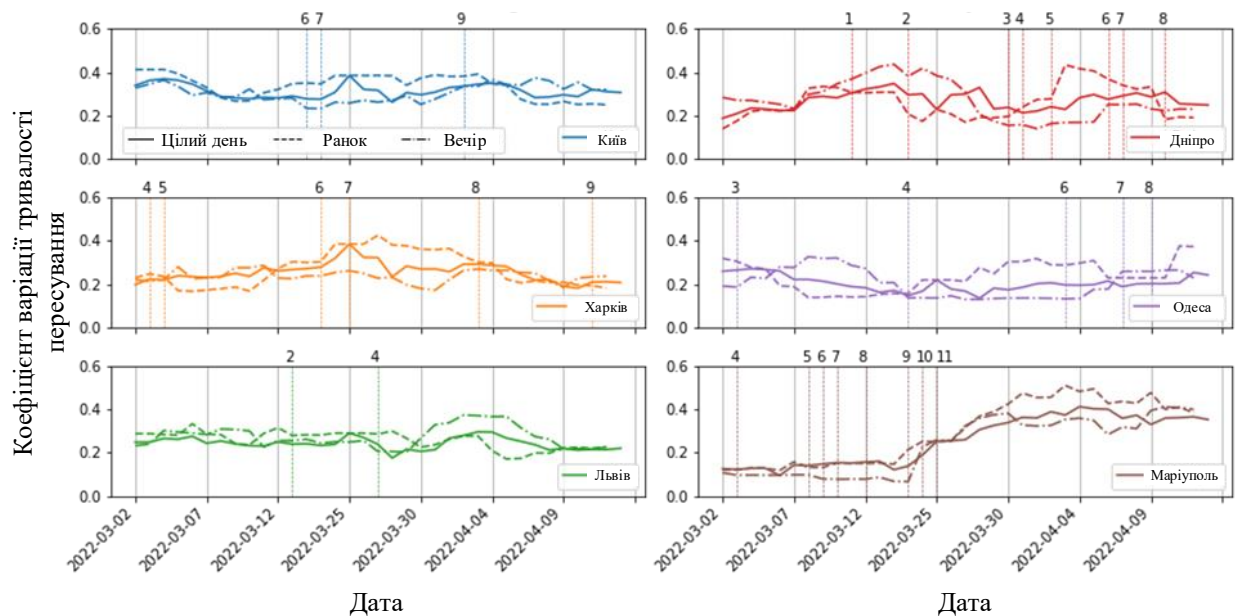


Рис. 4.1. Усереднений по мережі коефіцієнт варіації тривалості пересування (7-денний ковзний)

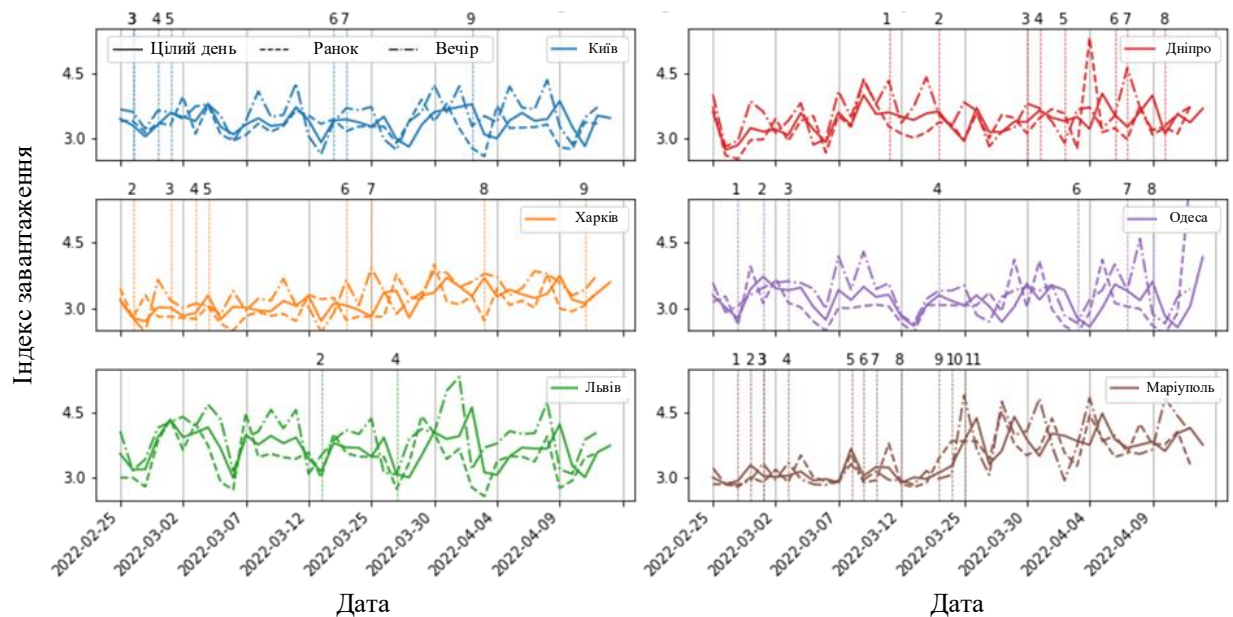


Рис. 4.2. Усереднений індекс завантаження мережі

**Харків.** Незважаючи на те, що в таблиці 3.1 згадано лише кілька ключових воєнних подій для Харкова, він постійно зазнавав нападів з боку РФ

і демонстрував незначну, але постійну тенденцію до зростання варіабельності тривалості пересування (див. рис. 4.1) до події 7 (численні напади російських військ, що призвели до 28 жертв серед цивільного населення). Однак після події 7, хоча ранкова варіабельність тривалості пересування залишається досить високою, в цілому варіабельність тривалості пересування демонструє безперервну тенденцію до зниження, що може вказувати на звикання населення.

**Львів.** Оскільки Львів розташований на заході України, віддалено від РФ та окупованих територій, у ньому спостерігалось набагато менше серйозних подій, і він демонструє стабільну варіабельність тривалості пересування, за винятком одного періоду між 26 березня і 10 квітня (див. рис. 4.1). У цей період як варіабельність тривалості пересування, так і індекс завантаження демонструють вищі тенденції у вечірній та цілоденний час. Ці тенденції можна пояснити подією 4 (два великих ракетних обстріли Львова), що відбулися 26 березня, після якої спостерігається більша невизначеність у тривалості пересування та індексі завантаження, та деокупацією півночі України, що спричинило повернення людей із заходу України та з-за кордону, багато з яких прямували через Львів.

**Маріуполь.** Маріуполь був однією з головних окупаційних цілей РФ для створення сухопутного коридору до тимчасово окупованої АР Крим, тому протягом першого тижня місто було практично оточене. Ситуація дещо змінилася з відкриттям «зеленого коридору» для евакуації (подія 9, з 15 по 18 березня), під час якої в місті різко зросла варіабельність тривалості пересування та індексу завантаження. Крім того, окупаційні бої продовжуються з 23 по 28 березня (подія 12), зберігаючи аналогічні тенденції до зростання обох показників. Важливо також зазначити, що вже 17 березня (подія 11) половина міста перебувала під російською окупацією, яка до 28 березня (кінець події 12) збільшилася майже до цілого міста. Таким чином, тенденції до збільшення варіабельності тривалості пересування та індексу завантаження після 28 березня відбулися в умовах російської окупації.

**Дніпро.** Окрім того, що Дніпро постійно зазнає обстрілів, він також став центром евакуації та прихистком для тисяч переміщених внаслідок війни осіб (місто розташоване неподалік від Харкова та Маріуполя). Значна частина варіабельності як у тривалості пересування, так і в рівнях завантаження доріг може бути пов'язана із загальним перебігом бойових дій. Загалом, кожен з двох періодів збору даних демонструє помітні піки варіабельності тривалості пересування, тобто з 2 по 16 березня та з 27 березня по 12 квітня (див. рис. 4.1). Тенденції мінливості протягом першого пікового періоду можна пояснити військовими подіями в Києві, Харкові та Маріуполі, де вечірній час постійно демонструє високі значення обох метрик. Аналогічно тенденції варіабельності під час другого пікового періоду є значущими переважно для ранкового часу і можуть бути пов'язані з подіями 3 – 5, тобто регулярними ракетними обстрілами в Дніпрі в період з 30 березня по 2 квітня. Слід зазначити, що ці часові рамки також збігаються з періодом деокупації Київської області.

**Одеса.** В Одесі спостерігається кілька помітних тенденцій щодо змін у тривалості пересування та рівнях завантаження відрізків мережі. По-перше, обидва показники стрімко зростають після комендантської години з 9 по 11 квітня, особливо різко підвищується рівень завантаження в ранковий час. Пізніше, до 15 березня, коли коливання тривалості пересування заспокоюється, серія атак з боку РФ 15 і 16 березня (подія 5) знову спричиняє його зростання. Аналогічно на рис. 4.2 показано три різні набори піків рівня завантаження у ранкові та вечірні години, деякі з яких можуть бути пов'язані з атаками 3 і 7 квітня (події 6 і 7), які, схоже, викликають різке зростання індексу на наступний день.

Загалом, можна зробити висновок, що аналіз демонструє чіткий вплив і взаємозв'язок воєнних подій на варіабельність тривалості пересування та індекс завантаження для всіх міст. Наприклад, міста Київ та Маріуполь демонструють прямий вплив російського вторгнення та подій окупації / деокупації, тоді як міста Харків, Дніпро та Одеса також демонструють значні зміни в структурі витрат часу на пересування після російських атак. Крім того,



у багатьох містах (Київ, Харків, Дніпро та Одеса) також спостерігається тенденція до повернення спокою та регулярності в структурі заторів після різких змін, спричинених російськими нападами.

Для оцінки матриць кореспонденцій, зональної структури та пропозиції мережі використовувався інструмент Rapidex, принцип роботи якого детально описаний у Розділі 2. Зокрема, було здійснено оцінку таблиць пересувань, використовуючи дані тривалості пересування, зібраних за допомогою TomTom у три різні дні. Ці три дні відповідають: початку вторгнення (ситуація I), проміжному моменту або критичній події (ситуація II) та останньому дню досліджуваного періоду (ситуація III). Дослідження обмежене трьома містами (Київ, Харків і Маріуполь) і трьома конкретними датами через необхідність використання значних ресурсів для обрахунків.

Спочатку було визначено конфігурацію зонування мережі, включаючи кількість зон і центроїдів. Пізніше методологія використовує тривалість пересування відрізками і застосовує метод генетичного алгоритму для отримання матриць кореспонденцій. Ці матриці надалі використовуються як початкові дані для моделювання мережі, з метою оцінювання ключових показників, такі як тривалість пересування, довжина поїздки та індекс завантаження. У таблиці 4.1 показано відсоткові зміни ключових показників порівняно з базовим днем, тобто 28 лютого 2022 року, для кожного з міст.

*Таблиця 4.1*

**Аналіз оцінювання кореспонденцій на основі  
ключових статистичних даних**

<b>Місто</b>	<b>Дата</b>	<b>Зміна середньої довжини поїздки порівняно з базовим сценарієм, %</b>	<b>Зміна середньої тривалості пересування порівняно з базовим сценарієм, %</b>	<b>Зміна загального попиту порівняно з базовим сценарієм, %</b>
1	2	3	4	5
Київ	28 лютого 2022	–	–	–
	16 березня 2022	-5,52	-0,28	+3,90

Продовження табл. 4.1

1	2	3	4	5
	12 квітня 2022	+2,74	+1,92	+0,11
Харків	28 лютого 2022	–	–	–
	31 березня 2022	-3,14	+1,55	+6,05
	12 квітня 2022	+3,40	+11,79	+2,63
Маріуполь	28 лютого 2022	–	–	–
	16 березня 2022	+13,11	+28,44	-2,50
	12 квітня 2022	-6,76	-11,66	+0,58

Для подальшого аналізу моделей транспортної поведінки під час вторгнення в Україну взято усереднені індекси завантаження по зонах та показники формування попиту для трьох міст – Києва, Харкова та Маріуполя. На рис. 4.3 просторово візуалізовано зональний індекс завантаження зон призначення для вивчення імпедансу зони («притягання») або доступності, а на рис. 4.4 просторово зображено відсоток зонального генерування для вивчення патернів внеску у загальний попит.

**Київ.** До ситуації I Київ зазнав серії авіаударів і ракетних обстрілів, комендантської години, переведення київського метро в режим укриття, а також російської військової окупації на північному заході від міста. Однак для ситуації I обидві метрики на рис. 4.3 та рис. 4.4 здебільшого відповідають нормі, з високими рівнями в густонаселеному центральному районі міста і низькими рівнями майже у всіх зовнішніх районах. Більшість тенденцій зберігається і для Ситуацій II та III. Однак, з обох графіків видно дві помітні тенденції. По-перше, різке зростання індексу завантаження і кількості поїздок

спостерігається в західній частині міста у ситуації II, що свідчить про наближення російських військових, які на той час окупували приміські райони на північному заході і заході від Києва, що спричинило міграцію людей у бік Києва і зростання індексу завантаження на заході міста.

Пізніше, до ситуації III, ця тенденція змінюється на протилежну, що пов'язано з деокупацією півночі держави. Тоді ж простежується й інша особливість – стабільно вищий рівень заторів у південно-західній частині міста, ймовірно, пов'язаний з тим, що ця мережа слугує міграційним маршрутом, оскільки дві основні магістралі, що з'єднують Київ із заходом України, були окуповані РФ, до того ж одну з них було неможливо використовувати через руйнування мосту.

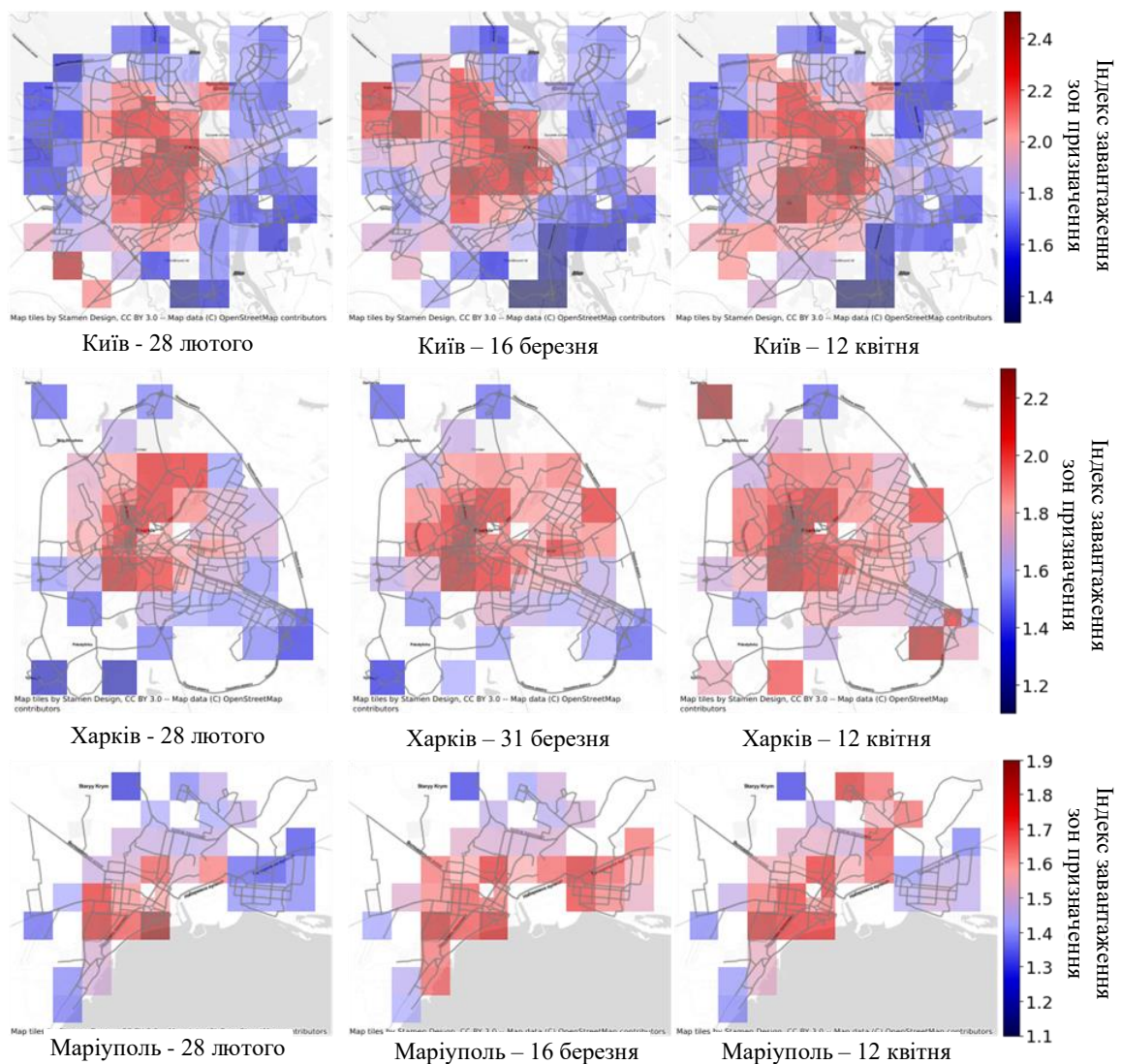


Рис. 4.3. Теплові карти середнього індексу завантаження для зон призначення

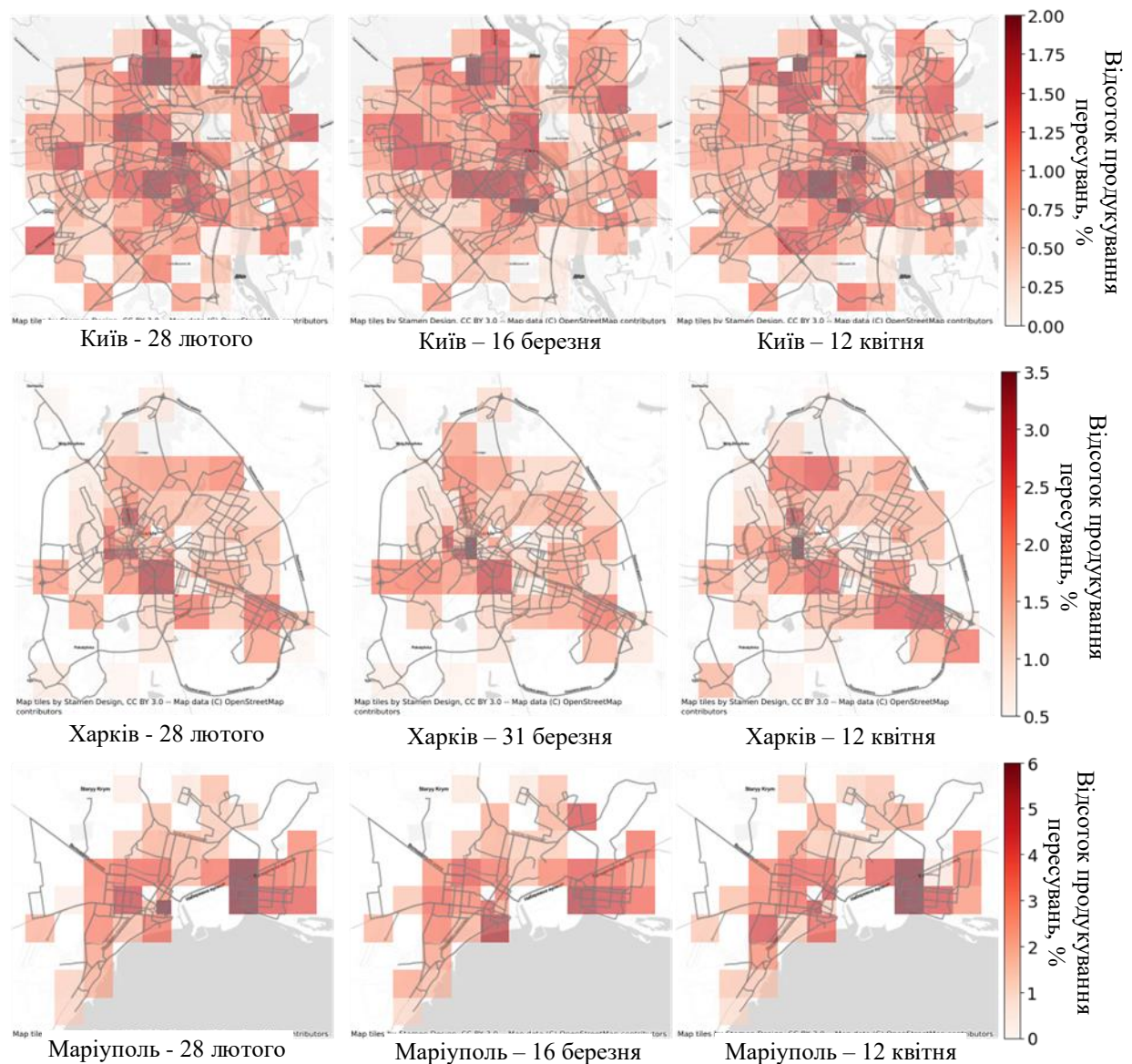


Рис. 4.4. Теплові карти відсоткових часток зон відправлення

**Київ.** До ситуації I Київ зазнав серії авіаударів і ракетних обстрілів, комендантської години, переведення київського метро в режим укриття, а також російської військової окупації на північному заході від міста. Однак для ситуації I обидві метрики на рис. 4.3 та рис. 4.4 здебільшого відповідають нормі, з високими рівнями в густонаселеному центральному районі міста і низькими рівнями майже у всіх зовнішніх районах. Більшість тенденцій зберігається і для Ситуацій II та III. Однак, з обох графіків видно дві помітні тенденції. По-перше, різке зростання індексу завантаження і кількості поїздок спостерігається в західній частині міста у ситуації II, що свідчить про наближення російських військових, які на той час окупували приміські райони

на північному заході і заході від Києва, що спричинило міграцію людей у бік Києва і зростання індексу завантаження на заході міста.

Пізніше, до ситуації III, ця тенденція змінюється на протилежну, що пов'язано з деокупацією півночі держави. Тоді ж простежується й інша особливість – стабільно вищий рівень заторів у південно-західній частині міста, ймовірно, пов'язаний з тим, що ця мережа слугує міграційним маршрутом, оскільки дві основні магістралі, що з'єднують Київ із заходом України, були окуповані РФ, до того ж одну з них було неможливо використовувати через руйнування мосту.

**Харків.** Як і Київ, до ситуації I Харків вже зазнав численних атак з боку російських військових, включаючи десятки артилерійських обстрілів і навіть російські танки, що увійшли до міста (події 1-2). Однак жоден з районів Харкова не потрапив під російську окупацію протягом усього досліджуваного періоду. Тому, за винятком східних, південно-східних і північно-західних районів міста, закономірності для індексу перевантаженості зон і пунктів призначення досить послідовні, тобто високі рівні в густонаселеному центральному районі міста і відносно нижчі рівні у віддалених районах міста. Східна частина міста, Салтівка, зазнала постійних масових обстрілів з боку РФ і, очевидно, зазнала розподіленого зростання рівня завантаження, яке, що цікаво, також не спричинило збільшення обсягів генерування в цьому регіоні. Подібна тенденція спостерігається і в північно-західній приміській зоні – Дергачах, де також можна помітити різке зростання індексу завантаження лише на картах у ситуації III без збільшення продукування пересувань. Ця динаміка також є наслідком постійних обстрілів російськими військами Дергачів у період з 9 по 11 квітня. Нарешті, південно-східний (Промисловий) район Харкова, який також зазнав інтенсивного обстрілу російськими танками та артилерією 10 квітня, також демонструє подібні тенденції до зростання рівня завантаження.

