

А. Д. Кузик, І. З. Думас, О. Т. Олійник
Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, м. Львів, Україна
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0118-9493> – А. Д. Кузик
<https://orcid.org/0000-0003-1452-5046> – І. З. Думас
✉ andrij_k@yahoo.com

ЗАБРУДНЕННЯ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ АВТОМОБІЛЬНИМ ТРАНСПОРТОМ НА В'ЇЗДАХ ДО М. ЛЬВОВА

Проблема. Забруднення атмосферного повітря рухомими джерелами, до яких відносять автомобільний транспорт, є проблемою великих міст, зокрема Львова. Особливо це стосується магістральних вулиць на в'їздах у місто. Вивчення закономірностей концентрації забруднювачів у повітрі від часу доби є актуальним завданням, вирішення якого дасть можливість прогнозувати періоди перевищення гранично допустимих концентрацій.

Мета. Метою роботи є встановлення чинників забруднень атмосферного повітря на основних в'їздах у місто Львів та їх прогнозування.

Методи дослідження. У роботі застосовано методи аналізу та статистичні методи досліджень за відкритими даними вимірювань якості повітря.

Основні результати досліджень. Аналіз публікацій свідчить, що використання автомобільного транспорту на теперішній час в Україні зростає, що спричиняє збільшення викидів забруднюючих речовин. В рамках різноманітних державних та неурядових проєктів проводиться моніторинг забруднень атмосферного повітря у містах, однак показники, які визначаються, стосуються переважно концентрації часток пилу. Але найбільшим джерелом забруднень є вихлопні гази двигунів внутрішнього згоряння, у яких містяться NO₂, NO, SO₂, CO та ін.

Для досліджень стану та динаміки забруднень використано онлайн-ресурс Відкриті дані Львова, зокрема моніторинг концентрацій забруднювачів на перехрестях міста навесні, влітку, восени та взимку протягом декількох років. Загалом за чотирима забруднювачами упродовж 2021-2023 років перевищення ГДК спостерігалось для CO до 22% та для NO₂ до 30%. За іншими показниками перевищень не було.

За даними моніторингу забруднень та інтенсивності трафіку на в'їздах за даними мобільного оператора побудовано модель, за допомогою якої можна прогнозувати періоди перевищення ГДК забруднювачів на основних в'їздах до міста Львова. За допомогою моделі виявлено, що перевищення ГДК протягом доби є неоднаковим, що може бути зумовлене добовою міграцією населення з приміських зон та потоком транзитного автотранспорту через місто.

Висновки. Таким чином, проблема забруднення повітря на основних в'їздах у місто Львів стосується перевищення ГДК NO₂ і CO. Її можна вирішити удосконаленням схем дорожнього руху та покращенням руху приміського транспорту, який може замінити приватний автотранспорт для щоденного добирання до міста вранці та повернення додому увечері.

Ключові слова: забруднення повітря, гранично допустима концентрація, автомобільний транспорт, вихлопні гази

A. D. Kuzyk, I. Z. Dumas, O. T. Oliinyk
Lviv State University of Life Safety, Lviv, Ukraine

ATMOSPHERIC AIR POLLUTION BY VEHICLE TRANSPORT AT THE ENTRANCES TO LVIV

Introduction. Atmospheric air pollution by mobile sources, which includes automotive transport, is a problem of large cities, in particular Lviv. This problem especially applies to main streets at the entrances to the city. Studying regularities of pollutant concentrations in the air depending on the time of day is an important task, the solution of which will make it possible to predict periods exceeding the maximum allowable concentrations.

Purpose. The purpose of the work is to establish the factors of atmospheric air pollution at the main entrances to the city of Lviv and their forecasting.

Methods. The article uses methods of analysis and statistical methods of research based on open data of air quality measurements.

Results. The analysis of publications shows that the use of road transport is currently growing in Ukraine, which causes an increase in emissions of pollutants. Within the framework of various governmental and non-governmental projects, atmospheric air pollution in cities is monitored, however, the indicators that are determined relate mainly to the concentration of dust particles. However, the biggest source of pollution is the exhaust gases of internal combustion engines, which contain NO_2 , NO , SO_2 , CO , etc.

The Open Data of Lviv online resource was used to research the state and dynamics of pollution, in particular, the monitoring of pollutant concentrations at city intersections in spring, summer, autumn and winter for several years. In total, for four pollutants during the years 2021-2023, an exceedance of the threshold limit values was observed for CO up to 22% and for NO_2 up to 30%. According to other indicators, there were no excesses.

Based on the monitoring of pollution and traffic intensity at the entrances presented by the data of the mobile operator, a model was built, which makes it possible to forecast the periods of exceeding the threshold limit values of pollutants at the main entrances to the city of Lviv. Using the model, it was found that exceeding the threshold limit values during the day is unequal, which can be caused by the daily migration of the population from suburban areas and the flow of transit vehicles through the city.

Conclusion. Thus, the problem of air pollution at the main entrances to the city of Lviv relates to exceeding the threshold limit values of NO_2 and CO . It can be solved by improving traffic patterns and improving commuter transport, which can replace private vehicles for daily commutes to the city in the morning and back home in the evening.

Keywords: air pollution, threshold limit value, road transport, exhaust gases

Вступ. Забруднення атмосферного повітря є однією із загроз для екосистем та населення. Шкідливі речовини, що містяться в повітрі внаслідок викидів, після вдихання потрапляють в організм та негативно впливають на здоров'я людей, тварин, рослин та мікроорганізмів. Навіть за невисокою токсичності вони можуть спричинити хвороби, впливати на функції організмів, накопичуватися в органах. Викиди здійснюють численні стаціонарні та рухомі джерела. Значних масштабів набуло забруднення у великих містах України та світу, що становить небезпеку для міських екосистем [1]. Це стосується навіть міст у країнах з невисоким рівнем життя населення [2].

Особливе занепокоєння викликає автомобільний транспорт, на частку якого припадає понад 80% перевезень у світі, а більшість вантажних перевезень, як і автобусних, здійснюється з використанням дизельних двигунів [3].

У зв'язку із зменшенням в Україні кількості промислових підприємств та збільшення кількості автомобілів і частки перевезень вантажним автомобільним транспортом частка викидів від рухомих джерел також зростає [4]. У деяких містах автомобільний транспорт є основним забруднювачем повітря. За даними Управління статистики у Львівській обл. обсяг вантажних перевезень автомобільним транспортом з 1995 по 2009 роки істотно зменшувався, проте з 2010 року набув тенденції до зростання та становив у 2020 р. 25038 тис.т [5].

