

UDC 504.06

Vasyl M. Trysnyuk, Dr. Sc. (Tech)

ORCID 0000-0001-9920-4879, *e-mail*: trysnyuk@ukr.net

Viktor O. Shumeiko, PhD (Tech)

ORCID 0000-0002-0285-4566, *e-mail*: shy1983@ukr.net

Yuriy M. Holowan, graduate student

ORCID 0000-0001-7050-9310, *e-mail*: dirrecta@gmail.com

Institute of Telecommunications and Global Information Space of NASU, Kyiv, Ukraine

MECHANISM TO DETERMINE QUANTITATIVELY CHARACTERIZE THE LEVEL OF CONCENTRATION OF POLLUTANTS EMISSIONS ROAD TRANSPORT

***Summary.** The basic mechanisms of pollution of the surface atmosphere and upper soil layer emission car transport roadside strip. Road transport, together with heavy industry, is one of the main air pollutants. Exhaust gases, crankcase gases, smoke, soot lead to complex chemical reactions in the surface layer of the atmosphere. Presented a number of methods to assess the level of contamination, analyses their strengths and weaknesses. Considered methodology issuance previous forecast spread of contamination including disturbing factors and their impact on the concentration of contaminants, as well as mathematical tools to determine the quantitative characteristics of concentration levels pollutants substances. The developed methodology is one of the ways to issue a preliminary forecast of the spread of pollution, taking into account disturbing factors in the presence of a priori data. This methodology takes into account a set of factors influencing the level of pollution concentration and the empirically obtained functional dependences of the influence of each of the disturbing components on the level of pollution. The constructed model of interaction of the established factors in the form of the graph of interaction characterizes causal relations.*

***Keywords:** landscapes by element maps; geocological ground; ecosystem; background content*

В.М. Триснюк, В.О. Шумейко, Ю.М. Голован

Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України,
м. Київ, Україна

МЕХАНІЗМ ВИЗНАЧЕННЯ КІЛЬКІСНИХ ХАРАКТЕРИСТИК РІВНЯ КОНЦЕНТРАЦІЇ ЗАБРУДНЮЮЧИХ РЕЧОВИН ВИКИДАМИ АВТОМОБІЛЬНОГО ТРАНСПОРТУ

***Анотація.** Проаналізовано основні механізми забруднення приземного шару атмосфери і верхнього ґрунтового шару викидами автомобільного транспорту у придорожній смузі. Автомобільний транспорт разом із важкою промисловістю відноситься до основних забруднювачів атмосфери. Відпрацьовані гази, картерні гази, дими, сажка призводять до складних хімічних реакцій в приземному шарі атмосфери. Наведено ряд методів оцінки рівня забруднення, проаналізовано їх сильні та слабкі місця. Розглянута методологія видачі попереднього прогнозу розповсюдження забруднення*

© В.М. Триснюк, В.О. Шумейко, Ю.М. Голован, 2021

ISSN: 2411-4049. Екологічна безпека та природокористування, № 2 (38), 2021

з урахуванням збурюючих чинників та їх впливу на рівень концентрації забруднень, а також математичний апарат для визначення кількісних характеристик рівня концентрації забруднюючих речовин. Розроблена методологія є одним зі способів видачі попереднього прогнозу розповсюдження забруднень з урахуванням збурюючих чинників за наявності апріорних даних. В даній методології враховуються сукупність чинників впливу на рівень концентрації забруднень і отримані емпіричним шляхом функціональні залежності впливу кожної зі збурюючих складових на рівень забруднення. Побудована модель взаємодії встановлених чинників у вигляді графа взаємодії характеризує причинно-наслідкові відносини.