**Маріуполь.** Маріуполь адміністративно поділяється на чотири райони: «Кальміуський» (північна частина міста), «Лівобережний» (лівобережна або

південно-східна частина міста), «Приморський» (південно-західна частина міста з морським портом) та «Центральний» (центральна частина міста на середньому заході). Ситуація I була за день до початку блокади Маріуполя РФ. На той час графіки показують близькі до звичайних патерни поїздок, тобто центральна частина міста та район порту мають вищий індекс завантаження пунктів призначення, а центральна частина міста, район порту та західна частина лівобережного регіону мають високі показники генерування.

Крім того, у ситуації II розпочався другий день триденного періоду дії зеленого евакуаційного коридору, призначеного для того, щоб дозволити громадянам евакуюватися з міста. Однак, що стосується індексу завантаження, то в західному та південно-західному районах міста спостерігається лише незначне зростання, тоді як у північному районі міста цей показник не змінився. Ці райони, також можна вважати евакуаційними шляхами, при чому північний – в напрямку окупованих територій із 2014 року. Крім цього, відбулась подія 10, вплив якої помітний, оскільки значення індексу завантаження демонструють активність, значно вищу в лівобережній частині міста. Що стосується показників генерування кореспонденцій, то вони значно знижуються в центральній частині міста (або взагалі відсутні), дещо підвищуються поблизу порту і залишаються такими ж, але значно розподіленими в лівобережній та північно-східній частинах міста.

До ситуації III більша частина Маріуполя опинилася під російською окупацією, і рівні індексу завантаження зон призначення знову повернулися до нижчого рівня для лівого берега, такого ж для центральної частини міста і значно вищого для північної частини міста.

#### 4.2. Вплив просторово-часових відхилень на пересування у сценаріях гуманітарного конфлікту

Згідно методики, описаної у Розділі 3, далі визначено просторово-часові відхилення у показниках дорожнього руху та ВДМ для двох міст України –

Київ і Львів. Під відхиленням розуміється особливий (нетиповий) стан показника, що значно відхиляється від загального ряду значень.

Першим кроком у визначенні відхилень у зонах є фільтрування повторювальних тенденцій та пошук викидів використовуючи статистичні методи. На рис. 4.5 – 4.6 подано приклади етапів фільтрування для індексу завантаження зон призначення та сумарного пробігу ТЗ (англ. VKT – Vehicle-Kilometers Traveled) у зоні для міста Києва.

Початковими даними є усереднений показник індексу завантаження зон призначення (рис. 4.5, *a*) та сумарний пробіг ТЗ у зоні – авто-км (рис. 4.6, *a*). На цих рисунках чітко видно повторювальні тижневі тенденції, які доводять, що навіть в умовах війни певна частка трудових (постійних) кореспонденцій зберігається.

З метою пошуку значних відхилень із цих даних використано метод аналізу викидів (тобто видалення всіх даних в межах  $\mu \pm 2\sigma$ , де  $\mu$  – середнє значення, а  $\sigma$  – стандартне відхилення), щоб зберегти викиди, які відображають збої. Дані також нормалізовано шляхом віднімання середнього значення ( $\mu$ ) кожної ознаки та ділення на стандартне відхилення ( $\sigma$ ). Таким чином, кожна ознака має середнє значення 0 і стандартне відхилення 1. Це дозволяє покращити збіжність даних. [131]. Крім того, додаткове фільтрування проведено для ряду індексу завантаження – відкинуто всі значення, які є меншими від 0,5, тобто збережено ті показники, що перевищують середнє значення хоча б на 50% (рис. 4.5, *b*, 4.6, *b*).

Аналогічні розрахунки проведено для індексу завантаження зон відправлення для міста Києва (рис. 4.7) та усіх зазначених показників для міста Львова (рис. 4.8).

Відфільтровані дані часових рядів використовуються далі, щоб пов'язати і кількісно оцінити вплив усіх відхилень, виявлених у досліджуваному періоді.

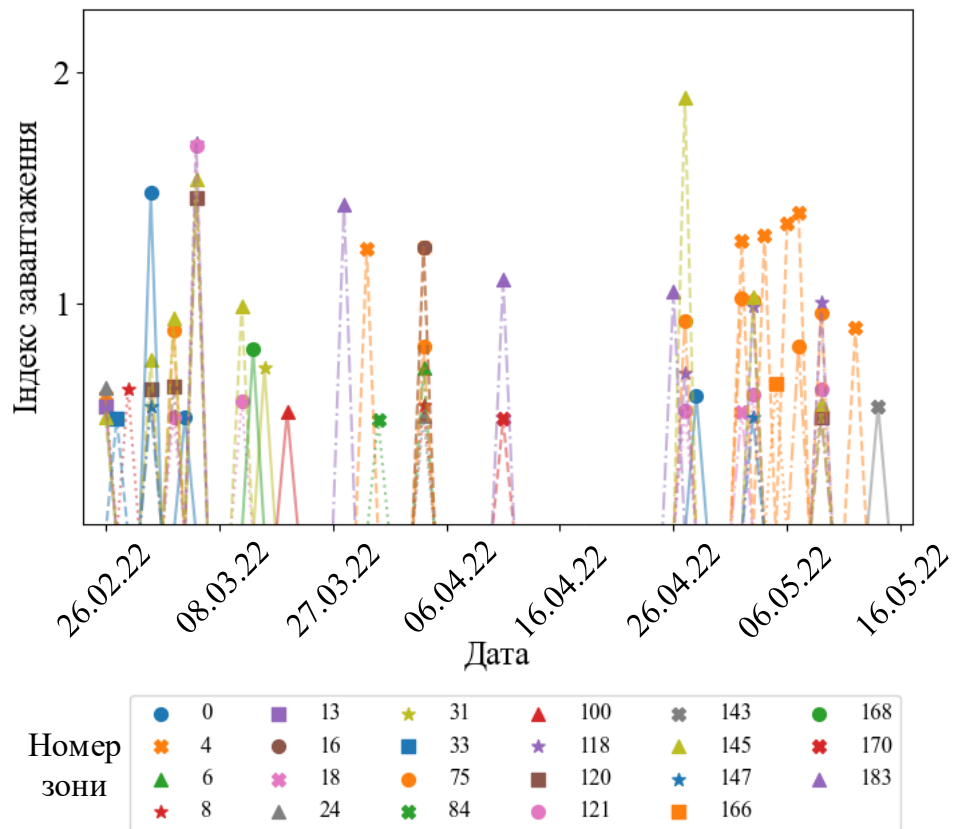
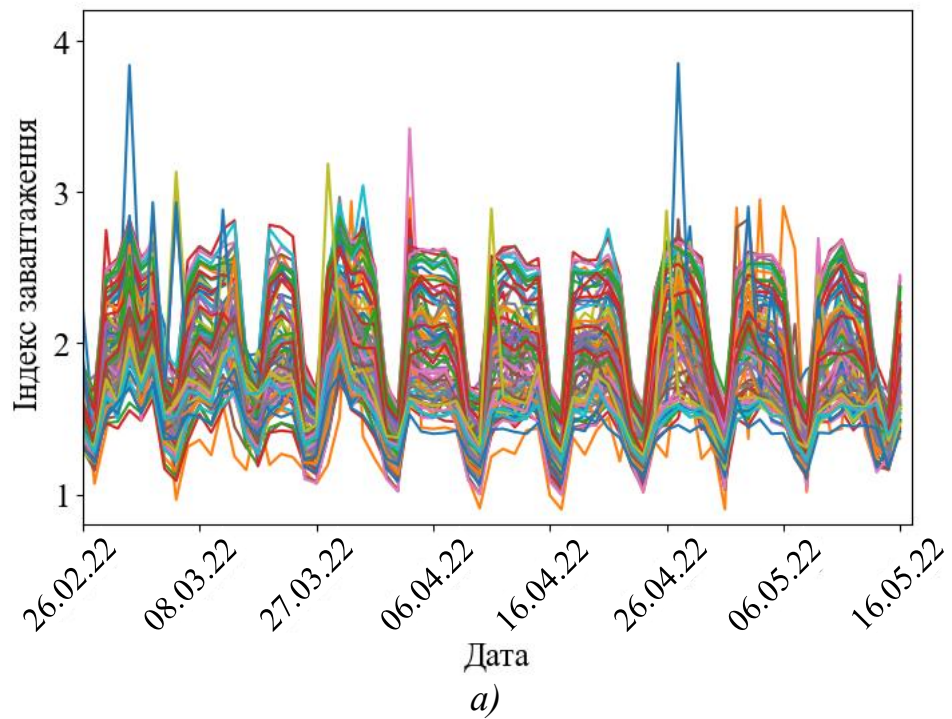
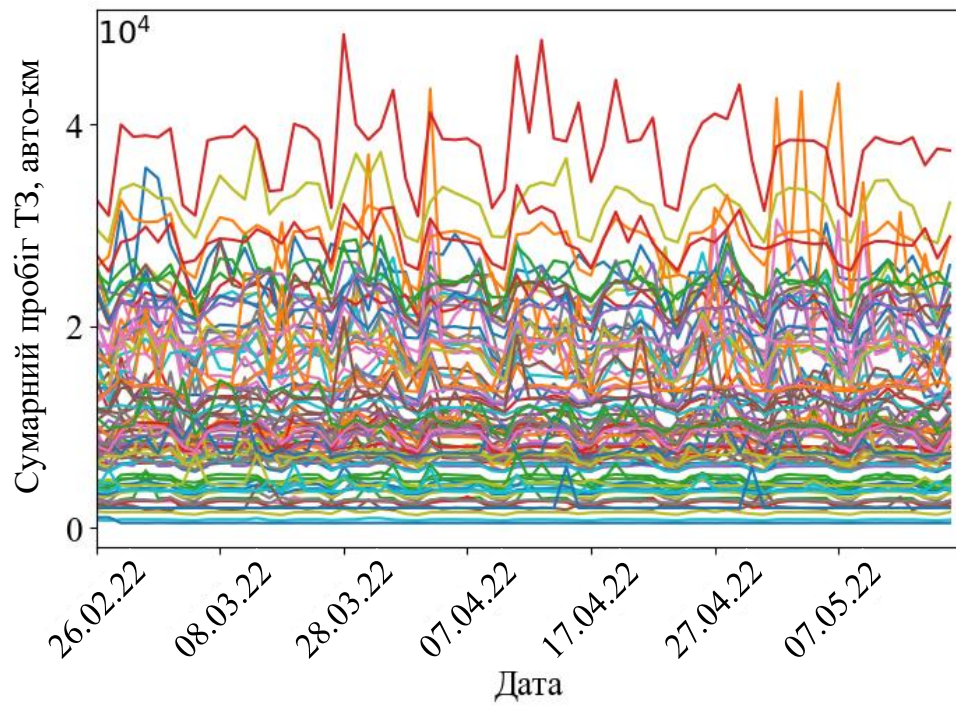
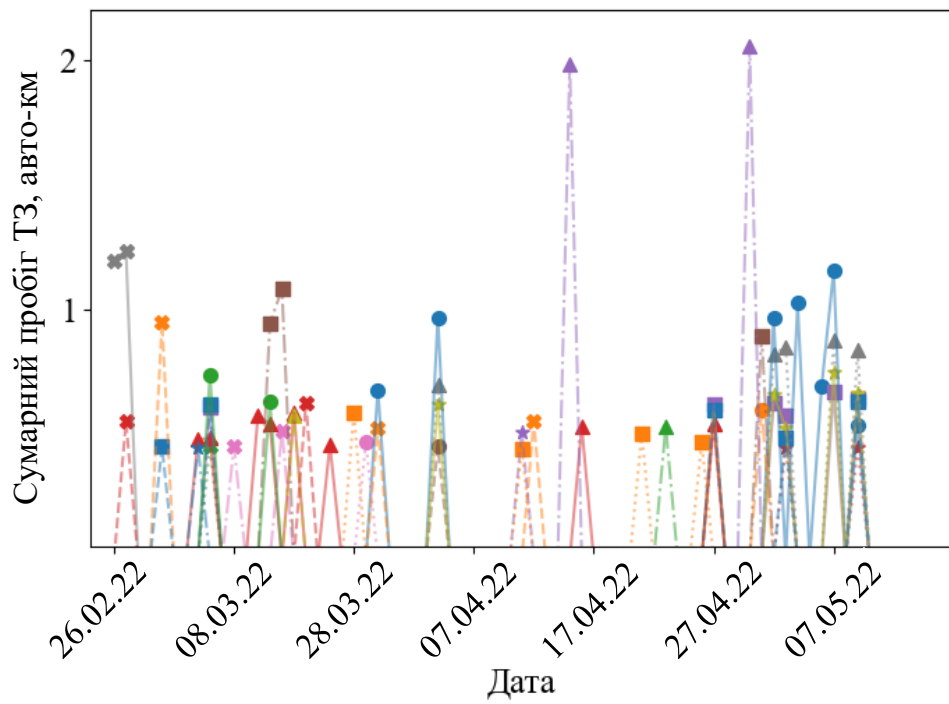


Рис. 4.5. Приклад фільтрування часового ряду по зонах для індексу завантаження зон призначення для міста Києва: а) зональний індекс завантаження зон призначення; б) зони з відхиленнями за індексом завантаження зон призначення





а)



Номер зони	
● 4	■ 38
★ 6	● 57
▲ 13	■ 73
★ 36	▲ 75
★ 118	★ 121
★ 121	★ 139
★ 139	★ 145
▲ 147	★ 149
★ 149	★ 160
★ 166	★ 176
★ 168	★ 183
★ 170	★ 185
▲ 187	

б)

Рис. 4.6. Приклад фільтрування часового ряду по зонах для сумарного пробігу ТЗ у зоні для міста Києва: а) зональний рівень сумарного пробігу ТЗ; б) зони з відхиленнями за показником сумарного пробігу ТЗ

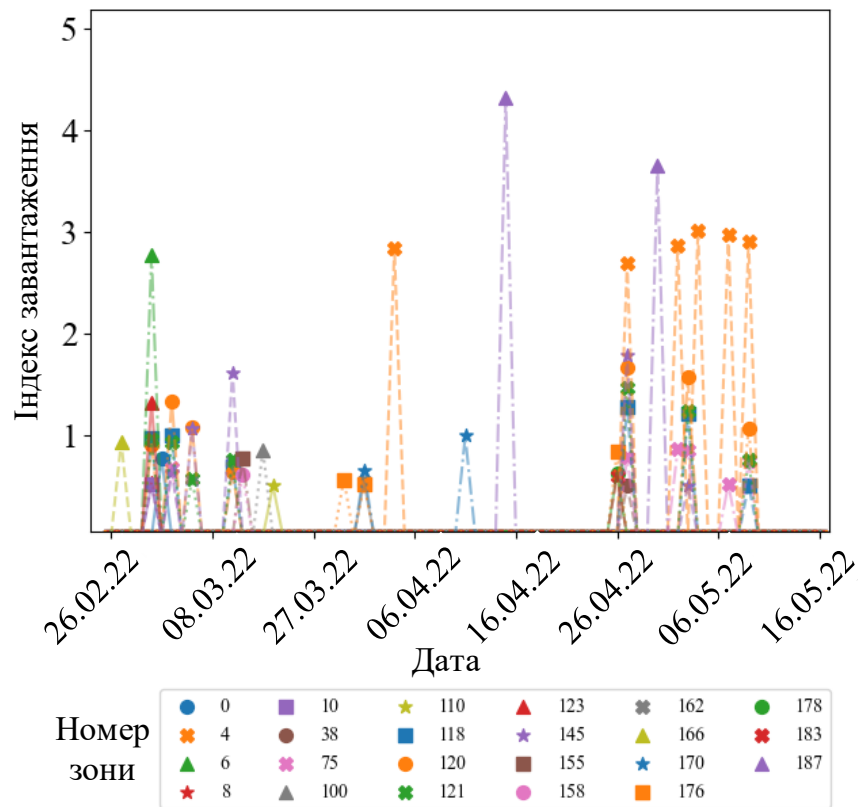


Рис. 4.7. Зони з відхиленнями за індексом завантаження зон відправлення для міста Києва

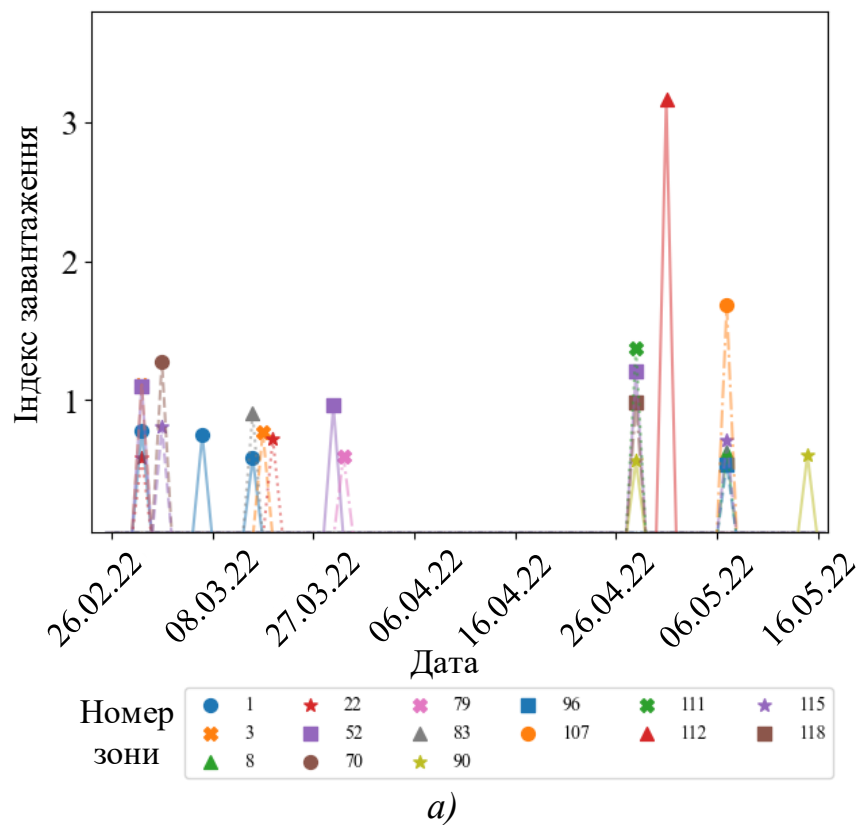
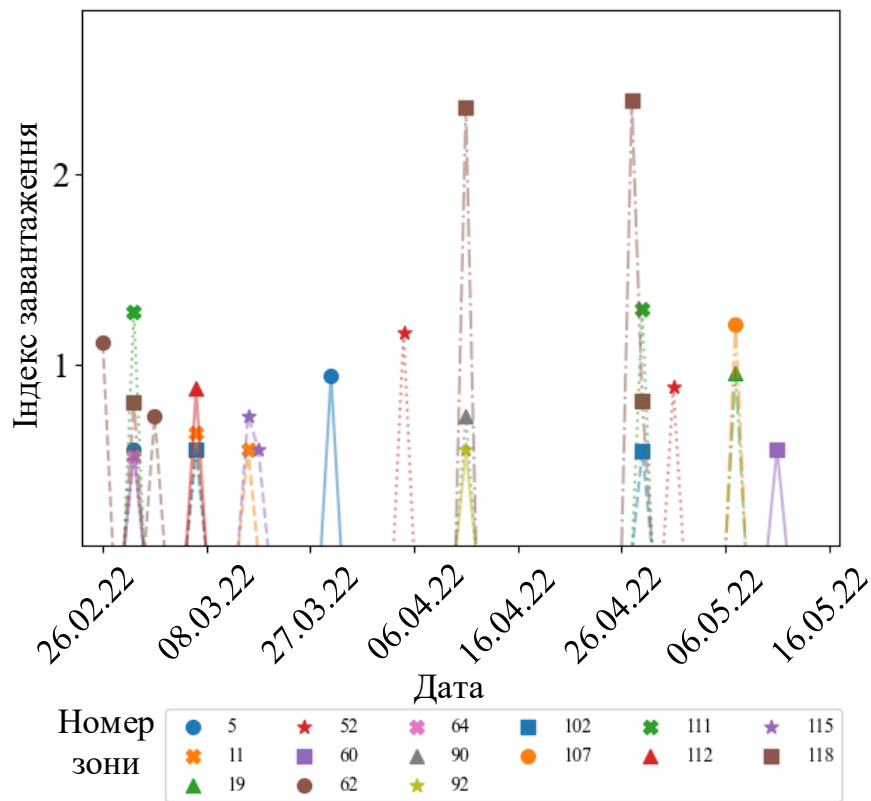
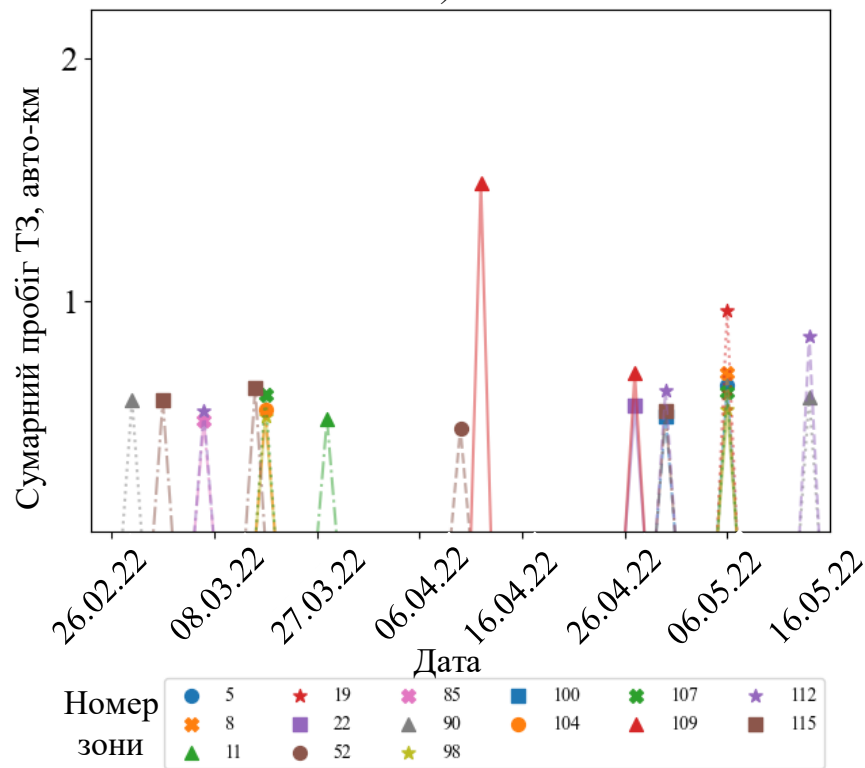


Рис. 4.8. Результати фільтрування часового ряду по зонах для міста Львова: а) зони з відхиленнями за індексом завантаження зон призначення; б) зони з відхиленнями за індексом завантаження зон відправлення; в) зони з відхиленнями за показником сумарного пробігу ТЗ



б)



в)

Продовження рис. 4.9

Наступним кроком виявлення зон із найбільшим відхиленням у містах було проведено просторово-часовий аналіз. На рис. 4.9 – 4.10, а, б представлено просторові схеми для двох міст з розподілом за відповідними

межами транспортних зон. Інтенсивність кольору кожної зони відображає кількість відхилень, що сталися для комбінованого індексу завантаження зон призначення та відправлення протягом досліджуваного періоду (рис. 4.9 – 4.10, а). За умови виникнення в зоні більше 5 відхилень, їй надається найінтенсивніший колір. Варто зауважити, що ми розглядаємо як відхилення у відфільтрованих даних часових рядів лише збільшення рівня завантаження понад 50%. Аналогічно, рис. 4.9 – 4.10, б відповідають кількості відхилень у зонах за зміною рівня транспортної роботи всередині зони. На рис. 4.9 – 4.10, в представлено схеми для середнього значення індексу завантаження в умовах відхилення для всіх відрізків мережі. Інтенсивність кольору відображає середнє значення п'яти випадків із найбільшими відхиленнями для кожного відрізка за період дослідження. Ці рисунки відображають відрізки із найбільшими відхиленнями та їх відповідний рівень. Об'єднавши визначені зони із рис. 4.9 – 4.10, а, б визначено райони із найбільшими відхиленнями у кожному місті (позначені кольором на рис. 4.9 – 4.10, в):

- Київ: Північно-Західний (Пн-Зх), Північно-Східний (Пн-Сх), Південно-Західний (Пд-Зх), Південний (Пд);
- Львів: Північно-Західний (Пн-Зх), Північно-Східний (Пн-Сх), Південний (Пд).