До основних токсичних викидів автомобіля відносяться: відпрацьовані гази, картерні гази й паливні випаровування. Найбільш небезпечними є відпрацьовані гази, які містять близько 200 складових, період життя яких триває від кількох хвилин до 4-5 років [6]. Розподіл основних

компонентів викидів у карбюраторного двигуна такий: відпрацьовані гази містять 95 % CO , 55 % C_xH_y і 98 % NO_x , картерні гази – по 5 % C_xH_y , 2 % NO_x , а паливні випари – до 40 % C_xH_y [7]. Шкідливий вплив відпрацьованих газів на довкілля, тварин і людей описано в [8]. Динаміка викидів забруднюючих речовин від пересувних джерел забруднень за забруднюючими речовинами протягом 2016-2021 рр. в Україні свідчить про незначне зростання обсягів викидів у 2021 р. окису азоту, аміаку, метану та сажі, а викиди інших речовин є на рівні попередніх років [9].

Одним із аспектів забруднення атмосферного повітря автомобільним транспортом є облаштування та стан доріг. У населених пунктах їх проектування здійснюють відповідно до ДБН В.2.3-5:2018 [10]. Проектування вулиць і доріг передбачає заходи щодо організації дорожнього руху та охорони довкілля. Одним із факторів, за якими оцінюють вплив вулиць і доріг на навколишнє середовище, є ступінь забруднення атмосферним повітрям. Передбачено оцінювання впливу на навколишнє середовище відповідно до ДБН А.2.2-1:2022 [11].

Дослідження забруднення атмосферного повітря у місті Львові, які описані в [12, 13], проводилися із застосування розрахункового методу. Загальна методика розрахункових досліджень забруднень атмосферного повітря на дорога протягом року наведена в чинному ДСТУ 9030:2020 [14]. Для її реалізації потрібно визначити добову інтенсивність руху автомобілів на певному виді палива, що переміщуються ділянками дороги, довжини цих ділянок. До 2015 року діяла Методика розрахунку викидів забруднюючих речовин та парникових газів у повітря від транспортних засобів, затверджена наказом Держкомстату України від 13.11.2006 №

452. В основі цієї методики практично той же принцип, що і в наведеній у ДСТУ 9030:2020, проте розмежовуються приватні транспортні засоби і транспортні засоби юридичних осіб та виокремлюється розрахунок викидів свинцю.

Вимірювання концентрацій CO₂ за допомогою газоаналізатора у місті проводились у [15]. Результати картографування забруднень наведені в [16, 17]. Моніторинг повітря у Львові здійснює лабораторія КП «Адміністративно-технічне управління» Львівської міської ради, а результати її вимірювань використані у [17, 18]. Дослідженнями [19] встановлено, що найбільше забруднює атмосферне повітря у місті автотранспорт, частка якого становить 50%, а причинами значних забруднень є як застарілий парк транспортних засобів, так і недоліки проектування вуличної мережі.

Сучасні методи моніторингу потребують не лише вимірювальних приладів, але й новітніх методів обробки та аналізу інформації, зокрема з використанням штучного інтелекту та «інтернету речей» [20].

Викиди від автотранспорту не лише спричиняють підвищення концентрацій газів, але й призводять до забруднення важкими металами та їх акумуляції в рослинах. Відповідні дослідження проведено в [21], результатами яких є встановлені концентрації металів Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Pb і Zn у рослинах та у воді. Подібні дослідження проведено і для приміської зони міста Львова у [22]. Окремого розгляду потребує забруднення повітря дрібними частками [23].

Забруднене повітря негативно впливає на здоров'я населення. Наслідки забруднення атмосферного повітря та його вплив на стан здоров'я школярів описано в [24]. За результатами моніторингу забруднення повітря окремими забруднювачами, зокрема SO₂ і NO₂ та захворювань виявлено кореляційні залежності, які вказують що ці речовини спричиняють виникнення хвороб у дітей.

Вирішення проблеми викидів є першочерговим завданням для України, особливо у зв'язку із входженням у ЄС, де Рада ЄС і Європарламент вирішили скоротити викиди вуглецю автомобілями на 55% до 2030 р. [25], а до 2035 р. взагалі відмовитися від продажу нових автомобілів з двигунами внутрішнього згорання. Винятком є двигуни, які спалюють екологічно

чисте паливо, що виробляється з відновлюваних джерел (e-fuels) [26]. Під e-fuels або електронним паливом розуміють синтетичне паливо, отримане з вуглецю, вловленого з атмосферного повітря, з додаванням водню [27].

На теперішній час у містах України моніторинг повітря здійснюється мережею стаціонарних станцій, а показники якості повітря відображаються онлайн-системами SaveEkoBot [28], Екозагроза [29]. Частина станцій моніторингу працює в рамках громадського проєкту Eco City [30]. Стан якості атмосферного повітря також моніториться в межах проєкту ЛУН Місто [31], мережа станцій якого охоплює понад 10 великих міст України. Проте більшість станцій визначають лише концентрацію пилу PM_{1.0}, PM_{2.5}, PM_{10.0}, температуру та вологість. І лише окремі визначають концентрацію газів.

Для підвищення мобільності та охоплення більших територій нерідко застосовують мобільні станції контролю якості повітря. Зокрема у Львові такі станції наявні у лабораторії КП «Адміністративно-технічне управління» Львівської міської ради [32]. Підвищити оперативність моніторингу можна, застосовуючи аеромобільні вимірювальні комплекси, які запропоновані у [33].

Проведені дослідження забруднень атмосферного повітря для міста Львова стосуються переважно центральної частини, окремих перехресть або районів. Проте значного забруднення повітря зазнають райони при в'їздах у місто. Тому дослідження стану повітря на основних в'їздах у місто Львів є актуальними.

Метою роботи є встановлення чинників забруднень атмосферного повітря на основних в'їздах у місто Львів та їх прогнозування.

Методи досліджень. В роботі застосовано методи аналізу та статистичні методи досліджень за відкритими даними вимірювань якості повітря.

Результати досліджень

Місто Львів є великим транспортним вузлом та має прямі сполучення з іншими областями та пунктами перетину кордону України. Особливо інтенсифікувався рух у Львові з початком повномасштабного вторгнення, що призвело до значної кількості внутрішньо переміщених осіб та зростання кількості внутрішніх та закордонних автомобільних перевезень. Основні напрямки та в'їзні вулиці наведені в таблиці 1.

Таблиця 1

Основні напрямки сполучення та в'їзди у м. Львів

№ напрямку	Напрямок	В'їзна вулиця
1	Київ, Луцьк, державний кордон	Хмельницького
2	Тернопіль, Івано-Франківськ	Личаківська
3	Івано-Франківськ	Зелена

Продовження таблиці 1

4	Ужгород, державний кордон	Стрийська
5	Південно-західна частина області	Кульпарківська
6	Державний кордон	Городоцька
7	Державний кордон	Шевченка

Оскільки безпосередньо на основних в'їздах шкідливих викидів використовували дані [35] для вимірювання не проводились, тому для аналізу перехресть на основних в'їзних магістралях (рис. 1).