Ключові слова: ландшафти; поелементні карти; геоекологічний полігон; екосистема; фоновий вміст

DOI: 10.32347/2411-4049.2021.2.79-93

Постановка проблеми

Проблема забруднення довкілля викидами автомобільного транспорту залишається надзвичайно актуальною протягом вже достатньо довгого часу, і в майбутньому її актуальність буде тільки зростати. Масштаби забруднення збільшуються пропорційно до темпів автомобілізації суспільства. Найбільш негативні наслідки автотранспортне забруднення складає для територій, що знаходяться поблизу основних автошляхів. В рамках таких придорожніх смуг концентрація шкідливих речовин може перевищувати ГДК в декілька разів. Вплив транспортних викидів відчувається на відстані 1–2 км від автодороги та розповсюджується на висоту близько 300 м.

Поточна ситуація потребує розробки і впровадження комплексу методів кількісної оцінки масштабу забруднень конкретної ділянки придорожньої смуги. Масштаби та специфіка забруднення залежать від низки чинників: завантаженості автодороги, типу транспорту, який є переважним на даній ділянці (маються на увазі перш за все технічні характеристики двигуна внутрішнього згоряння), рельєфу місцевості, поточних метеорологічних умов та загальної характеристики клімату, наявності та параметрів захисних лісосмуг тощо. Також проблема потребує розробки математично обґрунтованої методики прогнозування розподілу викидів в рамках придорожньої смуги.

Аналіз останніх досліджень. Проблеми моделювання забруднення земель вздовж автомобільних доріг, на чому ґрунтуються екологічний аудит, екологічний моніторинг та екологічна безпека, розглянуті в багатьох опублікованих роботах. Для України велике значення щодо висвітлення проблем екологічної оцінки мають праці О.М. Трофимчука [1], О.С. Бутенко [7], І.М. Волошина [2], О.М. Адаменка [3], В.М. Гуцуляка [4] та багатьох інших дослідників.

Метою роботи є дослідження впливу забруднення земель вздовж автомобільних доріг за допомогою комп'ютерно-картографічного моделювання та побудови поелементних еколого-техногеохімічних карт.

Виклад основного матеріалу

В першу чергу необхідно провести аналіз основних чинників і компонентів забруднення.

Спектр хімічних речовин, що виділяються під час руху автотранспорту, є достатньо широким. Їх можна поділити на дві великі категорії. Перша група

токсичних речовин пов'язана з хімічними реакціями окислення палива, що протікають як в період перед згорянням, так і в процесі згоряння. Друга група токсичних речовин утворюється при з'єднанні азоту і надмірного кисню в продуктах згоряння.

Під час роботи двигуна внутрішнього згоряння джерелами викидів шкідливих речовин є відпрацьовані гази (далі – ВГ), картерні гази та продукти випаровування із системи живлення. Серед цих джерел основним є ВГ, які мають складний хімічний склад: більше 1000 різних шкідливих речовин, які чинять негативний вплив на довкілля, і лише 200 з них розпізнано. Основними є: оксид вуглецю CO, вуглеводні (загальна формула C_xH_y), оксиди азоту (NO), канцерогенні речовини, до яких належать складні ароматичні вуглеводні поліциклічної будови (найпоширенішим є бенз(а)пірен $C_{20}H_{12}$), альдегіди (RНСO), сполуки свинцю (PbO_4) і сажа (С). В картерних газах і випаровуваннях містяться, в основному, вуглеводні [4, 7, 8].

Процентний розподіл між трьома джерелами шкідливих викидів характеризується в табл. 1.

Таблиця 1 – Процентний розподіл між трьома джерелами шкідливих викидів

	CO	C_xH_y	NO _x
Відпрацьовані гази	100	55	100
Картерні гази	-	25	-
Випаровування палива	-	20	-

Також рух автотранспорту призводить до відкладення сполук важких металів. Важкі метали відкладаються в придорожніх смугах як в результаті роботи власне автотранспортних засобів, так і при стиранні полотна дороги. В результаті стирання автомобільних шин в ґрунті поблизу автодороги осідають такі елементи, як алюміній, кобальт, мідь, залізо, цинк, кадмій, свинець та ін. Первинну їх дію відчувають рослинні організми.