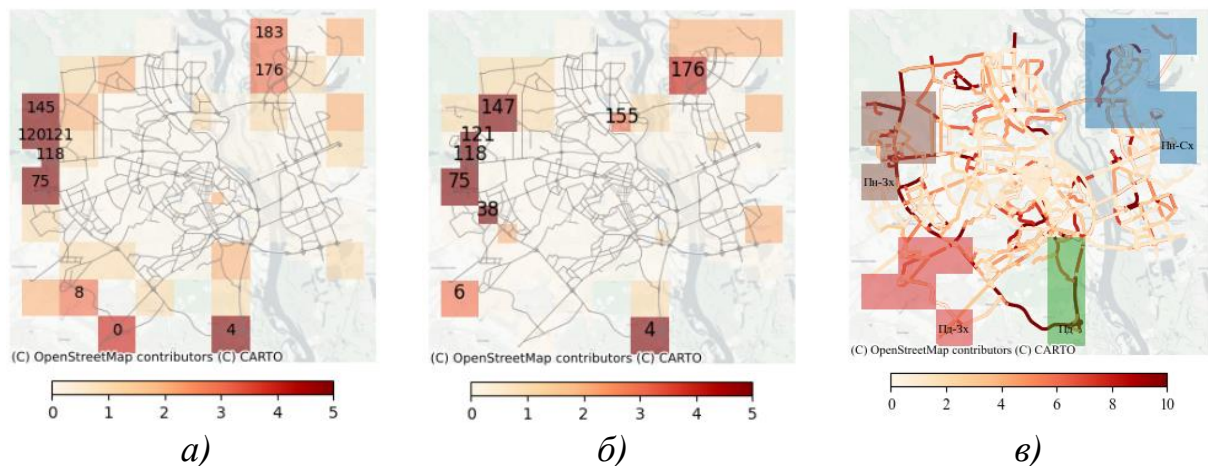
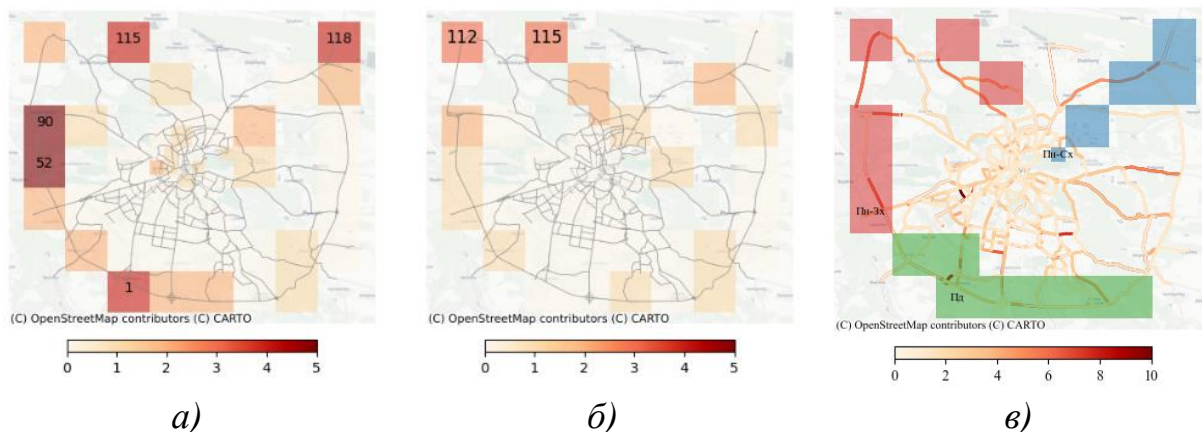


Рис. 4.10. Просторові схеми зон та відрізків із найбільшими відхиленнями у місті Київ: а) кількість відхилень за індексом завантаження у зоні; б) кількість відхилень за сумарним пробігом ТЗ у зоні; в) індекс завантаження по відрізках та визначені райони із найбільшими відхиленнями



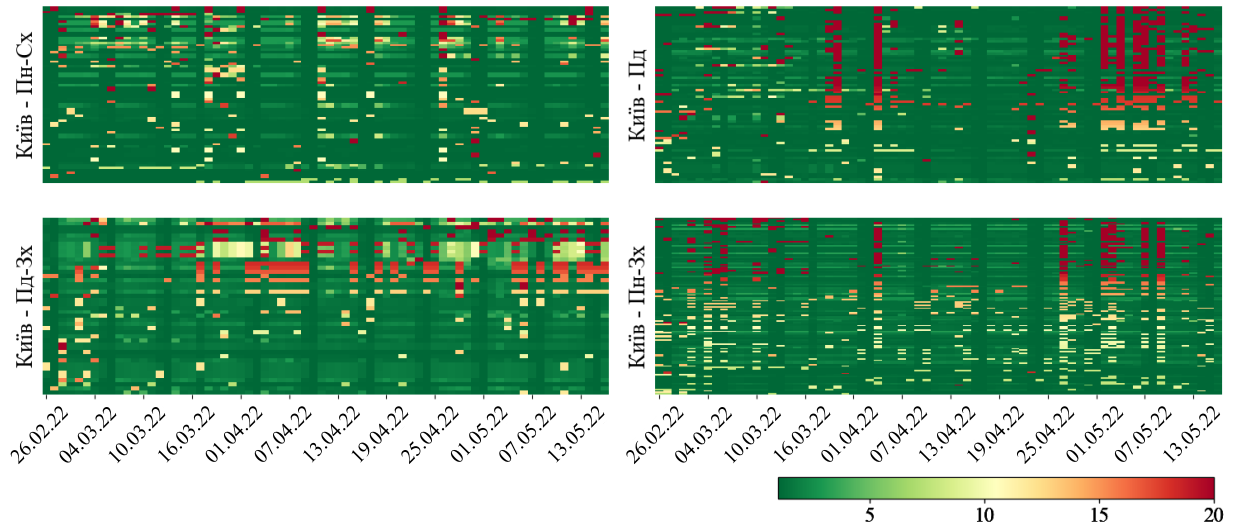
*Рис. 4.11. Просторові схеми зон та відрізків із найбільшими відхиленнями у місті Львів: а) кількість відхилень за індексом завантаження у зоні; б) кількість відхилень за сумарним пробігом ТЗ у зоні; в) індекс завантаження по відрізках та визначені райони із найбільшими відхиленнями*

Загалом, з останніх рисунків очевидно, що відхилення зазвичай відбувалися на околицях міст і на об'їзних дорогах, що, ймовірно, пов'язано з міграцією та окупаційними подіями. Ще однією причиною затримок на виїзних дорогах можуть бути військові блокпости, де учасників руху зупиняли для перевірки. Не було виявлено переконливих доказів відхилень у зв'язку з критичними подіями, такими як обстріли, можливо, тому, що висновки залежать від спостережуваності даних TomTom у досліджуваних районах і часових періодах.

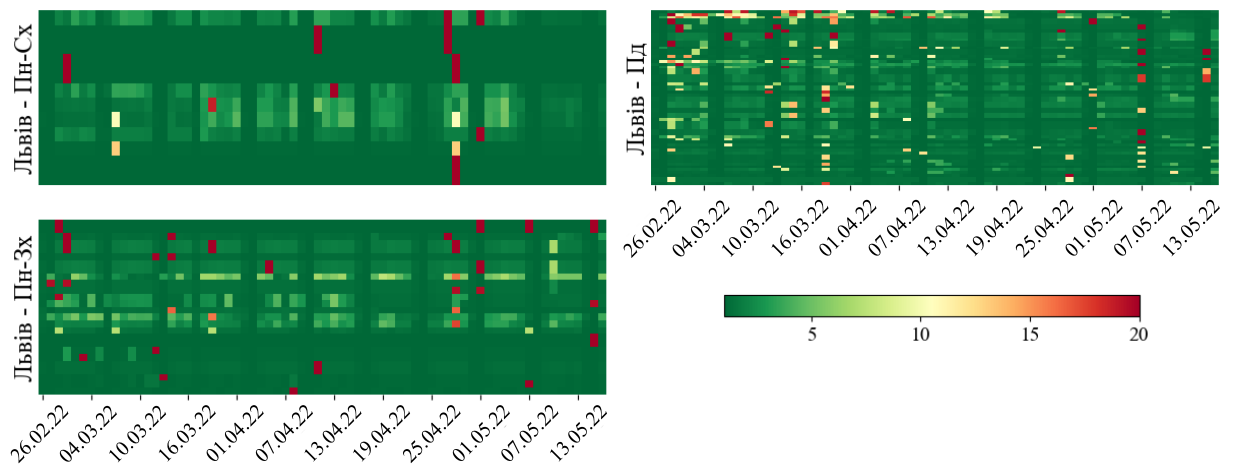
Подані схеми обох міст демонструють райони із високим рівнем відхилень, але вони дають лише їх просторовий огляд під час війни. Тому було проаналізовано залежність відхилень від часу шляхом побудови часових рядів даних відрізків мережі окремо для кожного визначеного району. На рис. 4.11 – 4.12 зображено теплові графіки часових рядів, де показано індекс завантаження відрізків мережі, розташованих у кожному районі, де спостерігалися відхилення.

З рис. 4.11 – 4.12 видно, що показники відповідають загальним тенденціям, описаним вище для обох міст. Наприклад, високі покази індексу завантаження на початку березня пов'язані з терміною евакуацією з міст окремо та з усієї країни в цілому. Наприкінці березня – на початку квітня люди почали повертатися до своїх домів у зв'язку з деокупацією півночі України.

Наступна фаза в'їзної міграції, що припадає на 26-28 квітня, також помітна і може бути пов'язана із періодом після Великодня. Третя міграційна хвиля для обох міст спостерігається між 2 та 9 травня.



*Рис. 4.12. Часові теплові графіки індексу завантаження відрізків мережі у місті Київ*



*Рис. 4.13. Часові теплові графіки індексу завантаження відрізків мережі у місті Львів*

Далі виконується співвідношення особливостей відхилень із ймовірними воєнними подіями, що відбуваються протягом певних часових інтервалів. У таблицях 4.2 – 4.3 перелічені ідентифіковані воєнні події, які співвідносяться з відфільтрованими даними про відхилення, включаючи їх типи за кожним районом, перелік часових інтервалів відхилень і конкретні їх причини для кожного часового інтервалу. Показники ВДМ включають: площу

території міста, на яку вплинули відхилення; зміни в доступності та дорожньому русі; вплив на пропускну здатність.

На транспортну доступність можуть впливати дві причини – зміни в інтенсивності руху або в пропускій здатності. Вважається, що міграція під час війни спричиняє зростання інтенсивності руху. Під час окупації або боїв у регіоні припускається, що дорожній рух всередині зони не збільшується, тому в цьому випадку зміни у часі в дорозі спричинені зменшенням пропускну здатності.

**Київ.** Пн-Зх район міста має, мабуть, найбільші відхилення з високою їх інтенсивністю. Вони були пов'язані насамперед зі спробами окупації з боку російських військ, які змогли зайняти околиці цього району (Буча, Гостомель, частково Ірпінь) протягом досліджуваного періоду. Спроби захоплення почалися з початком повномасштабної війни, і до початку березня зазначені міста були окуповані. Далі, з 10 березня, були організовані гуманітарні коридори з Ірпеня до Києва. Пересування в регіоні також було обмежено через руйнування мостів через річку Ірпінь у селах Стоянка та Ірпінь ще наприкінці лютого.

Подібним чином, Пн-Сх район також зазнав значних руйнувань внаслідок спроб окупації з боку РФ. До 8 березня російські війська просунулися до північно-східного кордону міста і зайняли дорогу на Бровари, включаючи села Богданівка і Велика Димерка, оскільки цей маршрут був єдиним шляхом для евакуації з півночі області. Нарешті, Пд і Пд-Зх регіони Києва – це ще два райони, які зазнали серйозних відхилень. Вони активно використовувалися для міграції протягом усього досліджуваного періоду. Маршрути часто складалися з другорядних доріг і використовувалися для в'їзної та виїзної міграції, оскільки основні автомагістралі, що ведуть з Києва на захід України, були значною мірою заблоковані через руйнування мостів, про які йшлося вище.

Основними висновками аналізу ВДМ Києва за районами є такі:

- Пн-Зх район – найбільший вплив спостерігається 2-6 березня на етапі

окупації, коли пропускна здатність знизилася до 65%. Найбільше зростання інтенсивності руху спостерігалось 4 квітня (до 94%), одразу після деокупації району, через місяць після цього 2 – 3 травня та 9 травня – до 104% та 102% відповідно;

- Пд-Зх район зазнав найбільшого впливу на доступність (до 267% для індексу завантаження зон відправлення та до 147% для індексу завантаження зон призначення) на початку березня, оскільки основний шлях з Києва на захід був недоступним через руйнування мосту та окупацію. Інтенсивність руху в ці дні зростала до 99%;

- Пд район – найбільша площа, що зазнала відхилень, спостерігається 26 лютого та 4 квітня – 23 км<sup>2</sup>. Ці дати вказують на основні хвилі евакуації та повернення населення. Вплив на дорожній рух під час етапів міграції на початку квітня та травня зростав до 135%. Вплив на доступність в ці дні для індексу завантаження зон відправлення досягав 301%, що підтверджує причину;

- Пн-Сх район також постраждав від наближення окупації з півночі. Тоді пропускна здатність знизилася на 21%. Найбільше зростання інтенсивності руху (209%) та вплив на доступність (для індексу завантаження зон відправлення до 432%) спостерігається 15 та 26 квітня, що, ймовірно, пов'язано з міграцією до та після Великодня.

Таблиця 4.2

**Вплив воєнних подій на показники ВДМ та дорожній рух у Києві**

Район (тип відхилень)	Дата (-и)	Причина	Площа, км <sup>2</sup>	Вплив на доступність, %	Вплив на дорожній рух, %	Вплив на пропускну здатність, %
1	2	3	4	5	6	7
Київ Пн-Зх (міграція / окупація-бої)	26 лют	М	7	– 50 (D)	12	–
	2-6 бер	ОБ	29 – 31	31 – 132 (O) 32 – 169 (D)	–	0 – -65
	10 кві	ОБ	13	63 – 161 (O) 30 – 98 (D)	–	-3 – -26
	4 кві	М	9	– 48 – 81 (D)	80 – 94	–
	27 кві	М	29	33 – 178 (O) 41 – 189 (D)	9 – 78	–



## Продовження табл. 4.2

1	2	3	4	5	6	7
	2-3 тра	М	9 – 29	33 – 156 (O) 43 – 103 (D)	8 – 104	–
	7 тра	М	7	50 (O) –	98	–
	9 тра	М	21	43 – 105 (D)	8 – 102	–
Київ Пд-Зх (міграція)	2-3 бер	М	15 – 31	33 – 276 (O) 147 – 147 (D)	12 – 99	–
	5 бер	М	7	– 51 (D)	3	–
	4 кві	М	31	– 45 – 124 (D)	-4 – 37	–
	28 кві	М	31	– 32 – 60 (D)	12 – 43	–
	2 тра	М	11	– 30 – 53 (D)	2 – 47	–
Київ Пд (міграція)	26 лют	М	23	– 55 – 63 (D)	9 – 37	–
	30 бер	М	7	– 123 (D)	97	–
	4 кві	М	23	283 – 283 (O) 41 – 124 (D)	31 – 131	–
	27 кві	М	7	269 (O) –	69	–
	2-7 тра	М	7	286 – 301 (O) 126 – 139 (D)	96 – 135	–
	7-9 тра	М	7	290 – 296 (O) –	83 – 135	–
	12 тра	М	7	– 89 (D)	67	–
Київ Пн-Сх (міграція / окупація-бої)	27 лют	ОБ	7	92 (O) –	–	-21
	28 бер	М	7	– 142 (D)	17	–
	30 бер – 1 кві	М	39	30 – 55 (O) –	0 – 42	–
	11 кві	М	7	– 110 (D)	17	–
	15 кві	М	7	432 (O) –	209	–
	26 кві	М	39	36 – 82 105 – 105 (D)	12 – 53	–
	30 кві	М	7	364 (O) –	209	–
	5 тра	М	7	– 65 (D)	3	–
	14 тра	М	66	– 30 – 55 (D)	-8 – 18	–

Примітка. М – міграція, ОБ – наближення окупації та бої.

**Львів.** На початковому етапі повномасштабної війни місто слугувало більше як евакуаційний вузол, що може бути однією з причин того, що міські транспортні зони не демонструють високої частоти порушень.

Північно-західна частина Львова включає шляхи, що ведуть до кордону України з Республікою Польща. Вони слугували основним міграційним маршрутом для біженців. Аналогічно, південні виїзди зі Львова використовувалися для міграції до/із Закарпатської області та кордонів зі Словаччиною та Угорщиною. Однак, територія поруч з селом Гамаліївка є частиною автошляху М-06 до/з Києва. Таким чином, основний рух з/на північ України здійснювався саме цим маршрутом.

Наслідки відхилень у Львові за районами такі:

- Пн-Зх район – через відсутність північної частини об'їзної дороги Львова, потоки із Західних та Північних транспортних зон прямують в одному напрямку – до польського кордону, тому визначено один об'єднаний район. Найбільша площа відхилень спостерігається 7 березня, коли інтенсивність руху зросла на 41%. Але найвище зростання інтенсивності руху спостерігається 1 травня, тоді вплив на доступність для зон призначення становив 316%;

- Пд район – площа зон із відхиленнями у районі є найбільшою на початку повномасштабної війни 1 та 7 березня – 35 км<sup>2</sup> та 48 км<sup>2</sup> відповідно. Вплив на доступність зон відправлення та призначення зберігається на відносно однаковому рівні – між 34 – 110%;

- Пн-Сх район – датою із найбільшими відхиленнями у цьому районі є 28 квітня. Це час після Великодня, що вказує на один з етапів міграції повернення. Площа території з відхиленнями становить 6 – 20 км<sup>2</sup>, зростання інтенсивності руху сягає 134%, а вплив на доступність – 281% та 137% для зон відправлення та призначення відповідно. Ще один високий показник впливу на доступність для зон відправлення спостерігається 11 квітня, але, оскільки, немає жодних змін у впливі на транспортний рух, тому причина не є очевидною.

Таблиця 4.3

## Вплив воєнних подій на показники ВДМ та дорожній рух у Львові

Район (тип відхилень)	Дата (-и)	Причина	Площа, км <sup>2</sup>	Вплив на доступність, %	Вплив на дорожній рух, %
Львів Пн-Зх (міграція)	28 лют – 1 бер	М	6 – 13	50 – 52 (O) 45 – 110 (D)	-3 – 76
	7 бер	М	48	38 – 64 (O) –	1 – 41
	12 – 13 бер	М	6 – 7	73 – 94 (O) –	10 – 69
	14 бер	М	7	– 72 (D)	20
	29 бер	М	13	– 35 – 96 (D)	-5 – 19
	5 кві	М	20	39 – 116 (O) –	-2 – 14
	11 кві	М	13	55 – 72 (O) –	-4 – 15
	28 кві	М	20	– 36 – 120 (D)	2 – 38
	1 тра	М	13	40 – 87 (O) 316 – 316 (D)	18 – 60
	7 тра	М	13	– 70 – 168 (D)	4 – 74
	15 тра	М	6	– 60 (D)	65
Львів Пд (міграція)	1 бер	М	35	55 – 55 (O) 35 – 110 (D)	-16 – 32
	7 бер	М	48	38 – 64 (O) 74 – 74 (D)	1 – 41
	12–13 бер	М	7 – 14	30 – 55 (O) 57 – 77 (D)	7 – 15
	29 бер	М	7	94 (O) –	10
	30 бер	М	7	– 51 (D)	37
	7 тра	М	21	43 – 95 (O) 34 – 62 (D)	-10 – 104
Львів Пн-Сх (міграція)	1 бер	М	13	80 – 127 (O) –	1 – 14
	7 бер	М	6	55 (O) –	10
	12 бер	М	7	– 48 – 90 (D)	-10 – -2
	11 кві	М	6	235 (O) –	-1
	28 кві	М	6 – 20	81 – 238 (O) 35 – 137 (D)	0 – 134

Примітка. М – міграція.

#### 4.3. Формування залежності між показниками індексу завантаження та площею зон із відхиленнями в умовах війни

Із результатів вище можна чіткіше визначити три фази міграції населення України:

- Фаза 1: 26 лютого 2022 р. – 14 березня 2022 р. Ця фаза описує початок повномасштабного вторгнення, евакуацію мешканців у зв'язку із самим фактом великої війни, а також окупації, що наближалась;
- Фаза 2: 28 березня 2022 р. – 11 квітня 2022 р. Цей час характеризується міграцією, пов'язаною із деокупацією північних регіонів України;
- Фаза 3: 26 квітня 2022 р. – 15 травня 2022 р. Приблизно через місяць після деокупації північних регіонів спостерігається чергова фаза міграції, що свідчить про звикання населення до небезпеки і бажання повернення до своїх первинних місць проживання.

Для кожного з описаних періодів для обох міст визначено основні статистичні показники індексу завантаження, які занесено у таблицю 4.4. Верхню межу ряду індексу завантаження для подальшого опрацювання визначено за правилом «трьох сигм», тобто як сума математичного сподівання та потрійного середнього квадратичного відхилення [131].

Таблиця 4.4

#### Основні статистичні характеристики індексу завантаження

Період часу	Статистична характеристика	Київ	Львів
1	2	3	4
Фаза 1	Математичне сподівання, $\mu$	1,01	0,78
	Дисперсія, $D$	0,28	0,06
	Середнє квадратичне відхилення, $\sigma$	0,53	0,25
	$\mu + 3 \cdot \sigma$	<b>2,6</b>	<b>1,53</b>
Фаза 2	Математичне сподівання, $\mu$	1,10	1,04
	Дисперсія, $D$	0,40	0,39

Продовження табл. 4.4

1	2	3	4
Фаза 1	Математичне сподівання, $\mu$	1,01	0,78
	$\mu + 3 \cdot \sigma$	<b>3,0</b>	<b>2,9</b>
Фаза 3	Математичне сподівання, $\mu$	1,48	1,17
	Дисперсія, $D$	0,84	0,58
	Середнє квадратичне відхилення, $\sigma$	0,91	0,76
	$\mu + 3 \cdot \sigma$	<b>4,23</b>	<b>3,45</b>

Далі для кожних фази та міста сформовано матриці залежності площі зон ( $Ar$ ) із відхиленнями із двома предикторами – індекс завантаження ( $CI$ ) та кількість днів від початку визначеної фази ( $d$ ). Приклад такої матриці подано у таблиці 4.5.