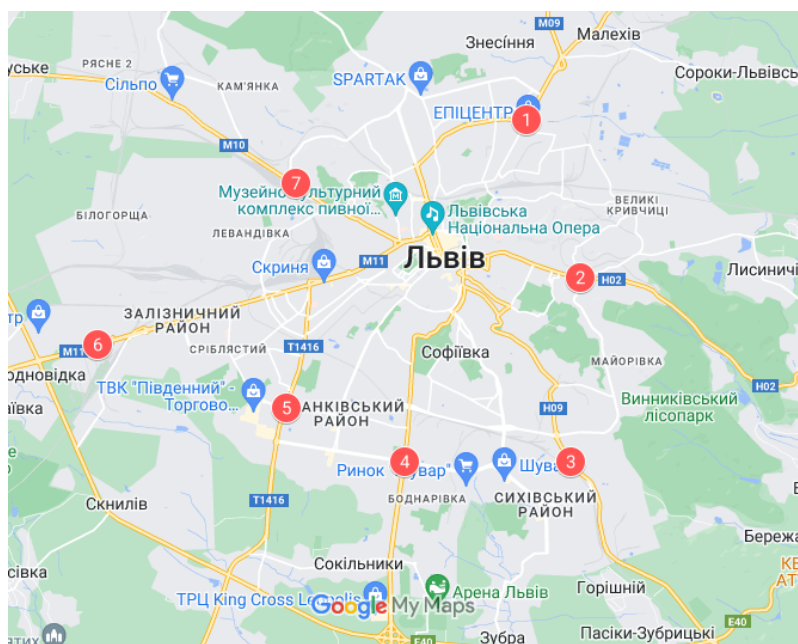


Рисунок 1 – Перехрестя на в'їзних магістралях у місто Львів, для яких наявні дані про забруднення атмосферного повітря за картами Google

Гранично допустимі концентрації (ГДК) NO₂, NO, SO₂ та CO [34], середні значення забруднень протягом періоду досліджень, середні похибки, стандартні відхилення та коефіцієнти варіації, розраховані за даними моніторингу протягом 2021-2023 рр. [35], наведені в таблиці 2.

Таблиця 2

ГДК [34], середні значення забруднень на перехрестях в'їзних магістралей та їх відхилення, обчислені за [35]

Забруднювач	ГДК, мг/м ³	№ напрямку	Середнє значення, мг/м ³	Середнє відхилення, мг/м ³	Стандартне відхилення, мг/м ³	Коефіцієнт варіації, %
NO ₂	0,2	1	0,242	0,027	0,039	15,99
		2	0,221	0,038	0,062	28,17
		3	0,216	0,016	0,020	9,28
		4	0,220	0,025	0,043	19,65
		5	0,237	0,016	0,022	9,36
		6	0,261	0,038	0,055	21,20
		7	0,236	0,025	0,033	14,02
NO	0,4	1	0,242	0,027	0,039	15,99
		2	0,218	0,037	0,062	28,59
		3	0,224	0,018	0,026	11,77
		4	0,239	0,022	0,030	12,64
		5	0,252	0,010	0,012	4,68
		6	0,286	0,064	0,091	31,80
		7	0,261	0,045	0,061	23,19
SO ₂	0,5	1	0,147	0,034	0,059	39,90

Продовження таблиці 2

Забруднювач	ГДК, мг/м ³	№ напрямку	Середнє значення, мг/м ³	Середнє відхилення, мг/м ³	Стандартне відхилення, мг/м ³	Коефіцієнт варіації, %
		2	0,110	0,020	0,027	24,99
		3	0,098	0,009	0,012	12,67
		4	0,108	0,015	0,023	21,78
		5	0,122	0,009	0,012	9,93
		6	0,137	0,023	0,030	21,61
		7	0,118	0,021	0,033	27,77
		СО	5,0	1	6,124	0,704
2	5,728			0,540	0,768	13,40
3	5,328			0,431	0,664	12,46
4	5,674			0,842	1,576	27,90
5	5,698			0,264	0,318	5,58
6	6,062			0,632	0,780	12,88
7	6,089			0,553	0,908	14,91

Як видно з таблиці 2, середнє значення концентрації NO₂ перевищує ГДК на кожному напрямку. Найвищі значення спостерігаються на важливих у транспортному сполученні напрямках 1 і 6, один з яких – на столицю України, а другий – на пункт пропуску Шегині на кордоні з Республікою Польща. Найнижчі концентрації забруднювача є на напрямках 2, 3 і 4. Щодо напрямку 3, то за ним Львів сполучається з Івано-Франківськом, а рух не надто інтенсивний. Більш інтенсивним є рух у напрямках 2 та 4. За напрямком 2 є сполучення з Тернополем, Івано-Франківськом також центральними, південними та східними областями України, де рух більш інтенсивний а тому концентрації NO₂ є дещо більшими у порівнянні з напрямком 3. Щодо напрямку 4, то він також є більш інтенсивним, оскільки за цим напрямком Львів сполучається з Ужгородом та пунктами пропуску на кордоні з Угорщиною, що спричиняє збільшення концентрації забруднювача у порівнянні з 3. Відмінності коефіцієнтів варіації свідчать про неоднакові коливання відносно середніх показників концентрації NO₂.

Середні значення концентрації NO не перевищують ГДК на жодному з напрямків. Проте найбільші значення цього показника спостерігаються на напрямку 6 та 7, а найменші – на 2 та 3. Це також узгоджується з важливістю відповідних напрямків та, відповідно, з інтенсивністю руху. Найбільші коефіцієнти варіації середніх значень на напрямках 6 та 2 вказують на розкид значень протягом інтервалу досліджень.

Забруднення атмосферного повітря SO₂ на перехрестях в'їзних магістралей теж не перевищує ГДК, а найбільші середні показники отримані для напрямків 1 та 6, найменші – для 2 та 4. Причому, для вимірів на напрямку 1 характерний найбільший

коефіцієнт варіації, що свідчить про значну нерівномірність викидів цього забруднювача упродовж періоду досліджень.

ГДК СО перевищують нормативні показники на всіх напрямках. Особливо великі значення концентрацій спостерігаються на напрямках 1, 6 та 7, а найменші – на напрямку 3. Коефіцієнти варіації є найвищими на напрямку 4.