Бензинові та дизельні ДВЗ мають свої переваги та недоліки в контексті забруднення навколишнього середовища. Гранично допустима концентрація шкідливих речовин у складі їх ВГ також різняться (табл. 2).

Таблиця 2 – ГДК шкідливих речовин у складі ВГ для двигунів двох основних категорій

Назва речовини	Бензинові	Дизелі
Оксид вуглецю (CO), %	10	0,3
Вуглеводні (C_xH_y), %	2	0,5
Оксиди азоту (NO _x), %	0,6	0,2
Альдегіди (RНСO), %	0,2	0,05
Двооксид сірки (SO ₂), мг/м ³	0,003	0,015
Сажа, мг/м ³	100	2000
Сполуки свинцю, мг/м ³	60	0
Канцерогени (бенз(а)пірен), мг/м ³	25	10

Як бачимо, викиди основних забруднюючих речовин значно нижче в дизельних ДВЗ. Проте вони відрізняються підвищеними викидами сажі, що утворюється унаслідок перевантаження палива. Сажа насичена

канцерогенними вуглеводнями і мікроелементами; їх викиди в атмосферу неприпустимі [9, 10, 11].

Використання дизелю дає можливість запобігти викидам в атмосферу сполук свинцю. Але цьому можна запобігти і в разі невикористання етильованого палива у бензинових ДВЗ.

Також масштаб та характер забруднення залежить від швидкості руху автомобіля. Ця залежність має непрямий характер. Відомо, що найбільш забрудненими є центральні вулиці великих міст. Це трапляється не лише з причини високого рівня автомобілізації на даних автошляхах, а й з тієї причини, що при автомобільних «пробках» та великій кількості світлофорів двигун багато часу проводить на холостому ході, що призводить до надзвичайно великих викидів.

До того ж спрацьовує ряд інших чинників, що впливають на режим руху автомобіля. Це, наприклад, рельєф місцевості та якість покриття автодороги. Ідеальним є постійний рух зі швидкістю 60 км/год, відповідно, покриття низької якості та розчленований рельєф (наприклад, гірський) є додатковими чинниками, що збільшують забруднення (при гальмуванні та прискоренні, чергування яких за таких умов є постійним, загальний об'єм викидів зростає у 8 разів) [12].

Викиди автотранспорту розподіляються в основному в приземному шарі атмосфери, а також в зоні аерації ґрунтового покриву. Розглянемо механізми цього розподілу.

Автомобільний транспорт разом із важкою промисловістю відноситься до основних забруднювачів атмосфери. Відпрацьовані гази, картерні гази, дими, сажа призводять до складних хімічних реакцій в приземному шарі атмосфери. Результатом таких реакцій є синтез небезпечних для екосистеми речовин, таких як озон, утворення фотохімічного смогу, підвищення середньої температури повітря, що призводить до появи «парникового ефекту». Автомобільні викиди розповсюджуються і трансформуються в атмосфері за певними закономірностями. Так, тверді частинки розміром більше 0,1 мм осідають на підстилаючих поверхнях (в основному через дію гравітаційних сил) і забруднюють ґрунтовий покрив. Частинки, розмір яких менше 0,1 мм, а також газові домішки у вигляді CO, C_xH_y, NO_x, SO_x розповсюджуються в атмосфері під впливом процесів дифузії. Вони вступають в процеси фізико-хімічної взаємодії між собою і з компонентами атмосфери, і їх дія виявляється на локальних територіях в межах певних регіонів [9].

Ступінь забруднення атмосферного повітря викидами автотранспорту залежить від можливості перенесення даних забруднюючих речовин на значні відстані, рівня їх хімічної активності, метеорологічних умов розповсюдження.