Зазначені показники мають такі умови:

$$\begin{aligned}
 0,5 &\leq CI \leq m, \\
 m &= \mu + 3 \cdot \sigma, \\
 1 &\leq d \leq n.
 \end{aligned}
 \tag{4.1}$$

де  $CI$  – індекс завантаження;  $m$  – сума математичного сподівання та потрійного середнього квадратичного відхилення;  $\mu$  – математичне сподівання;  $\sigma$  – середнє квадратичне відхилення;  $n$  – кількість днів у фазі.

Таблиця 4.5

**Приклад матриці залежності площі зон із відхиленнями від рівня індексу завантаження та кількості днів від початку фази**

		Індекс завантаження				
		0,5	0,6	0,7	...	$m$
Кількість днів від початку фази	1	$Ar_{0.5,1}$	$Ar_{0.6,1}$	$Ar_{0.7,1}$	...	$Ar_{m,1}$
	2	$Ar_{0.5,2}$	$Ar_{0.6,2}$	$Ar_{0.7,2}$	...	$Ar_{m,2}$
	3	$Ar_{0.5,3}$	$Ar_{0.6,3}$	$Ar_{0.7,3}$	...	$Ar_{m,3}$
	...	...	...	...	...	...
	$n$	$Ar_{0.5,n}$	$Ar_{0.6,n}$	$Ar_{0.7,n}$	...	$Ar_{m,n}$

Для всіх отриманих матриць побудовано поліноміальні моделі другого порядку ((4.2) – (4.7)). Також графічно відображено початкові дані (рис. 4.13, 4.15, 4.17, 4.19, 4.21, 4.23) та 3D-графіки отриманих моделей (рис. 4.14, 4.16, 4.18, 4.20, 4.22, 4.24).

### Київ, Фаза 1.

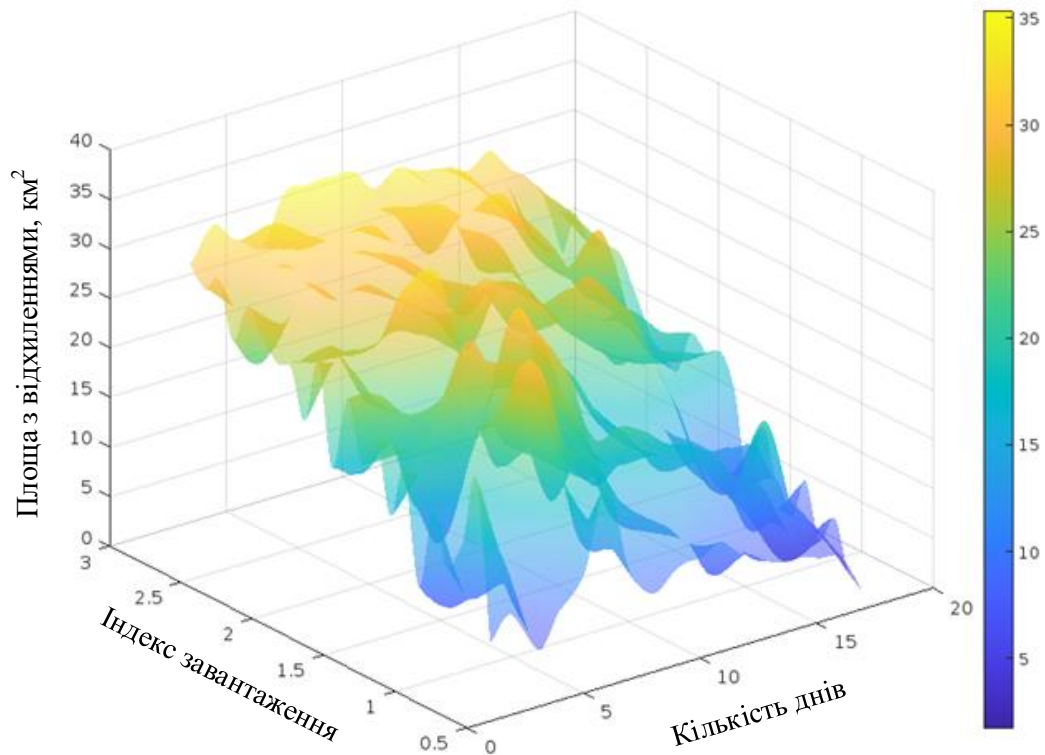


Рис. 4.14. Експериментальна залежність між індексом завантаження, тривалістю фази та площею зон з відхиленнями (Фаза 1, місто Київ)

У зображеній експериментальній залежності значні викиди площі з відхиленнями спостерігаються між 5 та 8 днем фази для індексу завантаження між 0,9 та 1,3, а ближче до кінця фази при індексі завантаження від 0,5 до 1,3 площа із відхиленнями набуває низьких значень.

Модель залежності для Фази 1 міста Києва:

$$F(Ar)_{Київ,1} = 11,5704 \cdot CI - 0,9314 \cdot CI^2 + 0,9778 \cdot d - 0,094 \cdot d^2 + 0,1553 \cdot CI \cdot d + 4,8692, \quad (4.2)$$

$$R^2 = 0.8268$$

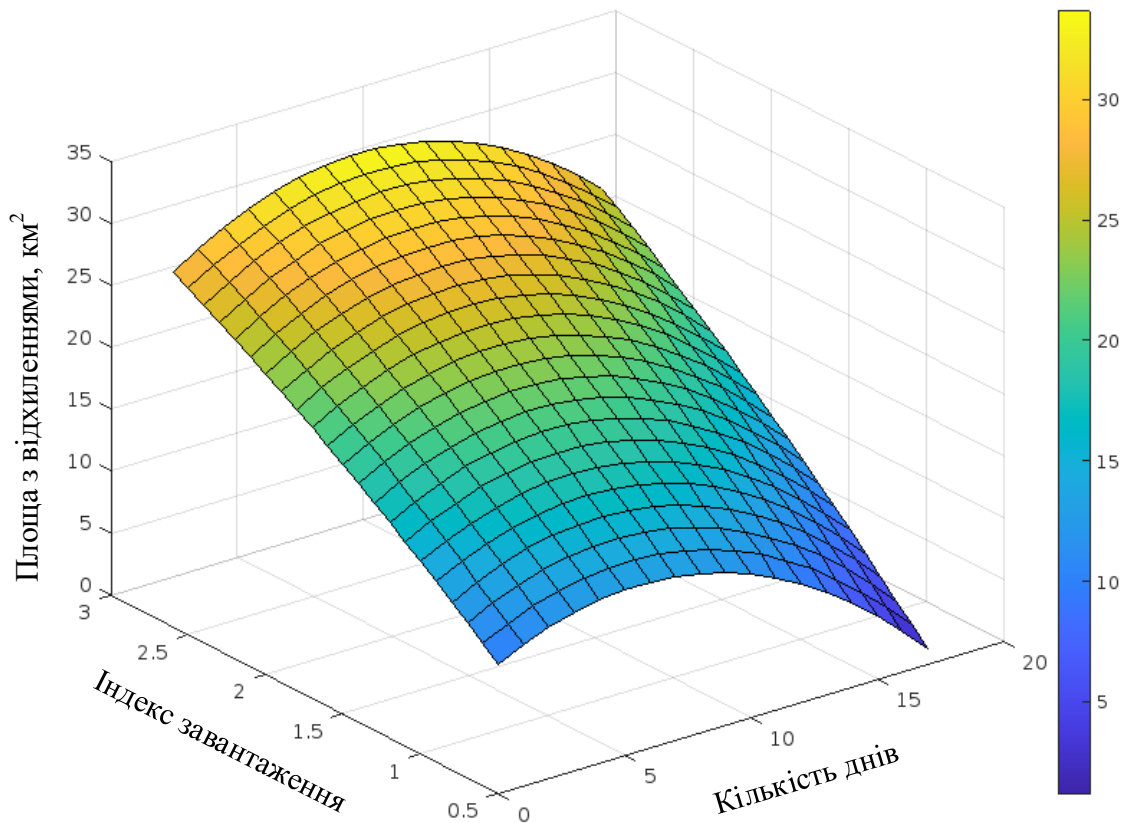


Рис. 4.15. Модель залежності між індексом завантаження, тривалістю фази та площею зон з відхиленнями (Фаза 1, місто Київ)

Модель залежності для цієї фази описується прямо пропорційною зміною площі з відхиленнями із зростанням індексу завантаження. Зміна кількості днів від початку фази відбувається спершу прямо пропорційно, а після шести днів – обернено пропорційно. Максимальна площа з відхиленнями спостерігається після шести днів від початку фази із зростанням на 17% для індексу завантаження 0,5. Для максимального індексу завантаження (2,6) зростання площі з відхиленнями відбувається до семи днів фази (на 13%), а після 13 дня площа з відхиленнями є меншою від початкового рівня.

### Київ, Фаза 2.

У залежності, зображеній на рис. 4.15, спостерігається значний стрибок значення площі з відхиленнями для індексу завантаження 0,5 та тривалості фази 3 та 4 дні. Інші значні відхилення є при зростанні індексу завантаження більше 2.

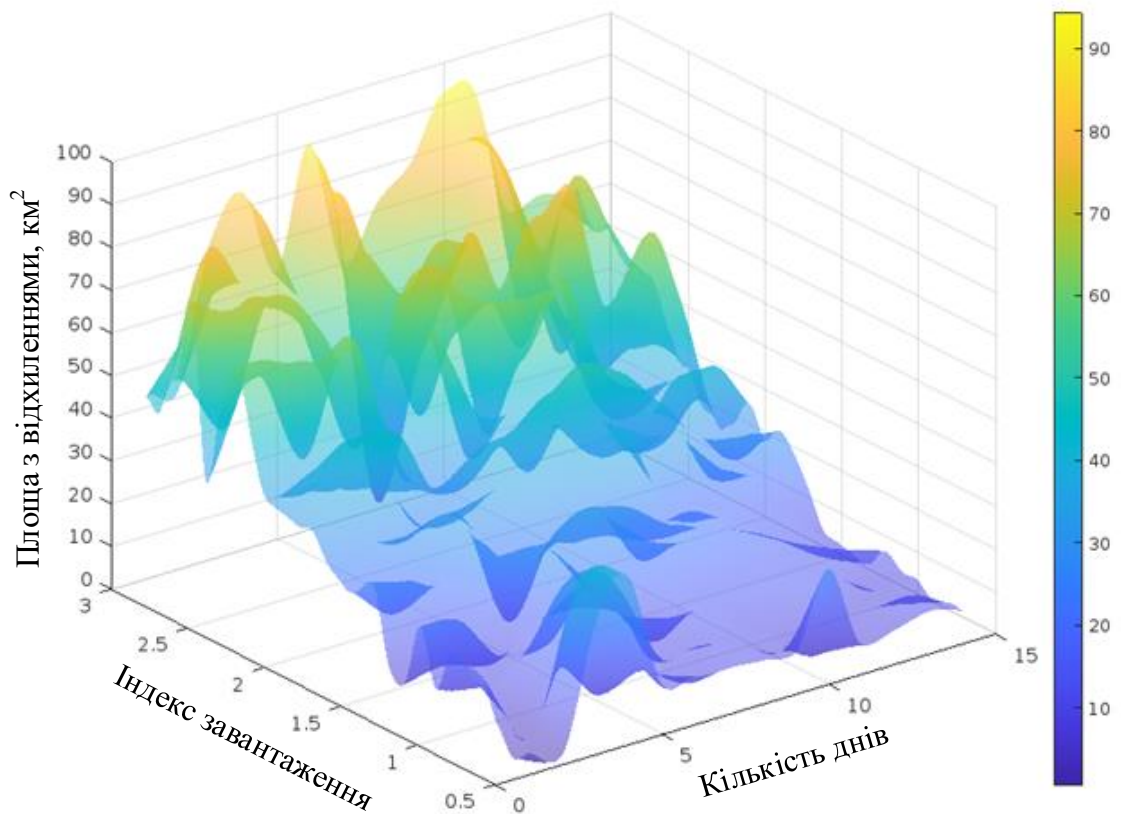


Рис. 4.16. Експериментальна залежність між індексом завантаження, тривалістю фази та площею зон з відхиленнями (Фаза 2, місто Київ)

Модель залежності для Фази 2 міста Києва:

$$\begin{aligned}
 F(Ar)_{\text{Київ},2} = & -1,5239 \cdot CI + 6,7978 \cdot CI^2 + \\
 & + 2,9024 \cdot d - 0,2295 \cdot d^2 + 0,204 \cdot CI \cdot d + 3,7672, \\
 R^2 = & 0.7703
 \end{aligned}
 \tag{4.3}$$

Для моделі Фази 2 у місті Києві (рис. 4.16) також спостерігається пряма залежність між площею з відхиленнями та індексом завантаження, проте вона є досить плавною для значень індексу завантаження між 0,5 та 1,1, а подальша зміна є більш різкою. До середини фази за кількістю днів площа з відхиленнями збільшується, а далі поступово зменшується.



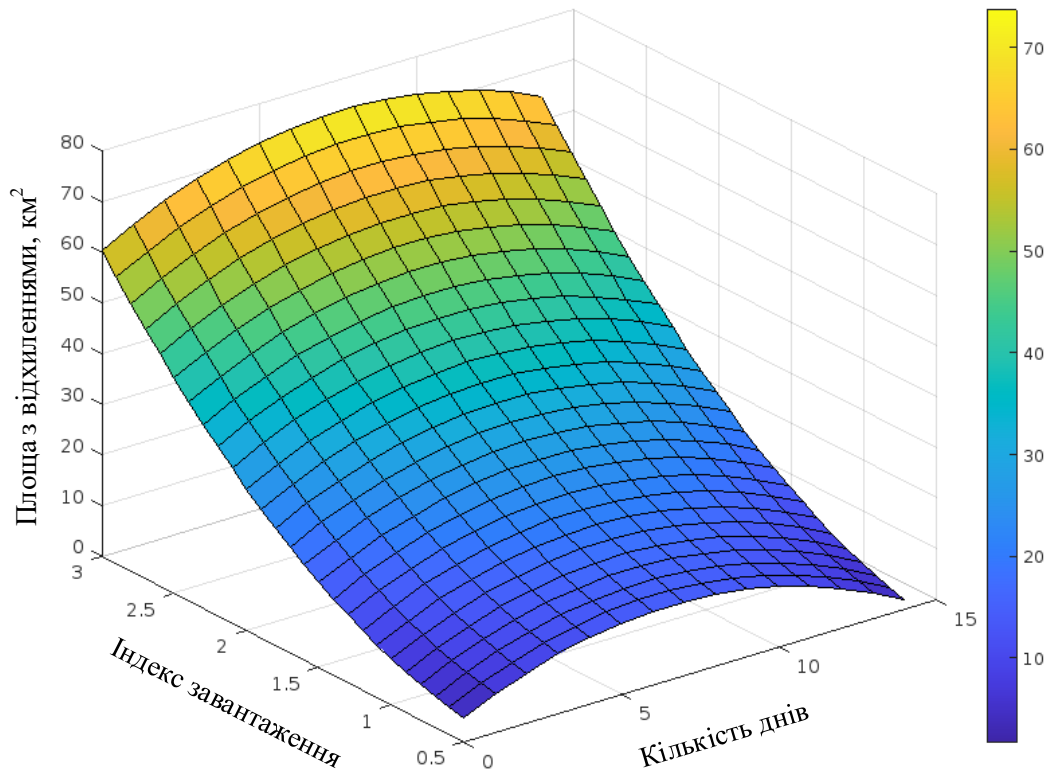


Рис. 4.17. Модель залежності між індексом завантаження, тривалістю фази та площею зон з відхиленнями (Фаза 2, місто Київ)

### Київ, Фаза 3.

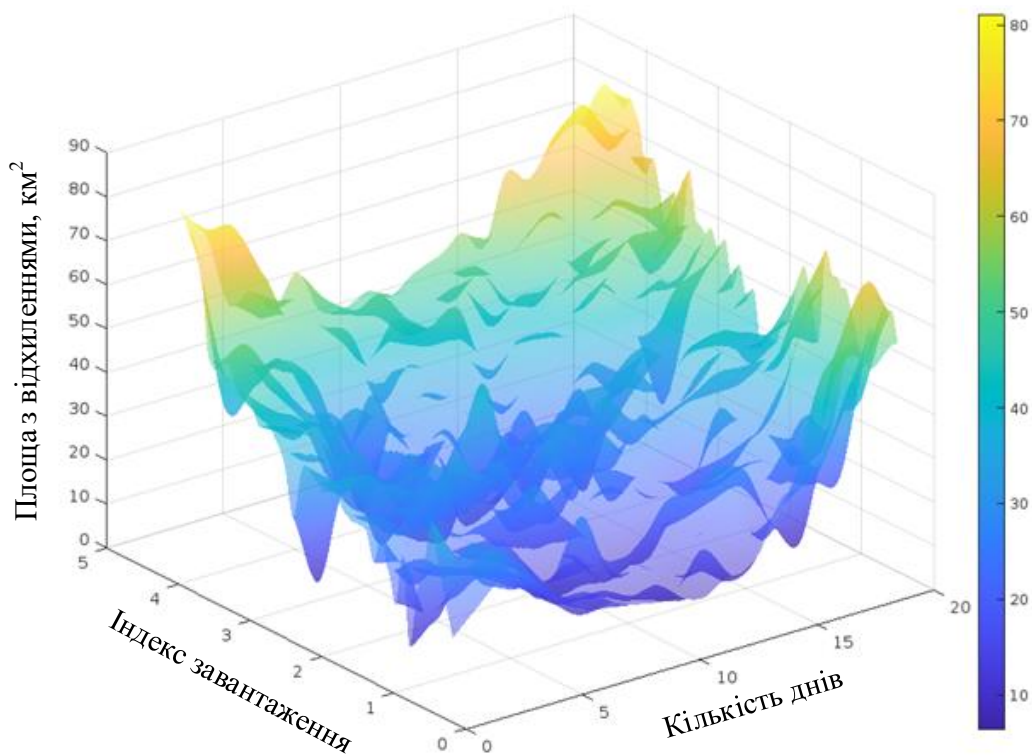


Рис. 4.18. Експериментальна залежність між індексом завантаження, тривалістю фази та площею зон з відхиленнями (Фаза 3, місто Київ)

Експериментальні дані для Фази 3 міста Києва не мають значної кількості викидів, окрім різкого зниження площі з відхиленнями для 1 дня та індексу завантаження 1,1, а також для 2 днів при індексі завантаження 2,7.

Модель залежності для Фази 3 міста Києва:

$$F(Ar)_{\text{Київ,3}} = -7,368 \cdot CI + 3,565 \cdot CI^2 - 4,1285 \cdot d + 0,2465d^2 - 0,1202 \cdot CI \cdot d + 35,4445, \quad (4.4)$$

$$R^2 = 0.7979$$

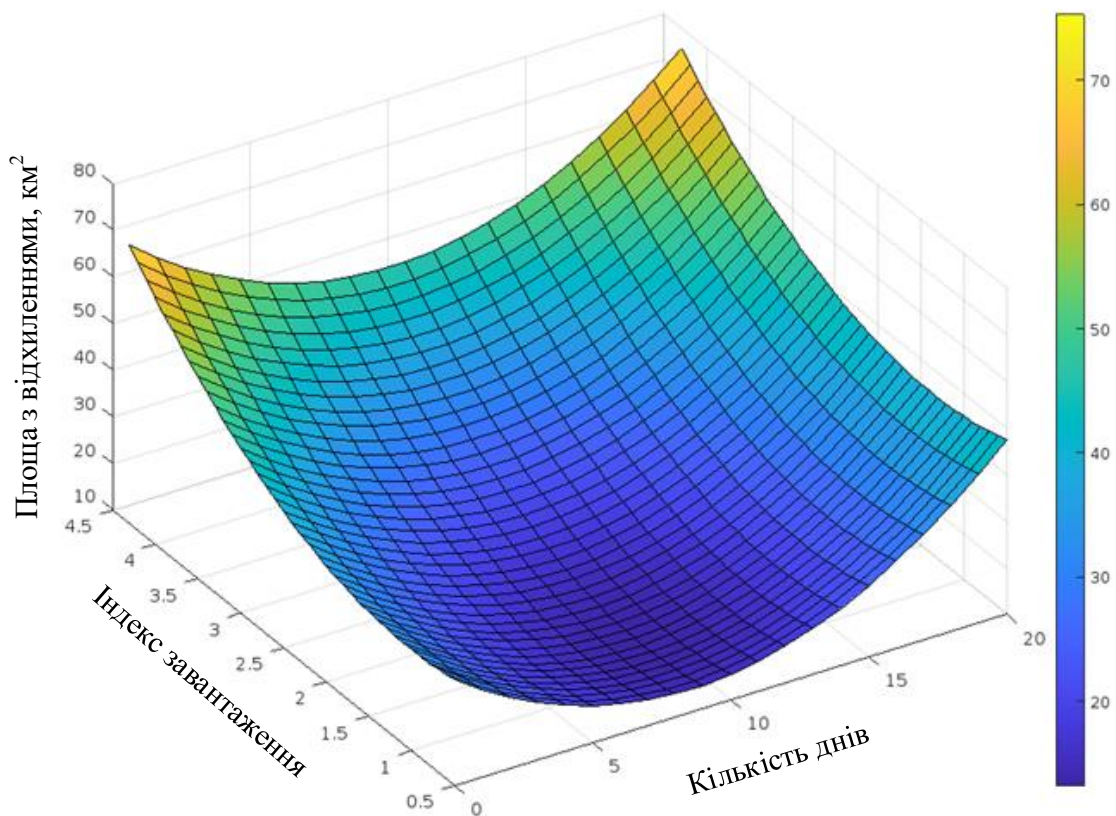


Рис. 4.19. Модель залежності між індексом завантаження, тривалістю фази та площею зон з відхиленнями (Фаза 3, місто Київ)

Фаза 3 у місті Київ має чітке зменшення площі з відхиленнями залежно від кількості днів до дев'яти днів, а далі стрімко зростає. Це зменшення відбувається до 50% від початково значення, а після 17 днів спостерігається перевищення на 15 – 60% залежно від значення індексу завантаження.

Особливість залежності площі з відхиленнями від індексу завантаження полягає у тому, що спершу (при значеннях індексу завантаження 0,5 – 1) залежність є обернено пропорційною, проте згодом вона змінюється на пряму.