Загалом за чотирма забруднювачами упродовж 2021-2023 років перевищення ГДК спостерігалось для СО до 22% та для NO₂ до 30%. За іншими показниками перевищень не було. Найменші коефіцієнти варіацій були для перехрестя на напрямку 5 (вул. Кульпарківська - вул. Виговського), що свідчить про стабільність інтенсивності руху у всі сезони. Високі коефіцієнти варіації не були характерними для якогось одного з напрямків. Це свідчить про нерівномірності інтенсивності дорожнього руху на окремих перехрестях, переважно для напрямків з інтенсивними потоками у бік Києва чи державного кордону.

Проведено аналіз динаміки забруднень на основних в'їздах. Оскільки для деяких напрямків є дані за більший період, ніж за 2021-2023 роки, тому проаналізовано саме їх.

Концентрації NO₂ нижчі за ГДК спостерігалися лише в окремі дати майже на всіх перехрестях. Під час більшості вимірювань фіксувалося їх перевищення. Також спостерігалися значні (понад вдвічі) перевищення допустимих концентрацій на напрямках 6 взимку 2021 року, на напрямках 2 і 5 восени 2018 року, та на напрямку 2 взимку 2022 року. На напрямках 1, 6 та 7 цей показник має тенденцію до зростання, а на інших напрямках – до спадання.

Концентрації NO, на відміну від NO₂, були переважно меншими за відповідні ГДК, окрім напрямків 1 і 6 взимку 2021 року, напрямку 4 навесні 2011 року, восени 2014 року і взимку 2019

року та напрямку 2 навесні 2021 року. На напрямках 1, 6 та 7 показник мав тенденцію до зростання, а на інших напрямках – до спадання.

Концентрація SO₂ ніде не перевищує норми ГДК та має тенденцію до зростання на напрямках в'їздів 1, 6 та 7 і спадання на інших напрямках.

Як і для інших забруднювачів, концентрація СО має тенденцію до зростання на напрямках 1, 6 та 7, а на решті – до спадання. Перевищення ГДК спостерігається майже у всіх вимірюваннях, окрім окремих дат.

На динаміку забруднення повітря впливає інтенсивність руху транспорту. Оскільки вимірювання інтенсивності руху потрібно проводити цілодобово на кожному в'їзді, що на

теперішній час не є можливим, для оцінювання трафіку вирішено скористатися даними мобільного оператора, які використано для досліджень міграції населення у місто Львів [32]. У наявному наборі даних міститься інформація про частки інтенсивності трафіку з інтервалом півгодини для будніх і вихідних днів, а також чисельність осіб, які здійснюють поїздки в місто через основні в'їзди. Оскільки кількість автомобілів за видами є невідомою, то можна зробити припущення, що обсяг забруднень пропорційний до кількості осіб, які в'їжджають у м. Львів. У таблиці 3 наведено дані про кількість осіб, які в'їжджають через основні в'їзди.

Таблиця 3

Чисельність осіб, які щоденно в'їжджають у м. Львів з основних напрямків за даними [36]

№ напрямку	Кількість осіб		
	будні дні	вихідні дні	середнє
1	6977	4170	5574
2	3085	3514	3300
3	779	528	654
4	3620	3523	3572
5	1919	868	1394
6	5410	2228	3819
7	1014	1295	1155

Найменша кількість осіб в'їжджає з напрямку 3, а найбільша – з 1. Для оцінювання наявності взаємозв'язку з цих показників

визначимо коефіцієнти кореляцій між середніми значеннями викидів та середньою кількістю осіб. Результати наведені в таблиці 4.

Таблиця 4

Коефіцієнти кореляції між кількістю осіб, які в'їжджають у м. Львів з основних напрямків та середніми концентраціями забруднювачів на перехрестях цих напрямків

Кількість осіб	Концентрації забруднювачів			
	NO ₂	NO	SO ₂	CO
у будні дні	0,56	0,27	0,81	0,60
у вихідні дні	0,04	-0,19	0,41	0,41
середня	0,38	0,10	0,69	0,55

Найбільші значення коефіцієнтів кореляцій отримані для кількостей осіб, які в'їжджають у будні дні з майже усіма забруднювачами, окрім NO (значимим є коефіцієнт кореляції між концентраціями SO₂ та кількостями осіб). Дещо нижчими є коефіцієнти кореляцій між концентраціями забруднювачів та середніми кількостями осіб (також окрім NO). І найнижчими є коефіцієнти кореляцій для кількостей осіб у вихідні дні, зокрема близький до 0 для NO₂ та зворотній кореляційний зв'язок для NO. Звідси слідує, що дані про викиди стосуються будніх днів та між цими показниками і кількостями осіб, які в'їжджають з відповідних напрямків, існують прямі кореляційні зв'язки, причому сильною є

залежність для SO₂, середніми – залежності для NO₂ і CO та слабкою – для NO.

Для прогнозування концентрацій викидів на перехрестях основних напрямків в'їзду побудуємо лінійні регресійні залежності цих показників від кількості осіб, що в'їжджають у місто у будні дні. Рівняння регресій запишемо у вигляді

$$c_j = a_j n + b_j, \quad (1)$$

де c_j – концентрація j -го забруднювача, мг/м³ ($j = 1 - \text{NO}_2, j = 2 - \text{NO}, j = 3 - \text{SO}_2, j = 4 - \text{CO}$),

n – середня кількість осіб, які в'їжджають протягом дня,

a_j та b_j – коефіцієнти регресії (таблиця 5).

Таблиця 5

Коефіцієнти рівнянь лінійних регресійних залежностей концентрацій забруднювачів від кількості осіб, які в'їжджають у м. Львів

Забруднювач	Номер забруднювача, j	Коефіцієнти рівняння регресії (3.1)	
		a_j	b_j
NO ₂	1	$4 \cdot 10^{-6}$	0,2208
NO	2	$3 \cdot 10^{-6}$	0,2371
SO ₂	3	$6 \cdot 10^{-6}$	0,1003
CO	4	$8 \cdot 10^{-5}$	5,5679