### Львів, Фаза 1.

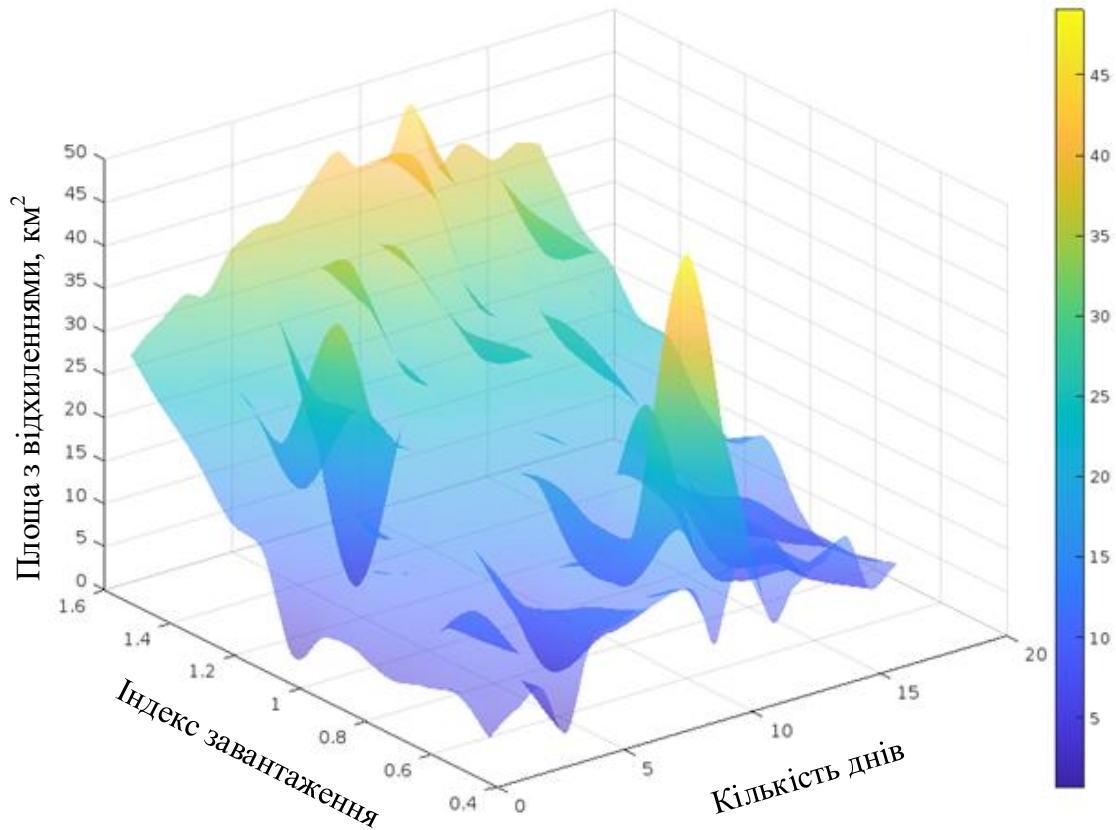


Рис. 4.20. Експериментальна залежність між індексом завантаження, тривалістю фази та площею зон з відхиленнями (Фаза 1, місто Львів)

Зміна цієї експериментальної залежності є досить плавною, а особливі викиди спостерігаються при індексі завантаження 0,6 для 11 днів фази та при індексі завантаження 1,2 для 4 днів. А викид із низьким значенням є для індексу завантаження 0,7 для 6 днів фази.

Модель залежності для Фази 1 міста Львова:

$$\begin{aligned}
 F(Ar)_{\text{Львів},1} = & -30,0194 \cdot CI + 23,833 \cdot CI^2 + \\
 & + 2,4031 \cdot d - 0,1334 \cdot d^2 + 0,4275 \cdot CI \cdot d + 9,8481, \quad (4.5) \\
 R^2 = & 0.8184
 \end{aligned}$$

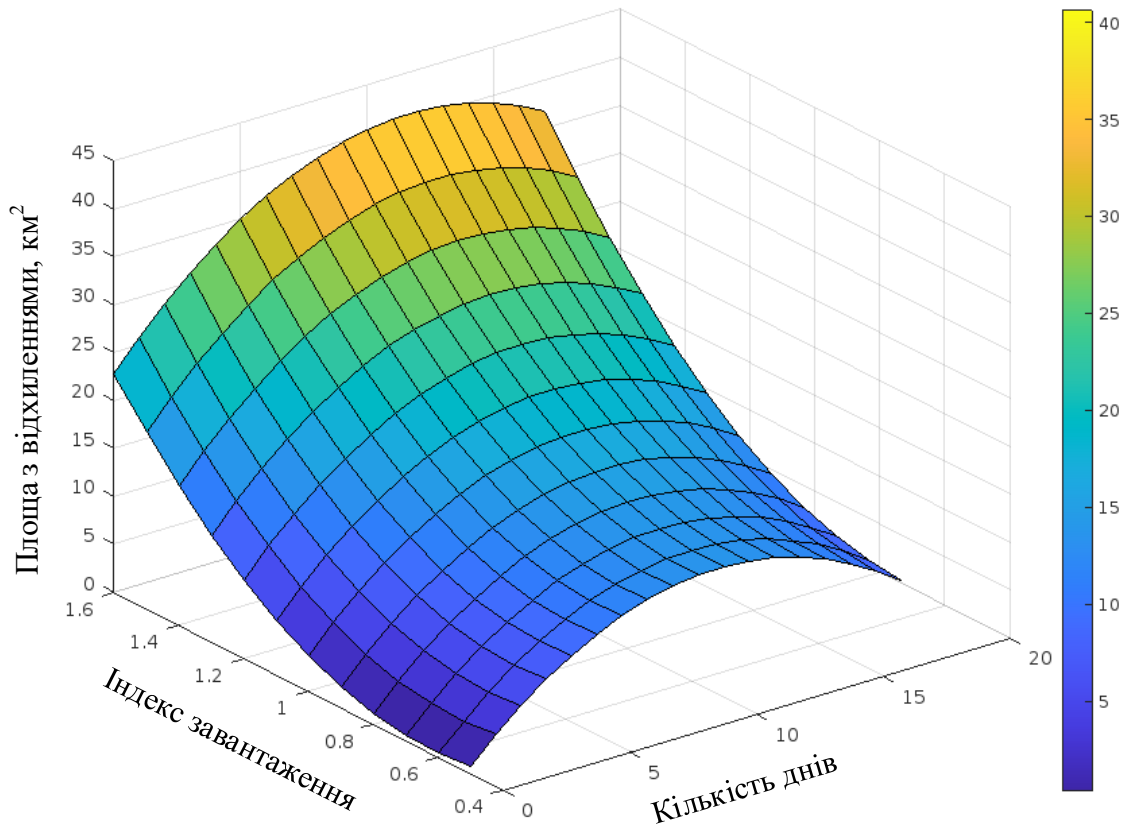


Рис. 4.21. Модель залежності між індексом завантаження, тривалістю фази та площею зон з відхиленнями (Фаза 1, місто Львів)

Зміна площі з відхиленнями залежно від кількості днів під час Фази 1 у Львові відбувається спершу прямо пропорційно, а приблизно через 10 днів – обернено пропорційно. Між площею з відхиленнями та індексом завантаження спостерігається пряма залежність. Для 1 – 8 днів спершу відбувається незначне зниження (до 10%) площі з відхиленнями при індексі завантаження 0,5 – 0,7, проте діла значення стрімко зростає.

### **Львів, Фаза 2.**

У експериментальних даних фази 2 для міста Львова (рис. 4.21) чітким викидом є низьке значення площі з відхиленнями для індексу завантаження 2,2 у перший день фази. Значень площі з відхиленнями загалом є вищими для середини фази і дещо нижчими для її початку і завершення.

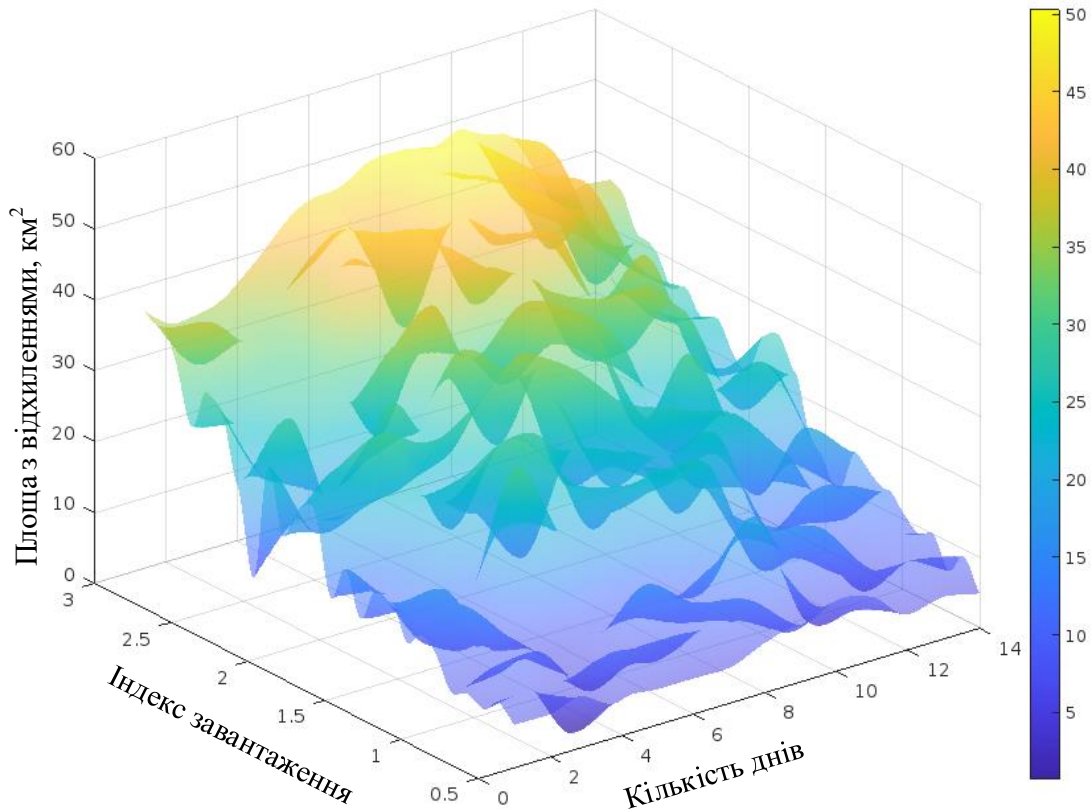


Рис. 4.22. Експериментальна залежність між індексом завантаження, тривалістю фази та площею зон з відхиленнями (Фаза 2, місто Львів)

Модель залежності для Фази 2 міста Львова:

$$\begin{aligned}
 F(Ar)_{\text{Львів},2} &= 8,6562 \cdot CI + 1,3285 \cdot CI^2 + \\
 &+ 3,3721 \cdot d - 0,2312 \cdot d^2 + 0,1926 \cdot CI \cdot d - 7,2994, \\
 R^2 &= 0,8362
 \end{aligned}
 \tag{4.6}$$

У цій моделі залежності площа з відхиленнями майже прямолінійно зростає зі збільшенням індексу завантаження, тоді як залежність від кількості днів є прямо пропорційною до середини фази, а пізніше – обернено пропорційна. Залежність зміни площі з відхиленнями від індексу завантаження є близькою до лінійної.

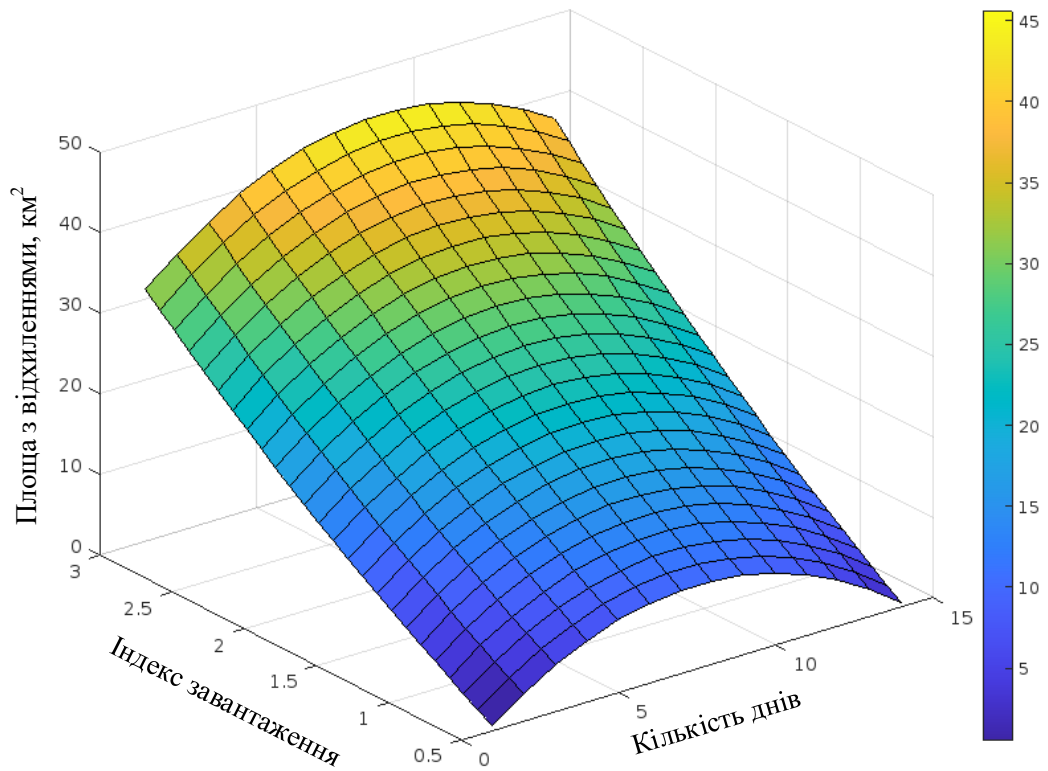


Рис. 4.23. Модель залежності між індексом завантаження, тривалістю фази та площею зон з відхиленнями (Фаза 2, місто Львів)

### Львів, Фаза 3.

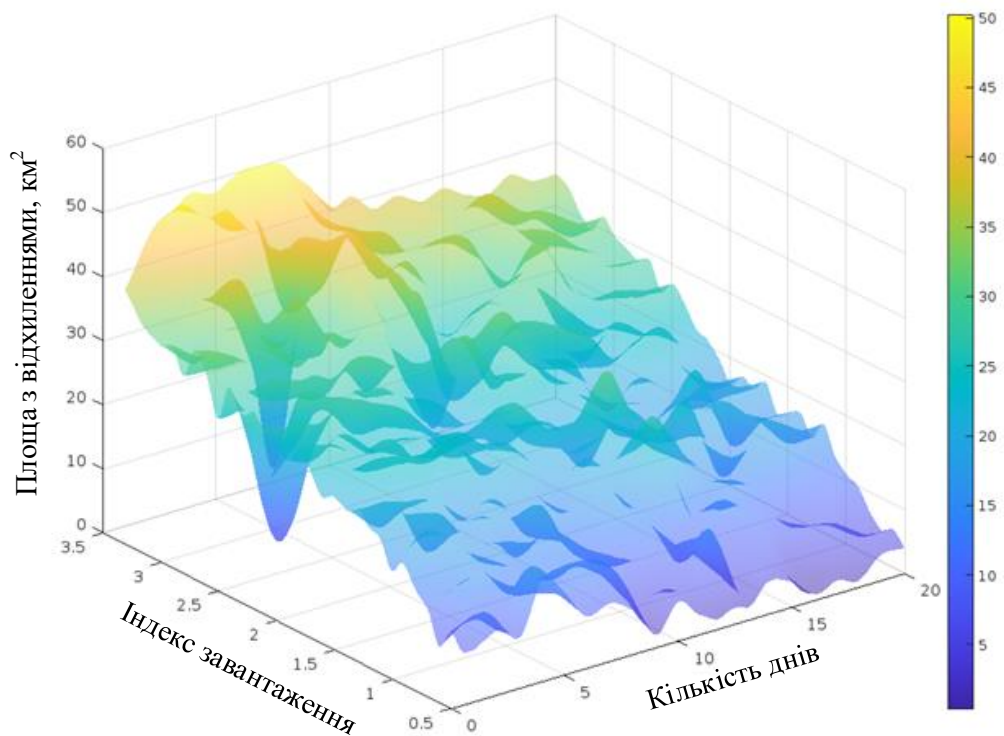


Рис. 4.24. Експериментальна залежність між індексом завантаження, тривалістю фази та площею зон з відхиленнями (Фаза 3, місто Львів)

Згідно цієї експериментальної залежності показник площі з відхиленнями є вищим для перших 10 днів фази та для індексу завантаження більше 2,5. Викид із низьким значенням спостерігається для індексу завантаження 2,4 для 2 днів.

Модель залежності для Фази 3 міста Львова:

$$F(Ar)_{\text{Львів,3}} = 7,2056 \cdot CI + 0,5316 \cdot CI^2 + 0,1548 \cdot d - 0,0207 \cdot d^2 + 0,0347 \cdot CI \cdot d + 6,1169, \quad (4.7)$$

$$R^2 = 0.8335$$

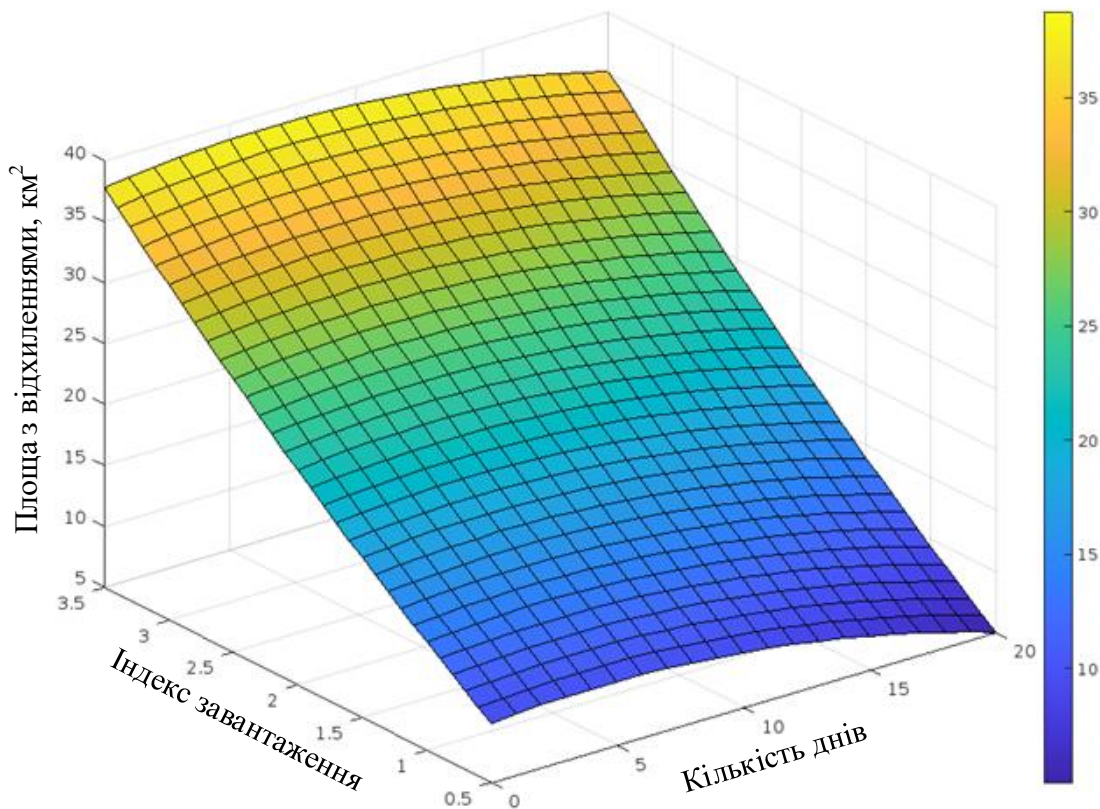


Рис. 4.25. Модель залежності між індексом завантаження, тривалістю фази та площею зон з відхиленнями (Фаза 3, місто Львів)

Модель залежності для Фази 3 у місті Львів не має чіткої параболічної форми, а є досить наближеною до лінійної. Площа із відхиленнями прямо пропорційно залежить від індексу завантаження, а зі зростанням кількості днів фази, спершу незначно зростає (до 2% перевищення від початкового значення), а приблизно після десятого дня набуває обернено пропорційної

залежності (до 50% зниження при індексі завантаження 0,5, до 20% зниження при індексі завантаження 2,0 та до 8 % – при 3,5).

Значення індексу завантаження та площі з відхиленнями є нижчими для Львова, ніж для Києва, що, ймовірно, пояснюється різницею у площі самих міст, а також особливостями воєнних подій у них.

#### 4.4. Висновки з розділу

1. Проаналізовано зміну усереднених по мережі коефіцієнта варіації та індексу завантаження для шести міст України. Для абсолютної варіабельності тривалості пересування Маріуполь демонструє найвищий рівень – 0,5 під час російської окупації. Київ, Харків і Дніпро демонструють значення 0,4, тоді як відносне збільшення варіабельності в Маріуполі, Дніпрі та Харкові становить 200%, 135% і 100% змін відповідно протягом досліджуваного періоду.

2. Для трьох міст, що зазнали найбільших нападів – Києва, Харкова та Маріуполя – події вторгнення спричинили збільшення рівня заторів на 50%, 55% та 30%, а також збільшення обсягів генерування попиту на 200%, 150% та 300% відповідно.

3. Визначено транспортні зони із найбільшою кількістю відхилень для двох міст (Львів та Київ), які далі сформовано у райони. Для кожного із спостережуваних відхилень отримано його причину, площу, вплив на доступність, дорожній рух (для подій міграції) та пропускну здатність (для подій окупації та боїв). Виокремлено три часові фази, які характеризують стан транспортних потоків у містах: початкова, деокупації, звикання.

4. Із отриманих значень індексу завантаження, площі з відхиленнями та кількості днів у фазі, побудовано регресійні моделі залежності цих показників. Про побудові регресійних моделей спостерігається чітка прямо пропорційна залежність між індексом завантаження та площею із відхиленнями.



## ВИСНОВКИ

За результатами виконання дисертаційного дослідження з'ясовано особливості формування транспортних потоків під час гуманітарних конфліктів та вивчено вплив воєнних подій на зміни у транспортних системах міст.

1. Аналіз стану питання щодо змін у транспортних потоках під час надзвичайних ситуацій продемонстрував брак актуальних та сучасних досліджень щодо вивчення впливу війни на функціонування транспортних систем.

2. Дослідження транспортної поведінки населення України під час початкової фази повномасштабного вторгнення на основі соціологічного опитування продемонструвало, що 83,8% мешканців евакуювалися із своїх первинних місць проживання протягом місяця від початку повномасштабної війни, з яких 50,8% – протягом першого тижня. Найбільша частка респондентів (30,0%) евакуювалась у міста західних областей України, а 24% – за кордон.

3. Сформовано базу даних воєнних подій у 6 містах України (Київ, Харків, Дніпро, Одеса, Львів, Маріуполь), а також розширену базу даних для Львова та Києва. Розроблено класифікацію подій гуманітарних конфліктів для транспортних досліджень із поділом на такі групи: просторові та точкові. Просторові події додатково поділяються на: нормативні обмеження та наближення ворожих військ (окупацію); а точкові, в свою чергу, на: обстріли далекобійною зброєю та руйнування транспортної інфраструктури.

4. Під час аналізу коефіцієнта варіації тривалості пересування відрізками ВДМ найбільша варіабельність спостерігалась у Києві, Харкові та Маріуполі – містах, що, серед досліджуваних, зазнали спроб окупації. Загалом для всіх міст, варіабельність тривалості пересування відрізками є вищою у периферійних районах. Абсолютна варіабельність тривалості пересування становить 0,5 для Маріуполя та 0,4 для Києва й Харкова, а відносне зростання

варіабельності у цих містах відповідно становить 200%, 135% і 100%. Перша ітерація дослідження продемонструвала зростання рівня заторів на 50% у Києві, 55% у Харкові та 30% у Маріуполі. Обсяг генерування попиту для цих міст зріс відповідно на 200%, 150% та 300%.

5. Під час другої ітерації дослідження здійснено фільтрування зон із відхиленнями за індексом завантаження зон призначення, зон відправлення та сумарним пробігом ТЗ у зонах. Максимальне зниження доступності для зон відправлення у Києві становить 432%, а для зон призначення – 189%, для Львова ці показники становлять 238% та 316% відповідно. Максимальне зростання інтенсивності руху в Києві спостерігалось на 209%, а у Львові – 134%. Для районів Києва, що зазнали спроб окупації також визначено рівень зниження пропускнуої здатності, максимальне значення якого становить 65% для північно – західного району.

6. Ґрунтуючись на отриманих даних щодо зон із відхиленнями та їх просторово-часових характеристиках виокремлено три фази міграції населення України: початок повномасштабного вторгнення (26 лютого 2022 р. – 14 березня 2022 р.); міграція, пов'язана із деокупацією північних регіонів України (28 березня 2022 р. – 11 квітня 2022 р.); міграція у зв'язку із звиканням населення до подій (26 квітня 2022 р. – 15 травня 2022 р.). Для кожного з періодів для обох міст проведено регресійний аналіз з метою визначення моделей залежності площі із відхиленнями від рівня індексу завантаження відрізків та кількості днів від початку фази.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Дослідження транспортних потоків в аспекті заторових станів дорожнього руху: монографія / В. Першаков та ін. Київ : НАУ, 2015. 177 с.
2. Lighthill M. J., Whitham G. B. On kinematic waves. II. A theory of traffic flow on long crowded roads. *Proceedings of the royal society of London. series A, mathematical and physical sciences*. 1955. Vol. 229, no. 1178. P. 317–345.
3. Richards P. I. Shock Waves on the Highway. *Operations research*. 1956. Vol. 4, no. 1. P. 42–51. URL: <https://doi.org/10.1287/opre.4.1.42>.
4. Дудніков О. Математичний опис обмежень станів багаторядних щільних транспортних потоків. *Вісті Автомобільно-дорожнього інституту: науково-виробничий збірник*. 2009. № 2 (9). С. 26–32.
5. Wardrop j. G. Road paper. Some theoretical aspects of road traffic research. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*. 1952. Vol. 1, no. 3. P. 325–362. URL: <https://doi.org/10.1680/ipeds.1952.11259>.
6. Єресов В., Григор'єва О. Аналіз перехідних процесів в транспортному потоці. *Міжвузівський збірник "Наукові нотатки"*. 2014. № 45. С. 176–182.
7. Rogalsky R., Sotnikova A. Analysis of the change in the number of passenger seats of urban passenger transport depending on the gravity function. *Transport technologies*. 2022. no. 1. P. 30–37. URL: <https://doi.org/10.23939/tt2022.01.030>.
8. Ingram G. K., Liu Z. Determinants of Motorization and Road Provision. The World Bank, 1999. URL: <https://doi.org/10.1596/1813-9450-2042>.
9. Kerner B.S. Introduction to modern traffic flow theory and control: the long road to three-phase traffic theory. Berlin, Heidelberg: Springer, 2009. 278 p.
10. Єресов В.І. Парадокси стійкості транспортних потоків / В. І. Єресов, О. В. Григор'єва // *Наукові нотатки*. - 2012. - Вип. 37. - С. 97-100.
11. Сотнікова А. О. Інтермодальність у маршрутах пересування населення. *IV Всеукраїнська науково-теоретична конференція «Проблеми з*

транспортними потоками і напрямки їх розв'язання», м. Львів. Львів, 2021. С. 86–87.

12. Brundtland G. H. Our common future: report of the world commission on environment and development. Oxford University Press, 1987. 383 p.

13. Ortúzar J. d. D. Sustainable urban mobility: what can be done to achieve it? *Journal of the Indian institute of science*. 2019. Vol. 99, no. 4. P. 683–693. URL: <https://doi.org/10.1007/s41745-019-00130-y>.

14. Guidelines. developing and implementing a sustainable urban mobility plan. / F. Wefering et al. Rupprecht Consult – Forschung und Beratung GmbH, 2014. 152 p. URL: [https://city2030.org.ua/sites/default/files/documents/sump\\_guidelines\\_en.pdf](https://city2030.org.ua/sites/default/files/documents/sump_guidelines_en.pdf).

15. Afrin T., Yodo N. A survey of road traffic congestion measures towards a sustainable and resilient transportation system. *Sustainability*. 2020. Vol. 12, no. 11. P. 4660. URL: <https://doi.org/10.3390/su12114660>.

16. Aftabuzzaman M. Measuring traffic congestion-a critical review. *Proceedings of the 30th Australasian transport research forum (ATRF), Melbourne*. Melbourne, 2007. P. 1–16.

17. Rapid planning: opportunities with pervasive data for sustainable mobility / R. Amrutsamanvar et al. *2023 smart city symposium Prague (SCSP)*, Prague, Czech Republic, 25–26 May 2023. 2023. URL: <https://doi.org/10.1109/scsp58044.2023.10146224>.

18. Factors in work trip lengths / A. M. Voorhees et al. *Highway research record*. 1966. No. 141. P. 24–46.

19. Improvement of methods for assessing the effectiveness of dedicated lanes for public transport / Y. Fornalchyk et al. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. Vol. 1, no. 3 (109). P. 29–37. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.225397>.

20. Лобашов О., Дульфан С. Вплив параметрів транспортних мереж значних і найзначніших міст на швидкість транспортних потоків. *Комунальне господарство міст*. 2013. № 109. С. 107–110

21. Планування та забудова територій: Держ. буд. норми України № ДБН Б.2.2-12:2019. С. 177.

22. Бура Р. Вдосконалення методів мінімізації затримки транспортних потоків у містах зі щільною забудовою : Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 275 «Транспортні технології (за видами)». Львів, 2021. 218 с

23. Степанчук О. Методологія підвищення ефективності функціонування вулично-дорожньої мережі міст : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня докт. техн. наук: 05.23.20. Київ, 2018. 45 с.

24. Безлюбченко О. С., Завальний О. В., Черноносова Т. О. Планування і благоустрій міст. Навчальний посібник. Харків : ХНАМГ, 2011. 191 с.

25. Санько Я. Оцінка впливу транспортних потоків на формування транспортної мережі міст. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. 2016. № 1 (225). С. 201–205.

26. Фоменко Г. Транспортні потоки та їхній вплив на рівень забруднення міських магістралей. *Науковий журнал «Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки»*. 2020. Т. 31 (70), № 3. С. 119–123.

27. Public transport prioritization and descriptive criteria-based urban sections classification on arterial streets / Y. Royko et al. *Sustainability*. 2023. Vol. 15, no. 3. P. 2363. URL: <https://doi.org/10.3390/su15032363> .

28. Hall P. *Urban and regional planning*. Routledge, 2005. URL: <https://doi.org/10.4324/9780203995327>.

29. Сотнікова А. Дослідження тривалості обслуговування автобусів на зупинкових пунктах. *Збірник тез доповідей Третьої всеукраїнської науково-практичної конференції 16–17 червня 2022 р. "Транспортні технології та безпека дорожнього руху"*, м. Запоріжжя. 2022. С. 42–45.

30. Highway capacity manual. Washington, D.C.: *Transportation Research Board*, National Research Council, 2000.

31. Minderhoud M. M., Botma H., Bovy P. H. L. Assessment of roadway capacity estimation methods. *Transportation research record: journal of the*

*transportation research board*. 1997. Vol. 1572, no. 1. P. 59–67. URL: <https://doi.org/10.3141/1572-08>.

32. Сотнікова А. Особливості розміщення місць генерації потоків учасників дорожнього руху в містах. *Матеріали конференції «II Міжнародна науково-технічна конференція «Перспективи розвитку машинобудування та транспорту»», м. Вінниця*. 2021. URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fmt/pmrt2021/schedConf/presentations>.

33. Ляхович Т. Теоретико-методологічні засади функціонального зонування міста (на прикладі міста Львів). *Магістерські студії географічного факультету ТНПУ ім. В. Гнатюка : збірник наукових праць*. 2018. № 1. С. 59–66. URL: <http://dspace.tnpu.edu.ua/handle/123456789/17846>.

34. Lin Z. W., Wei S. W. Analysis to urban traffic jam from the perspective of city planning. *Applied mechanics and materials*. 2014. Vol. 507. P. 527–530. URL: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.507.527>.

35. Miller E. J. Traffic analysis zone definition: issues & guidance. Toronto: Travel Modelling Group, University of Toronto, 2021. 22 p.

36. Chandra A., Pani A., Sahu P. K. Designing zoning systems for freight transportation planning: a gis-based approach for automated zone design using public data sources. *Transportation research procedia*. 2020. Vol. 48. P. 605–619. URL: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.08.063>.

37. Martínez L. M., Viegas J. M., Silva E. A. A traffic analysis zone definition: a new methodology and algorithm. *Transportation*. 2009. Vol. 36, no. 5. P. 581–599. URL: <https://doi.org/10.1007/s11116-009-9214-z>.

38. Learning from Covid: How can we predict mobility behaviour in the face of disruptive events? – How to investigate the mobility of the future / P. Papendieck et al. *Proceedings of the 4th Symposium on management of future motorway and urban traffic systems 2022*. Dresden, 2023. P. 239–244.

39. Chang L., Elnashai A. S., Spencer B. F. Post-earthquake modelling of transportation networks. *Structure and infrastructure engineering*. 2011. P. 1–19. URL: <https://doi.org/10.1080/15732479.2011.574810>.

40. Investigation of traffic and evacuation aspects at kumamoto earthquake and the future issues / Y. Kawasaki et al. *Journal of disaster research*. 2017. Vol. 12, no. 2. P. 272–286. URL: <https://doi.org/10.20965/jdr.2017.p0272>.

41. Application of open tools and datasets to probabilistic modeling of road traffic disruptions due to earthquake damage / C. Costa et al. *Earthquake engineering & structural dynamics*. 2020. Vol. 49, no. 12. P. 1236–1255. URL: <https://doi.org/10.1002/eqe.3288>.

42. The impact of flooding on road transport: a depth-disruption function / M. Pregnolato et al. *Transportation research part D: Transport and environment*. 2017. Vol. 55. P. 67–81. URL: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.06.020>.

43. Jonkman S. N., Kelman I. An analysis of the causes and circumstances of flood disaster deaths. *Disasters*. 2005. Vol. 29, no. 1. P. 75–97. URL: <https://doi.org/10.1111/j.0361-3666.2005.00275.x>.

44. Vulnerability assessment of urban road network from urban flood / P. Singh et al. *International journal of disaster risk reduction*. 2018. Vol. 28. P. 237–250. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2018.03.017>.

45. Investigating the effects of pluvial flooding and climate change on traffic flows in Barcelona and Bristol / B. Evans et al. *Sustainability*. 2020. Vol. 12, no. 6. P. 2330. URL: <https://doi.org/10.3390/su12062330>.

46. Assessing the knock-on effects of flooding on road transportation / K. Pyatkova et al. *Journal of environmental management*. 2019. Vol. 244. P. 48–60. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.05.013>.

47. Patra S. S., Chilukuri B. R., Vanajakshi L. Analysis of road traffic pattern changes due to activity restrictions during COVID-19 pandemic in Chennai. *Transportation letters*. 2021. Vol. 13, no. 5-6. P. 473–481. URL: <https://doi.org/10.1080/19427867.2021.1899580>.

48. Bucsky P. Modal share changes due to COVID-19: The case of Budapest. *Transportation research interdisciplinary perspectives*. 2020. Vol. 8. P. 100141. URL: <https://doi.org/10.1016/j.trip.2020.100141>.

49. Macioszek E., Kurek A. Extracting road traffic volume in the city before and during covid-19 through video remote sensing. *Remote sensing*. 2021. Vol. 13, no. 12. P. 2329. URL: <https://doi.org/10.3390/rs13122329>.

50. Ito H., Lee D. Comparing the impact of the September 11th terrorist attacks on international airline demand. *International journal of the economics of business*. 2005. Vol. 12, no. 2. P. 225–249. URL: <https://doi.org/10.1080/13571510500127931>.

51. Ayton P., Murray S., Hampton J. A. Terrorism, dread risk and bicycle accidents. *Judgment and decision making*. 2019. Vol. 14, no. 3. P. 280–287. URL: <https://doi.org/10.1017/s1930297500004319>.

52. Gaissmaier W., Gigerenzer G. 9/11, Act II. *Psychological science*. 2012. Vol. 23, no. 12. P. 1449–1454. URL: <https://doi.org/10.1177/0956797612447804>.

53. López-Rousseau A. Avoiding the death risk of avoiding a dread risk. *Psychological science*. 2005. Vol. 16, no. 6. P. 426–428. URL: <https://doi.org/10.1111/j.0956-7976.2005.01551.x>.

54. Carey H. C. Principles of social science. Philadelphia: J.B. Lippincott & co., 1865. Vol. 3. 511 p.

55. Sivakumar A. Modelling transport: a synthesis of transport modelling methodologies. 2007. 29 p.

56. McNally M. G. The Four-Step Model. *Handbook of transport modelling*. 2007. P. 35–53. URL: <https://doi.org/10.1108/9780857245670-003>.

57. Handbook of transport modelling / ed. by D. A. Hensher, K. J. Button. 2nd ed. Emerald Group Publishing Limited, 2007. Vol. 1. 790 p.

58. TPB's four-step travel model. *Metropolitan Washington Council of Governments*. URL: <https://www.mwcog.org/transportation/data-and-tools/modeling/four-step-model/>.

59. Хітров І., Кристопчук М. Закономірності формування і розподілу транспортних та пасажирських потоків. *Central Ukrainian scientific bulletin. Technical sciences*. 2020. № 3 (34). С. 324–330.



60. Ahmed B. The traditional four steps transportation modeling using simplified transport network: a case study of Dhaka City, Bangladesh. *International journal of advanced scientific engineering and technological research*. 2012. Vol. 1, no. 1. P. 19–40.

61. Bouchard R. J., Pyers C. E. Use of gravity model for describing urban travel: an analysis and critique. *Highway research record*. 1965. No. 88. P. 1–43.

62. Axhausen K. W., Gärling T. Activity-based approaches to travel analysis: conceptual frameworks, models, and research problems. *Transport reviews*. 1992. Vol. 12, no. 4. P. 323–341. URL: <https://doi.org/10.1080/01441649208716826>.

63. Мінь В. Д. Підвищення ефективності організації дорожнього руху в транспортних районах міста : Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 275 – Транспортні технології (за видами). Харків, 2021. 205 с.

64. Correa J. R., Stier-Moses N. E. Wardrop equilibria. *Wiley encyclopedia of operations research and management science*. 2011.

65. Wiley encyclopedia of operations research and management science, 8 volume set. Hoboken, N.J: Wiley, 2011.

66. Закономірності формування транспортних потоків у містах / І. Чумаченко та ін. *Комунальне господарство міст*. 2020. Т. 1, № 154.

67. Tabassum M. A genetic algorithm analysis towards optimization solutions. *International journal of digital information and wireless communications*. 2014. Vol. 4, no. 1. P. 124–142. URL: <https://doi.org/10.17781/p001091>.

68. Meyburg A. H., Stopher P. R. Aggregate and disaggregate travel demand models. *Transportation engineering journal of ASCE*. 1975. Vol. 101, no. 2. P. 237–245. URL: <https://doi.org/10.1061/tpejan.0000501>.

69. Koppelman F. S., Ben-Akiva M. E. Aggregate forecasting with disaggregate travel demand models using normally available data. *Transport decisions in an age of uncertainty*. Dordrecht, 1977. P. 159–166. URL: [https://doi.org/10.1007/978-94-009-9707-3\\_26](https://doi.org/10.1007/978-94-009-9707-3_26).

70. Transport decisions in an age of uncertainty / ed. by E. J. Visser. Dordrecht: Springer Netherlands, 1977. URL: <https://doi.org/10.1007/978-94-009-9707-3>.

71. Hasnine M. S., Nurul Habib K. Tour-based mode choice modelling as the core of an activity-based travel demand modelling framework: a review of state-of-the-art. *Transport reviews*. 2020. Vol. 41, no. 1. P. 5–26. URL: <https://doi.org/10.1080/01441647.2020.1780648>.

72. Miller E. J., Roorda M. J., Carrasco J. A. A tour-based model of travel mode choice. *Transportation*. 2005. Vol. 32, no. 4. P. 399–422. URL: <https://doi.org/10.1007/s11116-004-7962-3>.

73. Rossi T. F., Shiftan Y. Tour based travel demand modeling in the U.S. *IFAC proceedings volumes*. 1997. Vol. 30, no. 8. P. 381–386. URL: [https://doi.org/10.1016/s1474-6670\(17\)43853-5](https://doi.org/10.1016/s1474-6670(17)43853-5).

74. Arentze T. A., Timmermans H. J. P. A learning-based transportation oriented simulation system. *Transportation research part B: methodological*. 2004. Vol. 38, no. 7. P. 613–633. URL: <https://doi.org/10.1016/j.trb.2002.10.001>.

75. Bowman J. L., Ben-Akiva M. E. Activity-based disaggregate travel demand model system with activity schedules. *Transportation research part A: policy and practice*. 2001. Vol. 35, no. 1. P. 1–28. URL: [https://doi.org/10.1016/s0965-8564\(99\)00043-9](https://doi.org/10.1016/s0965-8564(99)00043-9).

76. Malayath M., Verma A. Activity based travel demand models as a tool for evaluating sustainable transportation policies. *Research in transportation economics*. 2013. Vol. 38, no. 1. P. 45–66. URL: <https://doi.org/10.1016/j.retrec.2012.05.010>.

77. Yasmin F., Morency C., Roorda M. J. Macro-, meso-, and micro-level validation of an activity-based travel demand model. *Transportmetrica A: transport science*. 2016. Vol. 13, no. 3. P. 222–249. URL: <https://doi.org/10.1080/23249935.2016.1249437>.

78. Lowry I. S. A model of metropolis. Santa Monica, Calif: Rand Corporation, 1964. 136 p.

79. Shepherd S. P. A review of system dynamics models applied in transportation. *Transportmetrica B: transport dynamics*. 2014. Vol. 2, no. 2. P. 83–105. URL: <https://doi.org/10.1080/21680566.2014.916236>.

80. Hunt J. D., Simmonds D. C. Theory and application of an integrated land-use and transport modelling framework. *Environment and planning B: planning and design*. 1993. Vol. 20, no. 2. P. 221–244. URL: <https://doi.org/10.1068/b200221>.

81. Waddell P. UrbanSim: modeling urban development for land use, transportation, and environmental planning. *Journal of the American Planning Association*. 2002. Vol. 68, no. 3. P. 297–314. URL: <https://doi.org/10.1080/01944360208976274>.

82. Wee B. V. Toward a new generation of land use transport interaction models: a viewpoint. *Journal of transport and land use*. 2015. URL: <https://doi.org/10.5198/jtlu.2015.611>.

83. Haynes K. E. Gravity and spatial interaction models. Beverly Hills: Sage Publications, 1984. 88 p.

84. Wilson A. G. Urban and regional models in geography and planning. London: John Wiley and Sons Ltd, 1974. 418 p.

85. Jansson T. Econometric specification of constrained optimization models: Dissertation. Bonn, Germany, 2007. 168 p.

86. Markov chain. *US English by Oxford dictionaries*. Archived from the original on December 15, 2017.

87. Markov chains / W.-K. Ching et al. Boston, MA: Springer US, 2013. URL: <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-6312-2>.

88. Louviere J. J. Using discrete choice experiments and multinomial logit choice models to forecast trial in a competitive retail environment: a fast food restaurant illustration. *Journal of retailing*. 1984. No. 60(4). P. 81–107.

89. McFadden D. Modelling the choice of residential location. Cowles foundation discussion papers, Cowles foundation for research in economics. 1977. No. 477. P. 75–96.

90. Alonso W. Location and land use: toward a general theory of land rent. Cambridge: Harvard University Press, 1970. 204 p.
91. Мікромодельювання мереж і перетинів. ПроМобільність. URL: <https://pro-mobility.org/mikromodelyuvannya-merezh-i-peretyniv/>.
92. Shrestha B. Transport modelling application in Kathmandu: New Baneshwor junction example. *Promoting cultural change in engineering practices for the development of Nepal: Learning from the UK*: Proceedings of 5th SONEUK Conference, London. London, 2020. P. 14–21.
93. Transport modelling for project managers - a critique of austroads report AP-R621-20. technical note. / R. Akçelik et al. Melbourne, Australia: Akcelik & Associates Pty Ltd, 2020. 56 p. URL: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.12992.97287>.
94. Li B. Management of traffic modelling processes and applications. Sydney: Austroads, 2021. 178 p.
95. Axhausen K. W. The Multi-Agent Transport Simulation MATSim / ed. by A. Horni, K. Nagel. Ubiquity Press, 2016. URL: <https://doi.org/10.5334/baw>.
96. Public transport network optimisation in PTV Visum using selection hyper-heuristics / P. Heyken Soares et al. *Public transport*. 2020. URL: <https://doi.org/10.1007/s12469-020-00249-7>.
97. PTV Visum. *CIVITAS. Sustainable and smart mobility for all*. URL: <https://civitas.eu/tool-inventory/ptv-visum>.
98. TransCAD transportation planning software. *Caliper Corporation*. URL: <https://www.caliper.com/tcovu.htm>.
99. Van der Waerden P., Timmermans H. Transportation planning and the use of TransCAD. *Transportes*. 1996. Vol. 4, no. 1. URL: <https://doi.org/10.14295/transportes.v4i1.290>.
100. Casas J., Perarnau J., Torday A. The need to combine different traffic modelling levels for effectively tackling large-scale projects adding a hybrid meso/micro approach. *Procedia - social and behavioral sciences*. 2011. Vol. 20. P. 251–262. URL: <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2011.08.031>.

101. Stopher P. R., Greaves S. P. Household travel surveys: Where are we going? *Transportation research part A: policy and practice*. 2007. Vol. 41, no. 5. P. 367–381. URL: <https://doi.org/10.1016/j.tra.2006.09.005>.
102. Steele F., Clarke P., Washbrook E. Modeling household decisions using longitudinal data from household panel surveys, with applications to residential mobility. *Sociological methodology*. 2013. Vol. 43, no. 1. P. 220–271. URL: <https://doi.org/10.1177/0081175013479352>.
103. Time-dependent congestion pricing system for large networks: Integrating departure time choice, dynamic traffic assignment and regional travel surveys in the Greater Toronto Area / A. Aboudina et al. *Transportation research part A: policy and practice*. 2016. Vol. 94. P. 411–430. URL: <https://doi.org/10.1016/j.tra.2016.10.005>.
104. Stathopoulos A., Tsekeris T. Framework for analysing reliability and information degradation of demand matrices in extended transport networks. *Transport reviews*. 2003. Vol. 23, no. 1. P. 89–103. URL: <https://doi.org/10.1080/01441640309901>.
105. Liu H. X., He X., Recker W. Estimation of the time-dependency of values of travel time and its reliability from loop detector data. *Transportation research part B: methodological*. 2007. Vol. 41, no. 4. P. 448–461. URL: <https://doi.org/10.1016/j.trb.2006.07.002>.
106. Rapidex: a novel tool to estimate origin–destination trips using pervasive traffic data / S. T. Waller et al. *Sustainability*. 2021. No. 13 (20). 11171. URL: <https://doi.org/10.3390/su132011171>.
107. Retrieving dynamic origin-destination matrices from Bluetooth data / G. E. Michau et al. *Transportation research board (TRB): 93rd Annual Meeting Compendium of Papers*. 2014. P. 1–11.
108. Constructing time-dependent origin-destination matrices with adaptive zoning scheme and measuring their similarities with taxi trajectory data / W. Mungthanya et al. *IEEE access*. 2019. Vol. 7. P. 77723–77737. URL: <https://doi.org/10.1109/access.2019.2922210>.

109. Origin-destination pattern estimation based on trajectory reconstruction using automatic license plate recognition data / W. Rao et al. *Transportation research part C: emerging technologies*. 2018. Vol. 95. P. 29–46. URL: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2018.07.002>.

110. Mo B., Li R., Dai J. Estimating dynamic origin–destination demand: a hybrid framework using license plate recognition data. *Computer-Aided civil and infrastructure engineering*. 2020. Vol. 35, no. 7. P. 734–752. URL: <https://doi.org/10.1111/mice.12526>.

111. Origin–destination trips by purpose and time of day inferred from mobile phone data / L. Alexander et al. *Transportation research part C: emerging technologies*. 2015. Vol. 58. P. 240–250. URL: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2015.02.018>.