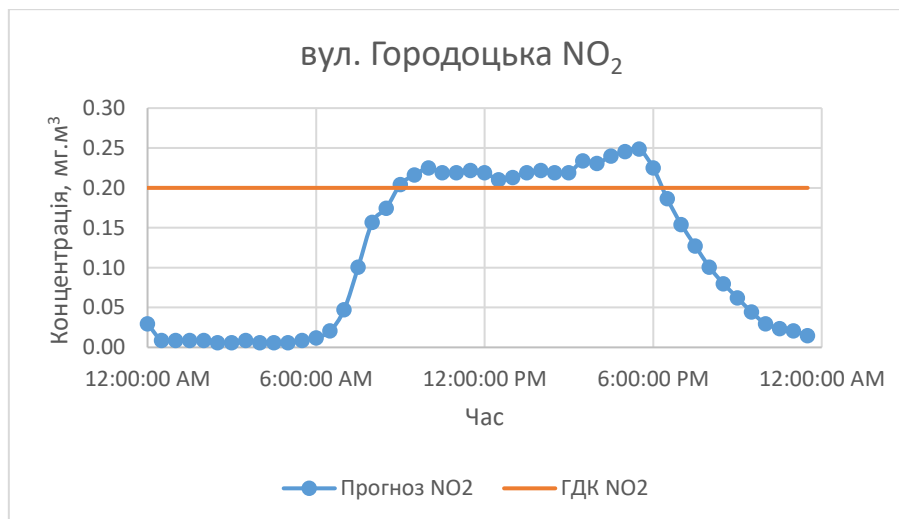
Врахувавши (1) та припущення про пропорційність концентрації до кількості осіб, які в'їжджають з відповідних напрямків, формули для прогнозування динаміки концентрації забруднювачів j на основних в'їздах i залежно від часу доби матимуть вигляд:

$$c_{ij}(t) = (a_j \cdot n_i + b_j) \frac{k_i(t)}{\max\{k_i(t), 0 \leq t < 24\}} \quad (2)$$

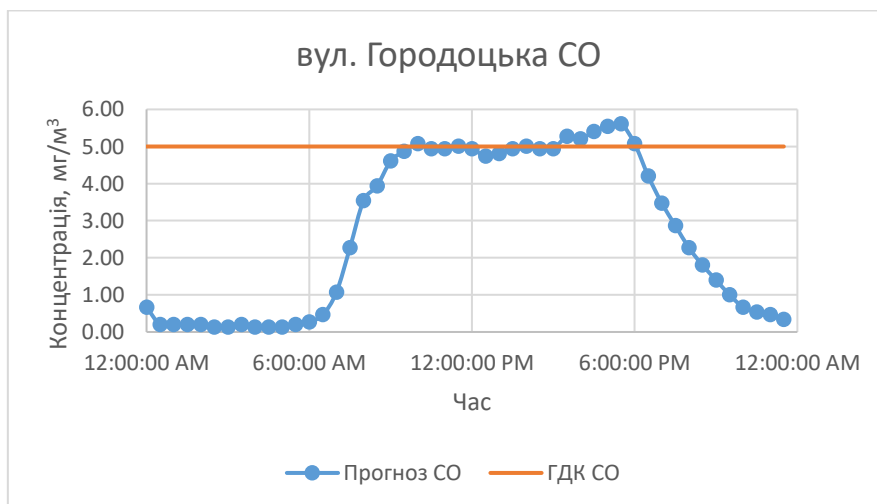
де n_i – кількість осіб, які в'їжджають-виїжджають протягом дня з i -го напрямку,

$k_i(t)$ – частка від середньої кількості людей, які проїжджають на i -му напрямку у визначений часовий півгодинний інтервал з початком у t , за даними [32].

За допомогою моделей (2) можна прогнозувати концентрації забруднювачів на основних в'їздах у місто Львів упродовж доби. Наприклад, для забруднювачів, які перевищують ГДК на в'їзді 6 (вул. Городоцька) залежності концентрацій від часу доби з використанням (2) зображені на рис. 2.



а)



б)

Рисунок 2 – Динаміка концентрацій забруднювачів упродовж доби у будні дні на в'їзді 6 (вул. Городоцька): а – NO₂, б – CO

Аналогічні залежності отримано і для інших напрямків та забруднювачів. Для більшості в'їздів перевищення ГДК характерне для ранкових і вечірніх годин, що є результатом щоденної міграції населення з приміських зон. Проте на деяких в'їздах, зокрема 1 (вул. Хмельницького), 3 (вул. Зелена), та 6 (вул. Городоцька) інтенсивність трафіку є високою не лише вранці і ввечері, але і протягом дня, що можна пояснити рухом транзитного автотранспорту. За отриманими залежностями можна рекомендувати населенню обмежити перебування на відповідних вулицях в періоди перевищення ГДК забруднювачів, а міській владі шукати вирішення проблеми на основі удосконалення схем дорожнього руху, наприклад будівництва нових паралельних в'їздів, транспортних розв'язок, об'їзних доріг та ін. Підвищення ефективності приміського пасажирського транспорту дасть змогу зменшити кількість транспортних засобів, власники яких зможуть щоденно добиратися до міста і повертатися додому зручним громадським транспортом.

Висновки

1. Концентрація викидів від автотранспорту на основних напрямках в'їздів може перевищувати ГДК для NO₂, CO, на деяких для NO та не перевищує нормативних показників для SO₂. Середні значення майже всіх цих показників є найбільшими на напрямках 1, 6 та 7. За період 2021-2023 років максимальне перевищення середнього значення ГДК спостерігалось для CO до 22% та для NO₂ до 30%. За іншими показниками перевищень не було. Найменші коефіцієнти варіацій середніх значень для всіх забруднювачів були для перехресть на напрямку 5 (вул. Кульпарківська - вул. Виговського), що свідчить про стабільність інтенсивності руху в усі сезони.

2. За даними моніторингу мобільності населення на основних в'їздах та забруднення атмосферного повітря побудовано модель, яка дає можливість прогнозувати концентрації забруднювачів упродовж доби.

3. Вирішенням проблеми забруднень атмосферного повітря на в'їздах у місто можна вирішити удосконаленням схем дорожнього руху та роботи пасажирського приміського транспорту, що зменшить потоки транзитного та індивідуального автотранспорту.

Список літератури:

1. Kumar P.G., Lekhana P., Tejaswi M., Chandrakala S. Effects of vehicular emissions on the urban environment- a state of the art. *Materials Today : Proceedings*. 2021. Vol. 45, part 7. Pp. 6314-6320. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.739>.

2. Ayetor G.K., Mbonigaba I., Ampofo J., Sunnu A. Investigating the state of road vehicle emissions in Africa: A case study of Ghana and

Rwanda. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*. 2021. 11. 100409. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trip.2021.100409>.

3. Марченко А.П., Парсаданов І.В., Строков О.П. Двигуни внутрішнього згоряння та навколишнє середовище. *Двигуни внутрішнього згоряння*. 2022. 2. С. 3-12. DOI: <https://doi.org/10.20998/0419-8719.2022.2.01>.

4. Цілі сталого розвитку Україна-2021. Моніторинговий звіт. Державна служба статистики України. 2021. URL: https://www.ukrstat.gov.ua/csr_present/2020/ukr/st_rozv/publ/SDGs%20Ukraine%202021%20Monitoring%20Report%20ukr.pdf

5. Обсяг перевезених вантажів за видами транспорту. Головне управління статистики у Львівській області. 2020. URL: lv.ukrstat.gov.ua/ukr/si/year/2020/t089920_5.docx

6. Бевз О. В., Магопець С. О., Матвієнко О. О. Вплив автомобільного транспорту на повітряний басейн міста Кіровограда. *Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація : зб. наук. пр.* 2015. 28. С. 144-149.