112. Estimating origin-destination flows using mobile phone location data / F. Calabrese et al. *IEEE pervasive computing*. 2011. Vol. 10, no. 4. P. 36–44. URL: <https://doi.org/10.1109/mprv.2011.41>.

113. Integrating household travel survey and social media data to improve the quality of OD matrix: a comparative case study / Z. Cheng et al. *IEEE transactions on intelligent transportation systems*. 2020. P. 1–9. URL: <https://doi.org/10.1109/tits.2019.2958673>.

114. Liao Y., Yeh S., Gil J. Feasibility of estimating travel demand using geolocations of social media data. *Transportation*. 2021. URL: <https://doi.org/10.1007/s11116-021-10171-x>.

115. Network-wide traffic flow estimation with insufficient volume detection and crowdsourcing data / Z. Zhang et al. *Transportation research part C: emerging technologies*. 2020. Vol. 121. P. 102870. URL: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2020.102870>.

116. The use of automated planning for the strategic management of transport systems in developing countries / D. Ashmore et al. *SSRN electronic journal*. 2022. URL: <https://doi.org/10.2139/ssrn.4191661>.

117. Challenges of urban transport in developing countries – a summary. SUTP, 2010. 76 p.
118. Preibisch S. API development. Berkeley, CA: Apress, 2018. URL: <https://doi.org/10.1007/978-1-4842-4140-0>.
119. Shopova E. G., Vaklieva-Bancheva N. G. BASIC—A genetic algorithm for engineering problems solution. *Computers & chemical engineering*. 2006. Vol. 30, no. 8. P. 1293–1309. URL: <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2006.03.003>.
120. Lambora A., Gupta K., Chopra K. Genetic algorithm – A literature review. *2019 international conference on machine learning, big data, cloud and parallel computing (Comitcon)*, Faridabad, India, 14–16 February 2019. 2019. URL: <https://doi.org/10.1109/comitcon.2019.8862255>.
121. Tabassum M. A genetic algorithm analysis towards optimization solutions. *International journal of digital information and wireless communications*. 2014. Vol. 4, no. 1. P. 124–142. URL: <https://doi.org/10.17781/p001091>.
122. Лобанок Д. Харків: населення та демографічні зміни з початком повномасштабної війни. Гвара Медіа. URL: <https://gwaramedia.com/yak-zminilosya-naselennya-harkova-z-pochatku-povnomasshtabnogo-vtorgnennya/>.
123. Ukraine crisis 2022-2023: 1 year of response. International Organization for Migration, 2023. 38 p.
124. Чисельність населення по регіонах (за оцінкою) на 1 лютого 2022 року та середня чисельність у січні 2022 року. Інститут демографії та соціальних досліджень імені М.В. Птухи Національної Академії Наук України. URL: [http://db.ukrcensus.gov.ua/PXWEB2007/ukr/news/op\\_popul.asp](http://db.ukrcensus.gov.ua/PXWEB2007/ukr/news/op_popul.asp).
125. Сотнікова А. Аналіз транспортної поведінки населення України під час початкової фази повномасштабного вторгнення. *Вісник ВІІІ*. 2023. № 6. С. 65–70.
126. Паніотто В., Харченко Н. Методи опитування: підручник. Київ: Києво-Могилянська акад., 2017. 342 с.

127. Педченко Г. П. Статистика: навчальний посібник. Мелітополь: Колор Принт, 2018. 266 с.
128. Analyzing and Modeling Network Travel Patterns During the Ukraine Invasion Using Crowd-Sourced Pervasive Traffic Data / S. T. Waller et al. *Transportation Research Record*. 2023. Vol. 2677(10). P. 491–507.
129. Hassan N. A., Hijazi R. Open source intelligence methods and tools. Berkeley, CA: Apress, 2018. URL: <https://doi.org/10.1007/978-1-4842-3213-2>.
130. Anna Sotnikova, Transport Modeling of Ukrainian Cities During the Conflict to Develop Novel Travel Behavior Understanding in Support of Reconstruction and More Resilient Future Cities / Anna Sotnikova, S. Travis Waller, Moeid Qurashi // ETC past papers repository (51st European Transport Conference, 6 to 8 September 2023, Milano (Italy)), ISSN 2313-1853 / URL: <https://aetransport.org/past-etc-papers/conference-papers-2023?abstractId=8016&state=b>.
131. Outlier detection in buildings' power consumption data using forecast error / G. F. Martin Nascimento et al. *Energies*. 2021. Vol. 14, no. 24. P. 8325. URL: <https://doi.org/10.3390/en14248325>.



## ДОДАТКИ

**Опитування щодо евакуації українців  
із початком повномасштабного вторгнення**

*Доброго дня. Для свого дисертаційного дослідження я збираю інформацію про готовність українців до евакуації із початком повномасштабного вторгнення. Будь ласка, приділіть кілька хвилин свого часу, аби дати відповіді на запитання, які допоможуть зрозуміти як формувались транспортні потоки у перші місяці великої війни.*

*Прошу надавати інформацію станом на 24 лютого 2022 року.*

*Під евакуацією ми розуміємо залишення Вашого постійного місця проживання і переїзд в (умовно) безпечне місце у зв'язку із повномасштабним вторгненням.*

*Кінцевою точкою евакуації вважайте місце, у якому Ви зупинилися на термін не менше 1 місяця. Якщо Ви під час евакуації провели по кілька днів у різних місцях, то вважайте весь цей час терміном евакуації.*

*Якщо Ви маєте додаткові запитання, то надсилайте їх на електронну скриньку [anna.o.sotnikova@lrni.ua](mailto:anna.o.sotnikova@lrni.ua).*

1. Ваша стать:

- Жіноча
- Чоловіча
- Інше / не бажаю відповідати

2. Ваш вік

- до 16 років
- 17-24 років
- 25-45 років
- 46-59 років
- більше 60 років

3. В якій області України Ви проживали станом на 24 лютого 2022 року?

- Автономна Республіка Крим (м. Севастополь включно)
- Вінницька
- Волинська
- Дніпропетровська
- Донецька
- Житомирська
- Закарпатська
- Запорізька
- Івано-Франківська
- Київська (м. Київ включно)
- Кіровоградська
- Луганська
- Львівська
- Миколаївська
- Одеська
- Полтавська
- Рівненська
- Сумська
- Тернопільська
- Харківська
- Херсонська
- Хмельницька
- Черкаська
- Чернівецька
- Чернігівська

4. Впишіть, будь ласка, назву населеного пункту, в якому Ви проживали станом на 24 лютого 2022 року.

Ваша відповідь: \_\_\_\_\_

5. Чи евакуйовувались Ви із Вашого населеного пункту після початку повномасштабного вторгнення? (не залежно від часу)

- Так
- Ні

*Надайте, будь ласка, відповіді, якщо Ви евакуйовувалися із Вашого місця проживання станом на 24 лютого 2022 року.*

*Під евакуацією ми розуміємо залишення Вашого постійного місця проживання і переїзд в (умовно) безпечне місце у зв'язку із повномасштабним вторгненням.*

*Кінцевою точкою евакуації вважайте місце, у якому Ви зупинилися на термін не менше 1 місяця. Якщо Ви під час евакуації провели по кілька днів у різних місцях, то вважайте весь цей час терміном евакуації.*

6. Чи перебував Ваш населений пункт в окупації (оточенні) на момент евакуації?

- Так, в окупації
- Так, в оточенні
- Ні, був вже деокупований
- Ні, не був ні окупований, ні оточений

7. Куди Ви евакуйовувались? (Прошу дати відповідь про Вашу кінцеву точку евакуації).

- У сільську місцевість у Вашій області проживання
- У сільську місцевість у західних областях України (Львівська, Закарпатська, Івано-Франківська, Волинська, Рівненська, Тернопільська, Хмельницька, Чернівецька)
- У сільську місцевість в іншій області (окрім західних областей)
- У місто в західних областях України (Львівська, Закарпатська, Івано-Франківська, Волинська, Рівненська, Тернопільська, Хмельницька, Чернівецька)

- В інше місто (обласний чи районний центр) не у західних областях України

- За кордон
- Інше: \_\_\_\_\_

8. Скільки часу Вам знадобилося аби дістатися кінцевої точки евакуації (від моменту виїзду із Вашого місця проживання)?

- До 1 доби
- 1-3 доби
- 3-7 діб
- 1-2 тижні
- 2-4 тижні
- Більше 4 тижнів

9. На яку відстань від Вашого місця проживання Ви евакуювались? (Прошу дати відповідь про Вашу кінцеву точку евакуації).

- До 100 км
- 100-249 км
- 250-499 км
- 500-799 км
- 800-1000 км
- Більше 1000 км

10. Через скільки часу від початку повномасштабного вторгнення Ви евакуювались?

- До 1 тижня
- Від 1 тижня до 1 місяця
- Від 1 до 3 місяців
- Від 3 до 6 місяців
- Більше 6 місяців

11. Чи повернулись Ви, станом на зараз, у своє місце проживання до 24 лютого 2022 року?

- Так
- Ні
- Так, але потім знову виїхав / виїхала

***Прошу дати відповідь, якщо Ви повернулися із евакуації у Ваше місце проживання***

12. Через скільки часу від початку повномасштабного вторгнення Ви повернулись у своє місце проживання?

- До 3 місяців
- Від 3 до 6 місяців
- Від 6 місяців до 1 року
- Більше 1 року

13. Через скільки часу від моменту евакуації Ви повернулись у своє місце проживання?

- До 3 місяців
- Від 3 до 6 місяців
- Від 6 місяців до 1 року
- Більше 1 року

***Надайте, будь ласка, відповіді, якщо Ви НЕ евакуйовувалися із Вашого місця проживання станом на 24 лютого 2022 року***

7. Якщо ні, то чому Ви не евакуйовувались? (Можна обрати кілька відповідей).

- В моєму місці проживання (або поблизу) не велися активні бойові дії
- Не було можливості
- Не було куди (наприклад, відсутність родичів та знайомих в (умовно) безпечних місцях)

- Не міг / не могла залишити близьких людей, які не хотіли (не могли) евакуйовуватись
- Не міг / не могла залишити домашніх тварин
- Інше: \_\_\_\_\_

## Перелік воєнних подій в деяких містах України з 24.02.2022 до 12.04.2022

Таблиця Б.1

## Перелік воєнних подій у Києві з 24.02.2022 до 12.04.2022

№ п/п	Подія	Дата	Ступінь небезпеки	Примітка
1	2	3	4	5
1	Серія потужних авіаударів по різних об'єктах у Києві. Ракетні та артилерійські удари по Бучі, Ірпеню, Гостомелю, Ворзелю, Бородянці	24.02.2022	3	Початок повномасштабного вторгнення
2	Руйнування мосту (силами оборони) у Романівці	25.02.22		
3	Бої на проспекті Перемоги та вулиці Дегтярівській	25 – 26.02.2022	3	Вночі. Російські військові та танки увійшли до міста
4	Обстріл аеропорту "Жуляни"	26.02.22	2	
5	Ракетний обстріл житлового будинку	26.02.2022	3	
6	Київський метрополітен переведено в режим укриття, пасажирські перевезення не здійснюються	26.02.2022		
7	Комендантська година	26 – 28.02.2022		
8	Руйнування мосту біля села Стоянка	26.02.22		
9	Пожежа у двох складських будівлях після влучання російських снарядів	26.02.22	1	
10	Руйнування мосту Буча - Ірпінь (силами оборони)	27.02.22		
11	Спроби прориву оборони Києва	27.02.22	2	



Продовження таблиці Б.1

1	2	3	4	5
12	Окупація Ворзеля, Бородянки	28.02.22	2	
13	Влучання в пункт захоронення радіоактивних відходів ківської філії «Об'єднання «Радон»»	28.02.2022	3	Потенційна радіоактивна небезпека
14	Влучання в телевежу	01.03.2022	3	Загибель цивільних
15	Обстріли Русанівки, Вишневого, Куренівки, Боярки та Жулян (мікрорайони Києва)	01.03.22	2	
16	Окупація окремих ділянок траси Київ-Житомир	05.03.22	1	
17	Обстріл мешканців села Ясногородка	06.03.22	2	
18	Окупація Бучі	08.03.22	2	
19	Окупація Гостомеля	13.03.22	2	
20	Артилерійський снаряд влучив у житловий будинок у Оболонському районі	14.03.22	2	
21	Атака на авіазавод "Антонов"	14.03.22	2	
22	Російський снаряд влучив у торговий центр Lavina Mall	14.03.2022	3	
23	Обстріл заводу Соса-Cola у Великій Димерці	14.03.22	1	
24	Обстріляні житлові квартали Києва на заході міста	15.03.22	2	
25	Комендантська година	15 – 17.03.2022		
26	Російський снаряд частково зруйнував торговий центр «Ретровіль»	20.03.2022	3	
27	Деокупація всієї Київської області	02.04.2022		

Таблиця Б.2

## Перелік воєнних подій у Львові з 24.02.2022 до 12.04.2022

№ п/п	Подія	Дата	Ступінь небезпеки	Примітка
1	Атаковано три військові частини в області	24.02.2022	3	
2	Авіаудар по Міжнародному центру миротворчості та безпеки	13.03.2022	3	Загибель великої кількості осіб
3	Ракетний удар по Львівському державному авіаремонтному заводу	18.03.2022	3	
4	Ракетні удари по нафтобазі та Львівському бронетанковому заводу	26.03.2022	3	

Таблиця Б.3

## Перелік воєнних подій у Дніпрі з 24.02.2022 до 12.04.2022

№ п/п	Подія	Дата	Ступінь небезпеки	Примітка
1	2	3	4	5
1	Авіаудари по дитячому садку, житловому будинку та взуттєвій фабриці	11.03.2022	3	
2	Ракетний обстріл міжнародного аеропорту «Дніпро»	15.03.2022	3	
3	У Дніпрі обстріляли важливий військовий об'єкт	24.03.2022	1	
4	Ракетний обстріл об'єкту поблизу міста Нікополь	29.03.2022	1	
5	Ракетний обстріл нафтобаз та підприємства в Новомосковську	30.03.2022	3	
6	Ракетний обстріл військової частини в Дніпропетровській області	31.03.2022	3	В результаті двоє людей загинули, п'ятеро отримали поранення

Продовження таблиці Б.3

1	2	3	4	5
7	Ракетний обстріл зруйнував об'єкт цивільної інфраструктури	02.04.2022	3	У Дніпропетровській області в ніч з 1 на 2 квітня 2022 року зафіксовано 10 ракетних ударів, 4 ракети збито.
8	Російські військові обстріляли територію Зеленодольської територіальної громади Дніпропетровської області	04.04.2022	1	
9	Ракети влучили в нафтобазу з пальним та завод	06.04.2022	3	
10	Три обстріли російськими військами Синельниківського та Криворізького районів	07.04.2022	3	Відомо про чогирьох загиблих. Семеро отримали поранення. Двоє громадян вважаються зниклими безвісти
11	Численні влучання в різних частинах області. Сім ударів по місту за ніч, включно із аеропортом «Дніпро»	10.04.2022	3	

Таблиця Б.4

Перелік воєнних подій в Одесі з 24.02.2022 до 12.04.2022

№ п/п	Подія	Дата	Ступінь небезпеки	Примітка
1	2	3	4	5
1	Початок евакуації громадян поїздами	27.02.2022		
2	Ракетним обстрілом пошкоджено газопровід	01.03.2022	3	Щонайменше один громадянин загинув

Продовження таблиці Б.4

1	2	3	4	5
3	Авіаудари по селу Біленьке та місту Затока	03.03.2022	3	
4	Внаслідок авіаудару у місті Чорноморськ Одеської області зруйновано адміністративну будівлю	05.03.2022	1	
5	Російські війська завдали ударів по населених пунктах на Одещині	15.03.2022	2	
6	Атака на Одещину з кораблів	16.03.2022	2	
7	Російські війська завдали ударів по населених пунктах в Одеській області, а також атакували з кораблів	15 – 16.03.2022	3	
8	Внаслідок обстрілу пошкоджено приватний житловий будинок у селі Санжійка	22.03.2022	1	
9	Два кораблі обстріляли прибережну зону в південній частині міста	21.03.2022	3	
10	Обстріляно Одеський нафтопереробний завод та кілька нафтосховищ	03.04.2022	3	В результаті ракетного обстрілу були значно зруйновані об'єкти цивільної інфраструктури, пошкоджено кілька багатоквартирних будинків і приватних житлових будинків. Внаслідок руйнування електричної підстанції навколишні житлові будинки залишилися без світла

## Продовження таблиці Б.4

1	2	3	4	5
11	Ракетний обстріл нежитлових будівель	04.04.2022	1	
12	Ракетний удар трьома керованими ракетами	07.04.2022	3	Загибель кількох людей
13	Комендантська година	9 – 11.04.2022		

## Таблиця Б.5

## Перелік воєнних подій у Харкові з 24.02.2022 до 12.04.2022

№ п/п	Подія	Дата	Ступінь небезпеки	Примітка
1	2	3	4	5
1	Російські війська почали обстріл Харкова	24.02.2022	3	
2	Десять разів Росія здійснювала масовані обстріли житлових кварталів	25.02.2022	2	
3	Масований обстріл житлових кварталів. Кілька російських танків увійшли до Харкова	26.02.2022	3	
4	Атаки на аеропорт, танкоремонтний завод, житлові будинки, школи	27.02.2022	2	
5	Ракетний обстріл площі Свободи; частково зруйнована будівля облдержадміністрації; бомби, ракети та снаряди влучили в житлові будинки та цивільні об'єкти	01.03.2022	3	Вбитих цивільних осіб - 23. Поранено цивільних осіб - 51.
6	Авіаудар по казармах Харківського національного університету Повітряних Сил. Будівля економічного факультету Харківського національного університету. Обласне управління міліції та СБУ. Міська рада	02.03.2022	2	

Продовження таблиці Б.5

1	2	3	4	5
7	Масований обстріл житлових кварталів, найбільше постраждав мікрорайон Північна Салтівка (зруйновано 40 багатоквартирних будинків, жертви: 34 особи)	03.03.2022	3	Загиблих цивільних осіб - 34, поранених цивільних осіб - 285, у тому числі 10 дітей.
8	Ракетні удари по будівлі облдержадміністрації, Успенському кафедральному собору та університету ім. Каразіна. Обстріли спальних районів	04.03.2022	3	
9	Вкотре розбомблено найбільший житловий масив міста Салтівка	05.03.2022	2	
10	Російські війська обстріляли з "Градів" територію Національного наукового центру "Харківський фізико-технічний інститут". Ракетним ударом знищено почесне консульство Албанії. Обстріляно консульство Азербайджану. Удар по будівлі Харківського апеляційного суду	06.03.2022	2	
11	Харківський бронетанковий завод був обстріляний з авіації та російської реактивної системи залпового вогню	07.03.2022	2	
12	Протягом доби російські війська випустили понад 50 артилерійських снарядів та здійснили обстріли з реактивної системи залпового вогню в районах Олексіївки, П'ятихаток, Білгородського шосе, Холодної Гори, Дергачів, Північної та Південної Салтівки	08.03.2022	2	
13	Обстріли спальних районів Харкова	09.03.2022	2	

1	2	3	4	5
14	Масований обстріл Салтівки. Авіаудар по Харківському фізико-технічному інституту. Російська авіація завдала касетного удару по селищу Селекційне на Харківщині	10.03.2022	2	
15	Російські війська обстріляли будівлю спортивного комплексу "Акварена"	11.03.2022	2	
16	84 мінометних та артилерійських обстріли районів Харкова, Чугувського району, Ізюмського району та Дергачів. Пошкоджено театр опери та балету і церкву	12.03.2022	2	
17	Артилерійські обстріли Харкова. Росіяни скинули авіабомби на місто Дергачі під Харковом. Пошкоджено наукову бібліотеку ім. Короленка	13.03.2022	2	
18	Російські війська обстріляли житлові квартали Харкова, в тому числі із застосуванням ракетних систем "Іскандер"	14.03.2022	2	
19	Російські війська намагалися штурмувати Харків.	15.03.2022	3	
20	Обстріл ринку на Салтівці біля станції метро "Героїв Праці"	16.03.2022	1	
21	Обстріляно ринок «Барабашово» та місто Мерефа, зруйновано школу та будинок культури (жертви: 28 осіб)	17.03.2022	3	
22	Обстріляли житлові будинки у Салтівці. За добу росіяни здійснили 29 обстрілів	18.03.2022	2	
23	Обстріли районів ХТЗ, Рогань та Північної Салтівки	19.03.2022	2	

Продовження таблиці Б.5

1	2	3	4	5
24	Протягом дня ворог здійснив 58 артилерійських обстрілів міста. Російські військові захопили гуманітарний конвой, який рухався у напрямку Вовчанська на Харківщині	20.03.2022	2	
25	Росіяни 84 рази обстріляли Харків	21.03.2022	2	
26	Артилерійські обстріли Харкова тривають. Окупанти атакували місто Лозова, що на Харківщині. Здійснюються авіанальоти на приватний сектор та залізничні шляхи, де чекають на відправку біженців до Львова та Полтави	22.03.2022	2	
27	Обстріл Меморіалу жертвам тоталітаризму	23.03.2022	2	
28	Під обстріл потрапили район проспекту Гагаріна, аеропорту, Північної Салтівки та інші. З далекобійної зброї росіяни обстріляли відділення "Нової пошти", біля якого харків'яни отримували гуманітарну допомогу	24.03.2022	2	
29	За ніч Харків був обстріляний 54 рази. Росіяни обстріляли термінал аеропорту, супермаркет та поліклініку, де роздавали гуманітарну допомогу	25.03.2022	2	
30	Під обстріл потрапив ядерний підкритичний об'єкт "Джерело нейтронів". Пошкоджено меморіал жертвам нацизму "Дробиський Яр" під Харковом	26.03.2022	2	
31	Обстріляно район Харкова - Салтівка	27.03.2022	2	



Продовження таблиці Б.5

1	2	3	4	5
32	Війська РФ обстріляли райони населених пунктів Салтівка, "Нові Будинки", селище Жуковського, П'ятихатки, Олексіївка, "Горизонт", Кулиничі, Чугуїв та Дергачі. Територія Національного аерокосмічного університету ім. М. Є. Жуковського "Харківський авіаційний інститут"	28.03.2022	2	
33	Протягом дня російські війська постійно вели артилерійський та мінометний вогонь, загалом 39 разів: це райони Салтівки, Олексіївки, Холодної Гори, ХТЗ, Чугуєва та Дергачів. 180 пострілів було здійснено з "Градів"	29.03.2022	2	
34	Потужні обстріли міста Харків. Найбільше постраждав приватний сектор районів Павлове Поле та Салтівка	30.03.2022	2	
35	Війська РФ вели артилерійський, мінометний та танковий вогонь в районах населених пунктів Салтівка, П'ятихатки, Олексіївка, ХТЗ, Холодна Гора, Кулиничі, Велика Данилівка, Дергачі. Всього було зафіксовано близько 46 обстрілів. Також зафіксовано близько 170 обстрілів з "Градів" та 1 ракетний удар по центральній частині міста	31.03.2022	2	
36	Російські війська завдали артилерійських ударів по двох промислових підприємствах Харкова: виробничих приміщеннях "Турбоатому" та Харківського електромеханічного заводу	01.04.2022	2	

Продовження таблиці Б.5

1	2	3	4	5
37	Російські війська завдали близько 21 удару з артилерії, мінометів і танків у районах Салтівки, П'ятихаток, Олексіївки, Нових Будинків, центру міста та Дергачів. Було обстріляно Лозову. У Балаклії російські війська обстріляли центральну районну лікарню	02.04.2022	2	
38	Щонайменше 50 обстрілів протягом дня. Російські військові підірвали один із затворів дамби Оскільського водосховища	03.04.2022	3	Загинуло 11 цивільних осіб. Поранені цивільні особи - щонайменше 34 особи
39	Окупанти завдали по місту та області 54 удари з різних видів далекобійної зброї	04.04.2022	2	
40	За добу зафіксовано 45 обстрілів з різних видів зброї	05.04.2022	2	
41	Артилерійський обстріл житлових будинків у місті Балаклія	06.04.2022	2	
42	Масовані бомбардування з повітря, в тому числі центру міста. Протягом дня артилерія, міномети, танки і зенітний вогонь відкривали щонайменше 48 разів, а повітряні бомбардування велися в районах Салтівки, П'ятихаток, Олексіївки, ХТЗ, центру міста, в Дергачах, Барвінкове, Васищеве, с. Рогань	07.04.2022	2	
43	Загалом за добу було завдано близько 50 ударів з артилерії, мінометів, танків і РСЗВ. Пошкоджено інфраструктуру населених пунктів Салтівка, Холодна Гора, Олексіївка, ХТЗ	08.04.2022	2	

## Продовження таблиці Б.5

1	2	3	4	5
44	Російські війська обстріляли Павлівський, Олексіївський, Салтівський райони, місто Чугуїв, лікарню в Ізюмі Харківської області	09.04.2022	2	
45	Близько 66 обстрілів. Пошкоджено Харківський обласний центр соціально-психологічної реабілітації дітей "Гармонія"	10.04.2022	2	
46	Вночі за допомогою артилерії росіяни дистанційно розкидали міни сповільненої дії в різних районах	11.04.2022	3	Загинуло щонайменше 7 цивільних осіб. Щонайменше 11 осіб отримали поранення. Щонайменше 13 будівель було пошкоджено.
47	Протягом дня російські війська завдали близько 53 ударів з артилерії та реактивних систем залпового вогню	12.04.2022	2	

## Таблиця Б.6

## Перелік воєнних подій у Маріуполі з 24.02.2022 до 12.04.2022

№ п/п	Подія	Дата	Ступінь небезпеки	Примітка
1	2	3	4	5
1	Вибухи в місті чути з 2:00.	24.02.2022		
2	Рух танків з Донецька до Маріуполя (знищені українською армією)	27.02.2022	3	
3	Увечері в більшості районів міста відключили електрику, газ та інтернет	28.02.2022		
4	Оточення та початок блокади міста росією	01.03.2022	3	

Продовження таблиці Б.6

1	2	3	4	5
1	Удари по всіх районах міста, в тому числі по об'єктах критичної та комунальної інфраструктури. Чергова спроба прориву оборони Маріуполя			
5		01.03.2022	3	
6	Російські війська обстріляли торговий центр «Еліцентр», 22-й і 17-й мікрорайони та станцію переливання крові	03.03.2022	3	
7	Взяття російськими військами Мангуша та їх вихід до моря	08.03.2022	3	
8	Внаслідок авіаудару зруйновано пологовий будинок та лікарню в центрі міста	09.03.2022	3	
9	Взяття населених пунктів Найдєнівка, Ляпін, Виноградар, Саргана	10.03.2022	3	
10	Захоплення Волновахи та східних передмість Маріуполя	12.03.2022	3	
11	«Зелений коридор» для евакуації	15 – 18.03.2022		Близько 20 000 людей втекли через "Коридор" з Маріуполя. Понад 4 000 приватних автомобілів виїхали з міста в напрямку Запоріжжя через Бердянськ і Мангуш. Люди могли виїхати з Маріуполя тільки на власних автомобілях або пішки

Продовження таблиці Б.6

1	2	3	4	5
12	Авіаудар по Маріупольському драматичному театру. Російська армія прорвалася у східну частину міста.	16.03.2022	3	До 18 березня було врятовано близько 130 осіб, що вижили, але загальна кількість людей, які могли перебувати в підвалах на той час, могла сягати від 500 до 1200 осіб
13	Українські військові контролюють лише половину міста, а окупанти - 17-23 мікрорайони, Лівий берег та інші частини Маріуполя	17.03.2022	3	Близько 80% житлового фонду міста зруйновано, з них майже 30% не підлягає відновленню
14	Бої за окремі будівлі та цілі квартали	23 – 28.03.2022	3	

## Деталізований перелік воєнних подій в деяких містах України з 24.02.2022 до 15.05.2022

Таблиця В.1

## Деталізований перелік воєнних подій у Києві з 24.02.2022 до 15.05.2022

№ п/п	Дата початку	Час початку	Дата завершення	Час завершення	Подія	Тип події
1	2	3	4	5	6	7
1	25.02	4:20			Українські сили протиповітряної оборони збили літак. Він впав у Дарницькому районі на житловий будинок	ПУ*
2	25.02	05:00			Падіння фрагментів літака, що спричинили пожежу в приватному будинку	ПУ
3	25.02	10:00			Проникнення російської диверсійно-розвідувальної групи на Оболоні	ОА*
4	25.02	20:45			Серія вибухів біля столичної ТЕЦ-6 на Троєщині	ДЗ*
5	25.02				У Романівці (житловий квартал Ірпеня) зруйновано міст, щоб не пропустити російську армію	ТІ*
6	26.02	вночі			Бої на проспекті Перемоги та вулиці Дегтярівській у Києві	ОА
7	26.02	вночі			Підірвано міст через річку Ірпінь в районі села Стоянка	ТІ
8	26.02	вранці			Київський метрополітен переведено в режим укриття, пасажирські перевезення не здійснюються	НО*
9	26.02	8:10			Російська ракета влучила в житловий будинок	ДЗ
10	26.02	8:30			На складах виникла пожежа внаслідок влучання боєприпасів	ДЗ
11	26.02	9:00			Обстріляно аеропорт "Жуляни"	ДЗ

Продовження таблиці В.1

1	2	3	4	5	6	7
12	26.02	вночі			Бої за Васильків	ОА
13	26.02	17:00	28.02	08:00	Комендантська година в місті	НО
14	27.02	1:20			Російські снаряди влучили в нафтобазу у Василькові	ДЗ
15	27.02	10:00			Вибух у дворі житлового будинку	ДЗ
16	27.02				Російські сухопутні війська просунулися до Бучі, а потім прорвалися з Бучі в напрямку Ірпеня, розпочавши тим самим битву за Ірпінь	ОА
17	28.02	19:20			Ворог атакував військовий радіолокаційний вузол зв'язку в Броварах. Проїзд з Києва в напрямку Броварів обмежений	ДЗ
18	01.03	6:50			У пологовий будинок медичної мережі "Адоніс" на Київщині влучив російський снаряд	ДЗ
19	01.03	17:00			Влучання в напрямку телевежі в районі метро Дорогожичі	ДЗ
20	01.03				До опівночі росіяни обстріляли Русанівку, Вишневе, Куренівку, Боярку, Жуляни	ОА
21	02.03	21:00			Українська система ППО збила крилату ракету, уламки якої пошкодили теплограсу	ПУ
22	03.03	01:40			У центрі міста пролунало щонайменше чотири вибухи	ДЗ
23	03.03	вдень			Противник увірвався в Бучу на кількох напрямках, вуличні бої	ОА
24	03.03		04.03		Бої за Бучу та Ворзель	ОА
25	05.03	10:30			В Ірпені під Києвом окупанти підірвали потяг, який мав евакуювати людей	ОА

Продовження таблиці В.1

1	2	3	4	5	6	7
26	05.03				Бої по всій території Ірпня	ОА
27	06.03				У Гостомелі та Бучі українські війська відступили	ОА
28	06.03				Евакуація з Ірпня на Київщині триває попри відсутність зеленого коридору	ЕВ*
29	06.03				Частина Ірпня дійсно була захоплена російськими окупантами	ОА
30	07.03	11:00			Гуманітарний коридор для виходу через річку Ірпінь у селі Гнатівка	ЕВ
31	08.03	18:00			Авіаудар по військовій частині у Бориспільському районі	ОА
32	09.03	9:00	09.03	21:00	Гуманітарний коридор на Київ з Ворзеля, Бородянки, Ірпня та Бучі	ЕВ
33	09.03				У Стоянці Київської області російські військові зірвали евакуацію, заблокувавши колону з 50 автобусів з біженцями	ОА
34	12.03	03:50			В результаті обстрілу виникла пожежа на складі для зберігання заморожених продуктів.	ОА
35	12.03	6:15			Пожежа виникла на вул. Хорива, що у Подільському районі столиці. Внаслідок влучання невідомого предмета обвалився дах 4-поверхової адміністративної будівлі	ДЗ
36	12.03	7:00			В районі військового аеродрому противник випустив щонайменше 6 реактивних снарядів. Пошкоджено склад з боєприпасами.	ДЗ
37	12.04	7:01			Удару поблизу Василькова Київської області, внаслідок чого горить нафтобаза у селі Крячки	ДЗ



Продовження таблиці В.1

1	2	3	4	5	6	7
38	13.03	14:00			Окупанти завдали артилерійського удару по Пуца-Водицькому психоневрологічному інтернату	ОА
39	14.03	05:10			В Оболонському районі Києва снаряд влучив у дев'ятиповерховий житловий будинок	ДЗ
40	14.03	05:30			Російські війська обстріляли завод «Антонов» у Києві	ДЗ
41	14.03	11:00			Уламки ракети впали на дорогу на Куренівці	ПУ
42	14.03	до 17:00			Росія обстріляла торговий центр Lavina Mall у Києві	ДЗ
43	15.03	05:00			Влучили у двоповерховий приватний житловий будинок, що спричинило пожежу	ДЗ
44	15.03	06:00			У Подільському районі Києва внаслідок влучання загорівся десятиповерховий житловий будинок	ДЗ
45	15.03				Внаслідок влучання в шістьнадцятиповерховий житловий будинок сталося значне руйнування будівлі з подальшим загорянням	ДЗ
46	15.03	20:00	17.03	07:00	Комендантська година в Києві	НО
47	16.03	06:00			Уламки снаряду влучили у житловий будинок у Шевченківському районі Києва. Також частково пошкоджено сусідню 9-поверхівку	ПУ
48	16.03	вночі			Російська армія завдала авіаудару по селу Мархалівка Фастівського району Київської області, що призвело до руйнувань житлових будинків та загибелі людей	ОА
49	16.03	17:00			У Подільському районі снаряди влучили в кілька приватних будинків	ДЗ

Продовження таблиці В.1

1	2	3	4	5	6	7
50	17.03	5:00			Внаслідок ракетного обстрілу у столиці пошкоджено два багатоповерхових житлових будинки	ДЗ
51	17.03				Окупанти обстріляли з важкої артилерії житлові будинки на Вишгородщині	ОА
52	17.03	16:30			У Святошинському районі внаслідок обстрілу загорілися два автомобілі та складське приміщення. Загинула одна людина	ДЗ
53	18.03	8:00			Уламки збитої ракети впали на житлові квартали. В результаті спалахнула масштабна пожежа, є загиблі та поранені	ПУ
54	20.03	8-10:00			Близько тридцяти мін влучили в приміщення Ірпінської бібліотечної семінарії	ОА
55	20.03	14:00			Уламки снаряда влучили в житловий будинок у Святошинському районі Києва	ПУ
56	20.03	22:30			Потужні вибухи у Подільському районі	ДЗ
57	21.03	20:00	23.03	07:00	У Києві та Київській області посилена комендантська година	НО
58	22.03				Збройні формування Російської Федерації здійснили артилерійський обстріл міста Бровари Київської області	ОА
59	22.03	13:00			Внаслідок обстрілу російськими військами в Оболонському районі Києва загорілися два житлових будинки та вантажний автомобіль	ДЗ
60	22.03				Застосування заборонених фосфорних боєприпасів по північно-західних околицях Києва	ОА

Продовження таблиці В.1

1	2	3	4	5	6	7
61	23.03	7:30			Пожежа та руйнування будівель у Шевченківському районі столиці внаслідок ворожого обстрілу	ДЗ
62	23.03	17:00			Під обстріл потрапила автостоянка торгового центру в Подільському районі	ДЗ
63	24.03	вранці			Російські війська обстріляли місто Ірпінь з реактивних систем залпового вогню «Град»	ОА
64	24.03	12:30			Внаслідок влучання снаряду в приватному 2-поверховому житловому будинку загорівся дах	ДЗ
65	24.03	19:00			Евакуаційний потяг №43 Київ - Івано-Франківськ потрапив під обстріл поблизу Василькова	ОА
66	24.03				Російські окупаційні війська обстріляли з важкої артилерії житловий комплекс на околиці Вишгорода	ОА
67	27.03	23:00			У Києві внаслідок падіння уламків збитої ракети виникла пожежа на території приватної садиби	ПУ
68	28.03	13:00			Внаслідок ворожого обстрілу пошкоджено контактну мережу на автодорозі Вишневе-Боярка у Київській області	ДЗ
69	28.03				Українські військові звільнили місто Ірпінь Київської області від російських військ	ДО*
70	30.03				Відкрито рух громадського транспорту Південним мостом	ТІ
71	01.04				Від російської армії звільнено місто Буча	ДО
72	01.04				Збройні сили України звільнили від окупантів Бородянку на Київщині	ДО
73	02.04	21:00	05.04	06:00	У Бучі посилена комендантська година	НО

Продовження таблиці В.1

1	2	3	4	5	6	7
74	03.04				Завдано ракетного удару по Василькову	ДЗ
75	04.04				На Північному мосту в Києві повністю відновлено рух транспорту в обох напрямках	ТІ
76	04.04	21:00	07.04	07:00	Комендантська година у Броварському, Бучанському та Вишгородському районах Київської області	НО
77	07.04	06:00	14.04	06:00	Комендантська година у Гостомелі	НО
78	07.04	21:00	11.04	09:00	Комендантська година в Ірпені	НО
79	11.04				Тимчасове відновлення мосту в селі Романівка	ТІ
80	11.04				Південним мостом відкрито рух для всіх видів транспорту	ТІ
81	16.04	вранці			Вибухи у Дарницькому районі на околиці міста	ДЗ
82	17.04	вранці			Удари по об'єктах інфраструктури у Броварах	ДЗ
83	18.04				Біля села Стоянка під Києвом введено в експлуатацію тимчасову переправу через річку Ірпінь	ТІ
84	18.04	вранці			Ракетний удар по інфраструктурі Васильківської територіальної громади	ДЗ
85	28.04	20:10			Російські війська завдали двох ракетних ударів по Лук'янівці	ДЗ
86	03.05				Рух між Києвом та Житомиром повністю відновлено, відкрито Варшавську трасу	ТІ

\*Примітка. НО – нормативні обмеження; ОА – окупація чи її наближення; ПУ – падіння уламків; ЕВ – евакуація; ДО – деокупація території; ДЗ – обстріл далекобійною зброєю; ТІ – зміни у транспортній інфраструктурі.

## Деталізований перелік воєнних подій у Львові з 24.02.2022 до 15.05.2022

№ п/п	Дата початку	Час початку	Дата завершення	Час завершення	Подія	Тип події
1	18.03	6:30			Ракетний обстріл Львівського державного авіаремонтного заводу	ДЗ*
2	26.03	16:30			Ракетний обстріл нафтобази	ДЗ
3	26.03	19:00			Ракетний обстріл Львівського бронетанкового заводу	ДЗ
4	18.04	8:30			Відбулися чотири ракетні удари по Львову, один з них по шиномонтажу (загибель 7 цивільних)	ДЗ
5	03.05	20:00			Росія обстріляла Львів крилатими ракетами, пошкоджені електропідстанції (Залізничний вокзал)	ДЗ
6	03.05	20:00			Росія обстріляла Львів крилатими ракетами, пошкоджені електропідстанції (Лисиничі)	ДЗ
7	03.05	20:00			Росія обстріляла Львів крилатими ракетами, пошкоджені електропідстанції (Сихів)	ДЗ

\*Примітка. ДЗ – обстріл далекобійною зброєю.

## Акт про використання результатів дисертаційної роботи у навчальному процесі кафедри «Транспортні технології»


 «ЗАТВЕРДЖУЮ»  
 Проректор  
 з науково-педагогічної роботи  
 Національного університету  
 «Львівська політехніка»  
 доцент Олег ДАВИДЧАК  
 04 \_\_\_\_\_ 2024 р.

АКТ

про використання у навчальному процесі кафедри транспортних технологій матеріалів і результатів дисертаційної роботи Сотнікової Анни Олександрівни «Особливості формування транспортних потоків в умовах війни»


Результати дисертації на здобуття наукового ступеня доктора філософії Сотнікової Анни Олександрівни впровадженні в навчальний процес з підготовки здобувачів:

1. Другого (магістерського) рівня вищої освіти зі спеціальності 275 «Транспортні технології (за видами)» спеціалізація 275.03 «Транспортні технології (на автомобільному транспорті)», які навчаються за освітньо-професійною програмою «Організація і регулювання дорожнього руху» у навчальній дисципліні: «Планування мобільності з використанням засобів імітаційного моделювання»: використані матеріали щодо визначення основних характеристик дорожнього руху та вулично-дорожніх мереж, методів збору початкових даних для транспортного моделювання, інструментів оперативного транспортного моделювання та планування (Тема 5 – «Основні показники дорожнього руху, які характеризують транспортні потоки», Тема 6 – «Моделювання руху транспортних засобів у транспортному потоці та визначення його основних показників»).

2. Другого (магістерського) рівня вищої освіти зі спеціальності 275 «Транспортні технології (за видами)» спеціалізація 275.03 «Транспортні технології (на автомобільному транспорті)», які навчаються за освітньо-професійними програмами «Організація перевезень і управління на транспорті (за видами транспорту)» та «Організація і регулювання дорожнього руху» у навчальній дисципліні «Підвищення безпеки дорожніх умов»: використані матеріали щодо інструментів та методів оперативного отримання показників дорожнього руху й оперативного управління дорожнім рухом (Тема 3 – «Організація заходів з підвищення безпеки дорожніх умов», підтеми – «Оперативне інформування учасників дорожнього руху про дорожні умови», «Заходи забезпечення безпеки руху»).

Матеріали дисертаційної роботи Сотнікової Анни Олександрівни використовуються під час курсового проектування та виконання магістерських кваліфікаційних робіт на освітніх програмах спеціальності 275 «Транспортні технології (за видами)».

Завідувач кафедри  
 транспортних технологій,  
 голова методичної комісії спеціальності  
 275 «Транспортні технології (за видами)»  
 канд. техн. наук, доцент



Юрій РОЙКО

**Акт про впровадження результатів дисертаційної роботи у ПП  
«Інжинірингова компанія «ДорПроектСтандарт»»**

**«ЗАТВЕРДЖУЮ»**

Директор

ПП «Інжинірингова компанія  
«ДорПроектСтандарт»»

Роман ГАЙВАНОВИЧ

04 20 24 р.



**АКТ**

про впровадження результатів дисертаційної роботи  
Сотнікової Анни Олександрівни  
«Особливості формування транспортних потоків в умовах війни»

Цим актом підтверджується, що в роботі ПП «Інжинірингова компанія «ДорПроектСтандарт»» під час організації руху транспортних потоків на вулично-дорожній мережі використовуються такі результати дисертаційної роботи Сотнікової А.О.:

1. Спосіб отримання актуальних первинних даних для транспортного моделювання;
2. Методика розрахунку показників транспортних потоків із використанням інструментів оперативного транспортного планування;
3. Моделі залежності зміни індексу завантаження відрізків вулично-дорожніх мереж в умовах війни залежно від просторово-часових характеристик конфлікту.

Використання цих результатів дозволяє підвищити ефективність процесу розроблення транспортних моделей та враховувати особливості формування транспортних потоків в умовах гуманітарного конфлікту.

Директор

ПП «Інжинірингова компанія  
«ДорПроектСтандарт»»

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'Roman Gayvanovich', written over a faint circular stamp.

Роман ГАЙВАНОВИЧ

## Додаток ГЗ

## Акт про впровадження результатів дисертаційної роботи у департаменті міської мобільності та вуличної інфраструктури

**“ЗАТВЕРДЖУЮ”**

Директор  
департаменту міської мобільності  
та вуличної інфраструктури

*О. Забаріло*  
Олег ЗАБАРИЛО  
« 15 » 04 2024 р.



### АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи  
Сотнікової Анни Олександрівни  
«Особливості формування транспортних потоків в умовах війни»

Цим актом підтверджується, що в роботі департаменту міської мобільності та вуличної інфраструктури під час оцінки міських транспортних потоків використовуються такі результати дисертаційної роботи Сотнікової А.О.:

1. Результати моделювання транспортного попиту та особливості зміни індексу завантаження на відрізках вулично-дорожньої мережі міста Львова в умовах війни;
2. Регресійні моделі формування транспортних потоків в умовах війни у місті Львові.

Використання цих результатів дозволяє врахувати особливості міської мобільності в умовах війни у місті Львові для ефективного управління дорожнім рухом та транспортного планування і прогнозування змін у транспортній системі.

Директор  
департаменту міської мобільності  
та вуличної інфраструктури



*О. Забаріло*

Олег ЗАБАРИЛО



**Список публікацій здобувача за темою дисертації*****Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації***

*Стаття у науковому періодичному виданні інших держав, що включене до міжнародних науково-метричних баз:*

1. Analyzing and Modeling Network Travel Patterns During the Ukraine Invasion Using Crowd-Sourced Pervasive Traffic Data / S. T. Waller et al. *Transportation Research Record*. 2023. Vol. 2677(10). P. 491–507.

*Статті у фахових виданнях України:*

2. Rogalskyu R., Sotnikova A. Analysis of the change in the number of passenger seats of urban passenger transport depending on the gravity function. *Transport technologies*. 2022. no. 1. P. 30–37. URL: <https://doi.org/10.23939/tt2022.01.030>.

3. Сотнікова А. Аналіз транспортної поведінки населення України під час початкової фази повномасштабного вторгнення. *Вісник ВПІ*. 2023. № 6. С. 65–70.

***Опубліковані праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації***

1. Сотнікова А. О. Інтермодальність у маршрутах пересування населення. *IV Всеукраїнська науково-теоретична конференція «Проблеми з транспортними потоками і напрями їх розв'язання», м. Львів*. Львів, 2021. С. 86–87.

2. Сотнікова А. Особливості розміщення місць генерації потоків учасників дорожнього руху в містах. *Матеріали конференції «II Міжнародна науково-технічна конференція «Перспективи розвитку машинобудування та транспорту»», м. Вінниця*. 2021. URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fmt/pmrt2021/schedConf/presentations>.

3. Сотнікова А. Дослідження тривалості обслуговування автобусів на зупинкових пунктах. *Збірник тез доповідей Третьої всеукраїнської науково-практичної конференції 16–17 червня 2022 р. «Транспортні технології та безпека дорожнього руху», м. Запоріжжя. 2022. С. 42–45.*

4. Learning from Covid: How can we predict mobility behaviour in the face of disruptive events? – How to investigate the mobility of the future / P. Papendieck et al. *Proceedings of the 4th Symposium on management of future motorway and urban traffic systems 2022*. Dresden, 2023. P. 239–244.

5. Anna Sotnikova, Transport Modeling of Ukrainian Cities During the Conflict to Develop Novel Travel Behavior Understanding in Support of Reconstruction and More Resilient Future Cities / Anna Sotnikova, S. Travis Waller, Moeid Qurashi // ETC past papers repository (51st European Transport Conference, 6 to 8 September 2023, Milano (Italy)), ISSN 2313-1853 / URL: <https://aetransport.org/past-etc-papers/conference-papers-2023?abstractId=8016&state=b>.