7. Бевз О. В. Оцінка впливу автомобільного транспорту на якість повітряного середовища Кіровоградщини. *Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація : зб. наук. пр.* 2008. 21. С. 273-277.

8. Книш Ю.В., Копій М.Л. Шляхи зменшення шкідливих викидів автотранспорту у навколишнє середовище. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2014. 24.3. с. 81-86.

9. Викиди забруднюючих речовин у атмосферне повітря від пересувних джерел забруднення. Державна служба статистики України. 2021. URL: https://www.ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2021/ns/xl/vuk_per_20ue.xlsx

10. Вулиці та дороги населених пунктів : ДБН В.2.3-5:2018. К. : *Мінрегіон України*, 2018. 61 с.

11. Склад і зміст матеріалів оцінки впливів на навколишнє середовище (ОВНС) : ДБН А.2.2-1:2021. К.: *Мінрегіон України*, 2022. 26 с.

12. Паньків Н.Є., Тетерко Н.З. Оцінювання забруднення атмосферного повітря внаслідок завантаженості вулиць Львова автотранспортом. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2016. 26(8). С. 215-223. DOI: <https://doi.org/10.15421/40260834>

13. Петровська М., Морквич В. Аналіз впливу автотранспорту на забруднення атмосферного повітря перехресть вулиць Львова монооксидом карбону. *Вісник Львівського університету. Серія географічна*. 2014. 47. С. 217-223.

14. Автомобільні дороги. Оцінка впливу на навколишнє середовище. Вимоги до проектної

документації : ДСТУ 9030:2020. К. : УкрНДНЦ, 2021. 25 с.

15. Бойків М. В., Аліксітчук Л. С. Оцінка рівня викидів CO₂ автомобілями на магістральних вулицях міста Львова. *Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Серія: Динаміка, міцність та проектування машин і приладів.* 2019. 910. С. 68-73.

16. Согор А. Р., Зазуляк П. М., Квока Р. І. Веб-картографування якості життя населення м. Львів за показником екологічного забруднення атмосферного повітря. *Молодий вчений.* 2020. 10(86). С. 191-197. DOI: <https://doi.org/10.32839/2304-5809/2020-10-86-41>

17. Согор А. Р., Зазуляк, П. М. Картографування екологічного забруднення повітря міста Львів. *Космічні матеріали та технології*, 2022. 28(3). С. 86-91.

18. Бей Л. Вплив викидів автотранспорту на здоров'я дитячого населення львівської урбосистеми. *Географічна наука і практика: виклики епохи* : Матеріали міжнародної наукової конференції, присвяченої 130-річчю географії у Львівському університеті (м. Львів, 16–18 травня 2013 р.). Львів: Видавничий центр ЛНУ імені Івана Франка, 2013. 3. С. 142-145.

19. Сиротюк М. І., Білоус Л. Б., Сиротюк О. С. Забруднення повітряного басейну міста Львова та заходи щодо його зменшення. *Науковий вісник НЛТУ України.* 2003. 13.5. С. 256-260.

20. Shukla P.K., Sharmila S. A., Shaikh N., Sharma A., Singh R. Air Pollution Monitoring by Indulging AI and IoT for Environmental Protection. *The 3rd International Conference on Pervasive Computing and Social Networking ICPCSN 2023* : Proceedings (Salem, June 19-20, 2023). Pp. 1161 – 1165. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICPCSN58827.2023.00197>.

21. Поліщук О., Лесів М., Антоняк Г. Вплив транспортного навантаження на акумуляцію металів у рослинах на території м. Львова. *Вісник Львівського університету. Серія біологічна.* 2020. 82. С. 101-109.

22. Поліщук О. І., Антоняк Г. Л. Вплив транспортного навантаження на елементний склад ґрунту у приміській зоні м. Львова. *Екологічні науки.* 2021. 5.38. С. 81-86.

23. Zhu S., Qiao Y., Peng W., Zhao Q., Li Z., Liu X., Wang H., Song G., Yu L., Shi L., Lan Q. An Experimental Framework of Particulate Matter Emission Factor Development for Traffic Modeling. *Atmosphere.* 2023. 14(4). 706. <https://doi.org/10.3390/atmos14040706>.

24. Оліферчук В. П., Кокот В. Р., Гарник Т. П., Уманець, Н. С. Вплив забруднення атмосферного повітря викидами автотранспорту

на стан здоров'я школярів міста Львова. *Науковий вісник НЛТУ України.* 2003. 13.5. С. 125-131.

25. 2030 climate targets. Climate actions. 2024. URL: https://climate.ec.europa.eu/eu-action/climate-strategies-targets/2030-climate-targets_en

26. EU ban on the sale of new petrol and diesel cars from 2035 explained. Topics. European Parliament. 2024. URL: <https://www.europarl.europa.eu/topics/en/article/20221019STO44572/eu-ban-on-sale-of-new-petrol-and-diesel-cars-from-2035-explained>.

27. Discover More About E-Fuels... Sustain Classics. 28.02.2024. URL: <https://sustainclassic.com/sustainable-fuel/synthetic-fuels/efuels/>

28. Карти якості повітря. SaveEcoBot. 2024. URL: <https://www.saveecobot.com/maps>.

29. Станція моніторингу якості повітря. Екозагроза. 2024. URL: https://ecozagroza.gov.ua/map/?layer=air_pollution.

30. Карта моніторингу якості повітря Eco City. 2024. URL: <https://eco-city.org.ua/>.

31. ЛУН Місто AIR. 2024. URL: <https://misto.lun.ua/air>.

32. Хімічна лабораторія КП «Адміністративно-технічне управління». Львівська міська рада. 2024. URL: <https://city-adm.lviv.ua/lmr/khimichna-laboratoriia/2814-khimichna-laboratoriia-kp-administrativno-tekhniche-upravlinnia>

33. Дивак М. П., Манжула В. І., Мельник А. М., Тимчишин В. С. Система моніторингу забруднення повітря автотранспортом на базі автономного аеромобільного вимірювального комплексу. *Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології.* 2021. 42(2). С. 73–83.

34. Наказ Міністерства охорони здоров'я України Про затвердження гігієнічних регламентів допустимого вмісту хімічних і біологічних речовин в атмосферному повітрі населених місць: прийнятий 14 січня 2020 року № 52.

35. Результати вимірювань забруднюючих речовин на перехрестях м. Львова (дані моніторингу). Відкриті дані Львова. 2024. URL: <https://opendata.city-adm.lviv.ua/dataset/air-pollutant-measurements-lviv>

36. Аналіз обсягу приміської мобільності до м. Львів. Відкриті дані Львова. URL: <https://opendata.city-adm.lviv.ua/vi/dataset/suburban-mobility>

References:

1. Kumar, P.G., Lekhana, P., Tejaswi, M., Chandrakala, S. (2021). Effects of vehicular emissions on the urban environment- a state of the art. *Materials Today: Proceedings*, 45(7), 6314-6320. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.739>.

2. Ayetor, G.K., Mbonigaba, I., Ampofo, J., Sunnu, A. (2021). Investigating the state of road vehicle emissions in Africa: A case study of Ghana and Rwanda. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 11, 100409. <https://doi.org/10.1016/j.trip.2021.100409>.
3. Marchenko, A.P., Parsadanov, I.V., Stokov, O.P. (2022). Dvyhuny vnutrishnoho zghoriannia ta navkolyshnie seredovyshe [Internal combustion engines and environment]. *Internal Combustion Engines – Internal combustion engines*, 2, 3-12. <https://doi.org/10.20998/0419-8719.2022.2.01> [in Ukrainian].
4. Sustainable development goals of Ukraine-2021. Monitoring report. State Statistics Service of Ukraine. [Tsili staloho rozvytku Ukraina-2021. Monitorynhovyi zvit. Derzhavna sluzhba statystyky Ukrainy] (2021). Retrieved from https://www.ukrstat.gov.ua/csr_prezent/2020/ukr/st_rozv/publ/SDGs%20Ukraine%202021%20Monitoryng%20Report%20ukr.pdf [in Ukrainian].
5. Obsiah perevezenykh vantazhiv za vydamy transportu. Holovne upravlinnia statystyky u Lvivskii oblasti [Volume of transported goods by types of transport. Main Department of Statistics in Lviv Region]. (2020). Retrieved from https://www.ukrstat.gov.ua/csr_prezent/2020/ukr/st_rozv/publ/SDGs%20Ukraine%202021%20Monitoryng%20Report%20ukr.pdf [in Ukrainian].
6. Bevz, O. V., Magopec, S. O., Matvienko, O. O. (2015). Vplyv avtomobilnoho transportu na povitrianyi basin mista Kirovohrada [Influence of motor transport on the air pool of city of Kirovograd]. *Tekhnika v silskohospodarskomu vyrobnytstvi, haluzeve mashynobuduvannia, avtomatyzatsiia – Machinery in agricultural production, industrial engineering, automation*, 28, 144-149 [in Ukrainian].
7. Bevz, O. V. (2008). Otsinka vplyvu avtomobilnoho transportu na yakist povitrianoho seredovysheha Kirovohradshchyny [Assessment of the impact of road transport on the air quality of Kirovohrad Region]. *Tekhnika v silskohospodarskomu vyrobnytstvi, haluzeve mashynobuduvannia, avtomatyzatsiia – Machinery in agricultural production, industrial engineering, automation*, 21, 273-277 [in Ukrainian].
8. Knysh, Yu.V., Kopyi, M.L. (2014). Shliakhy zmenshennia shkidlyvykh vykydiv avtotransportu u navkolyshnie seredovyshe [Some Ways to Reduce Harmful Automobile Emissions into the Environment]. *Naukovyi visnyk NLTU Ukrainy – Scientific Bulletin of UNFU*, 24(3), 81-86 [in Ukrainian].
9. Vykydy zabrudniuiuchykh rehovyn u atmosferne povitria vid peresuvnykh dzherel zabrudnennia. Derzhavna sluzhba statystyky Ukrainy [Emissions of pollutants into atmospheric air from mobile sources of pollution State Statistics Service of Ukraine]. (2021). Retrieved from https://www.ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2021/ns_xl/vuk_per_20ue.xlsx [in Ukrainian].
10. Vulytsi ta dorohy naselenykh punktiv [Streets and roads of settlements] (2018). DBN V.2.3-5:2018. *Minrehion Ukrainy* [in Ukrainian].
11. Sklad i zmist materialiv otsinky vplyviv na navkolyshnie seredovyshe (OVNS) [Composition and content of environmental impact assessment materials (EIA)] (2021). DBN A.2.2-1:2021. *Minrehion Ukrainy* [in Ukrainian].
12. Pankiv, N. E., Teterko, N. Z. (2016). Otsiniuvannia zabrudnennia atmosfernoho povitria vnaslidok zavantazhenosti vulyts Lvova avtotransportom [Estimation of atmospheric air pollution caused by traffic congestion in Lviv]. *Naukovyi visnyk NLTU Ukrainy – Scientific Bulletin of UNFU*, 26(8), 215-223. <https://doi.org/10.15421/40260834> [in Ukrainian].
13. Petrovska, M., Morkvych, V. (2014). Analiz vplyvu avtotransportu na zabrudnennia atmosfernoho povitria perekhrest vulyts Lvova monooksydom karbonu [Analysis of the influence of motor transport on the outdoor air pollution by carbon monoxide of the Lviv city crossroads]. *Visnyk Lvivskoho universytetu. Seriiia heohrafichna – Bulletin of Lviv University. Geographical series*, 47, 217-223 [in Ukrainian].
14. Avtomobilni dorohy. Otsinka vplyvu na navkolyshnie seredovyshe. Vymohy do proektnoi dokumentatsii {Automobile roads. Environmental impact assessment. Requirements for project documentation] (2021). DSTU 9030:2020. Kyiv: Derzhstandart Ukraine [in Ukrainian].
15. Bojkiv, M., Aliksiichuk, L. (2019). Otsinka rivnia vykydiv SO₂ avtomobiliamy na mahistralnykh vulytsiakh mista Lvova [Evaluation of CO₂ emissions by cars on the arterial streets of Lviv city]. *Visnyk Natsionalnoho universytetu "Lvivska politekhnika". Seriiia: Dynamika, mitsnist ta proektuvannia mashyn i prykladiv – Bulletin of the Lviv Polytechnic National University. Series: Dynamics, strength and design of machines and devices*, 910, 68-73 [in Ukrainian].
16. Sohor, A., Zazuliak, P., Kvoka, R. (2020). Veb-kartohrafuvannia yakosti zhyttia naselennia m. Lviv za pokaznykom ekolohichnoho zabrudnennia atmosfernoho povitria [Web-mapping of the quality of life of the population of Lviv according to the indicator of environmental pollution of atmospheric air]. *Molodyi vchenyi – Young Scientist*, 10(86), 191-197. <https://doi.org/10.32839/2304-5809/2020-10-86-41> [in Ukrainian].
17. Sohor, A. R., Zazuliak, P. M. (2022). Kartohrafuvannia ekolohichnoho zabrudnennia povitria mista Lviv [Mapping of environmental pollution of air in Lviv]. *Kosmichni materialy ta*

tehnologii – *Space materials and technologies*, 28(3), 86-91 [in Ukrainian].

18. Bei L. (2013). Vplyv vykydiv avtotransportu na zdorov'ia dytiachoho naseleння lvivskoi urbosystemy [The impact of motor vehicle emissions on the health of children in the Lviv urban system]. In *Heohrafichna nauka i praktyka: vyklyky epokhy* [Geographical science and practice: challenges of the era]: Proceedings of International Scientific Conference dedicated to the 130th anniversary of geography at Lviv University (pp. 142-145)/ May 16–18, 2013 Lviv, Ukraine [in Ukrainian].

19. Syrotiuk, M. I., Bilous, L. B., Syrotiuk, O. S. (2003). Zabrudnennia povitrianoho baseinu mista Lvova ta zakhody shchodo yoho zmeshennia [Air pollution of the city of Lviv and measures to reduce it]. *Naukovyi visnyk NLTU Ukrainy – Scientific Bulletin of UNFU*, 13.5, 256-260 [in Ukrainian].

20. Shukla, P.K., Sharmila, S. A., Shaikh, N., Sharma, A., Singh, R. (2023). Air Pollution Monitoring by Indulging AI and IoT for Environmental Protection. *The 3rd International Conference on Pervasive Computing and Social Networking, ICPCSN 2023: Proceedings*, (pp. 1161-1165). June 19-20, 2023. Salem, India. <https://doi.org/10.1109/ICPCSN58827.2023.00197>

21. Polishchuk, A., Antonyak, H. (2021). Vplyv transportnoho navantazhennia na akumulatsiiu metaliv u roslynakh na terytorii m. Lvova [The influence of transport load on the accumulation of metals in plants in the territory of the city of Lviv]. *Visnyk Lvivskoho universytetu. Seriya biologichna – Bulletin of Lviv University. Biological series*, 82, 101-109 [in Ukrainian].

22. Polishchuk A., Antonyak, H. (2021). Influence of transport load on the elemental composition of soil in the suburban area of the city of Lviv [Influence of transport load on the elemental composition of soil in the suburban area of the city of Lviv]. *Ekologichni nauky – Environmental sciences*, 5.38, 81-86 [in Ukrainian].

23. Zhu, S., Qiao, Y., Peng, W., Zhao, Q., Li, Z., Liu, X., Wang, H., Song, G., Yu, L., Shi, L., Lan, Q. (2023). An Experimental Framework of Particulate Matter Emission Factor Development for Traffic Modeling. *Atmosphere*, 14(4), 706. <https://doi.org/10.3390/atmos14040706>.

24. Olierchuk, V. P., Kokot, V. R., Harnyk, T. P., Umanets, N. S. (2003). Vplyv zabrudnennia atmosferneho povitria vykydamy avtotransportu na stan zdorovia shkoliariv mista Lvova [The influence of atmospheric air pollution by vehicle emissions on the health of schoolchildren in the city of Lviv]. *Naukovyi visnyk NLTU Ukrainy – Scientific Bulletin of UNFU*, 13(5), 125-131 [in Ukrainian].

25. 2030 climate targets. Climate actions. (2024). Retrieved from https://climate.ec.europa.eu/eu-action/climate-strategies-targets/2030-climate-targets_en.

26. EU ban on the sale of new petrol and diesel cars from 2035 explained. Topics. European Parliament. (2022). Retrieved from: <https://www.europarl.europa.eu/topics/en/article/20221019STO44572/eu-ban-on-sale-of-new-petrol-and-diesel-cars-from-2035-explained>.

27. Discover More About E-Fuels. Sustain Classics. (2024). Retrieved from <https://sustainclassic.com/sustainable-fuel/synthetic-fuels/efuels/>

28. Air quality maps. SaveEcoBot. (2024). Retrieved from <https://www.saveecobot.com/maps>

29. Air quality monitoring station. Ekozagroza. (2024). Retrieved from https://ekozagroza.gov.ua/map/?layer=air_pollution [in Ukrainian].

30. Air quality monitoring map Eco City. (2024). Retrieved from <https://eco-city.org.ua/> [in Ukrainian].

31. LUN City AIR. (2024). Retrieved from <https://misto.lun.ua/air> [in Ukrainian].

32. Khimichna laboratoriiia KP «Administratyvno-tehnicne upravlinnia». Lvivska miska rada [Chemical laboratory of KP "Administrative and technical management". Lviv City Council]. (2024). Retrieved from <https://city-adm.lviv.ua/lmr/khimichna-laboratoriia/2814-khimichna-laboratoriia-kp-administratyvno-tehnicne-upravlinnia> [in Ukrainian].

33. Dyvak, M., Manzhyula, V., Melnyk, A., Tymchyshyn, V. (2021). Systema monitorynhu zabrudnennia povitria avtotransportom na bazi avtonomnoho aeromobilnoho vymiriuvnoho kompleksu [A System for Monitoring Air Pollution by Motor Vehicles Based on an Autonomous Air-Mobile Measuring Complex]. *Optyko-elektronni informatsiino-enerhetychni tehnologii – Optoelectronic Information-Power Technologies*, 42(2), 73–83 [in Ukrainian].

34. Results of measurements of pollutants at intersections in Lviv (monitoring data). Open data of Lviv. (2024). Retrieved from <https://opendata.city-adm.lviv.ua/dataset/air-pollutant-measurements-lviv> [in Ukrainian].

35. Nakaz Ministerstva okhorony zdorov'ia Ukrainy Pro zatverdzhennia hihienichnykh rehlamentiv dopustymoho vmistu khimichnykh i biologichnykh rehovyn v atmosfernomu povitri naselenykh mist: pryiniaty 14 sichnia 2020 roku № 52 [Order of the Ministry of Health of Ukraine On the approval of hygienic regulations on the permissible content of chemical and biological substances in the

atmospheric air of populated areas from 14.01.2020 № 52] [in Ukrainian].

36. Analiz obsiahu prymiskoi mobilnosti do m. Lviv. Vidkryti dani Lvova [Analysis of the volume of

suburban mobility to the city of Lviv. Open data of Lviv]. (2024). Retrieved from <https://opendata.city-adm.lviv.ua/vi/dataset/suburban-mobility> [in Ukrainian].

© А. Д. Кузик, І. З. Думас, О. Т. Олійник, 2024.

Науково-методична стаття.

Надійшла до редакції 29.04.2024.

Прийнято до публікації 12.06.2024.