Компоненти шкідливих викидів з підвищеною реактивною здатністю, потрапляючи у вільну атмосферу, взаємодіють між собою і компонентами атмосферного повітря. При цьому розрізняють фізичну, хімічну і фотохімічну взаємодії.

Приклади фізичного реагування: конденсація пари кислот у вологому повітрі з утворенням аерозолу, зменшення розмірів крапель рідини в результаті випаровування в сухому теплому повітрі. Рідкі і тверді частинки можуть об'єднуватися, адсорбувати або розчиняти газоподібні речовини.

Реакції синтезу і розпаду, окислення і відновлення здійснюються між газоподібними компонентами забруднюючих речовин і атмосферним повітрям.

Деякі процеси хімічних перетворень починаються безпосередньо з моменту надходження викидів в атмосферу, інші – при появі для цього сприятливих умов – необхідних реагентів, сонячного випромінювання, інших чинників.

При виконанні транспортної роботи істотним є викид з'єднань вуглецю у наступному вигляді: CO (може окислюватися до CO₂, за наявності домішок – до сильних окислювачів (O, O₃), перекисних з'єднань і вільних радикалів); C_xH_y (в результаті утворюються перекиси, вільні радикали, з'єднання і оксиди азоту і сірки) [6].

З'єднання азоту, що потрапляють в атмосферу від об'єктів автотранспортного комплексу, представлені в основному NO і NO₂. Монооксид азоту, що виділяється в атмосферу під впливом сонячного світла, інтенсивно окислюється атмосферним киснем до діоксиду азоту. Кінетика подальших перетворень діоксиду азоту визначається його здатністю поглинати ультрафіолетові промені і дисоціювати на монооксид азоту та атомарний кисень в процесах фотохімічного смогу.

Значна частка викидів розподіляється також в ґрунтах. Негативна дія автомобільного транспорту на ґрунтовий покрив придорожньої смуги визначається надходженням в ґрунт найрізноманітніших хімічних речовин, серед яких важким металам і, перш за все, свинцю і його з'єднанням в численних дослідженнях приділялася найбільш пильна увага. Проте проблема забруднення свинцем придорожного ґрунтового покриву стає все менш актуальною. В той же час все більш гостро виявляється проблема забруднення ґрунтів нафтопродуктами, бенз(а)піреном, з'єднаннями цинку і деяких інших важких металів [15, 16].

Підвищений вміст цинку став характерним явищем, яке через свою екологічну небезпеку вимагає пильного контролю і уважного вивчення.

Цинк поступає в придорожній простір в результаті стирання різних деталей, ерозії оцинкованих поверхонь, зносу шин, за рахунок використання в маслах присадок, що містять цей метал. Масова частка цинку в моторних маслах для бензинових двигунів складає 0,09–0,12%, у маслах для дизельних двигунів – 0,05–0,1%.

Після відмови від використання з'єднань кадмію в процесах вулканізації гуми і заміни їх з'єднаннями цинку стирання автомобільних шин також стало одним з джерел накопичення цього металу уздовж дороги. В результаті цих процесів уздовж автомобільних доріг формуються геохімічні аномалії цинку. На жаль, методологія розрахунків накопичення цинку в придорожніх ґрунтах поки не розроблена, процеси міграції і накопичення цинку, що відбуваються в ґрунті, недостатньо вивчені, що не дозволяє упевнено прогнозувати процеси його розподілу в ґрунті.

Отримані дані показують, що проблема забруднення придорожніх ґрунтів цинком починає виявлятися все більш виразно. Тоді як численні вимірювання демонструють успіхи в боротьбі зі свинцевим забрудненням, небезпека накопичення в придорожніх ґрунтах неприпустимої кількості цинку наростає.

Нафтопродукти, що є композицією найрізноманітніших вуглеводнів, є, як загальновідомо, найбуденнішим і повсюдним забруднювачем придорожніх смуг. Незважаючи на те, що забруднення ними носить наймасштабніший і найпоширеніший характер, яких-небудь задовільних методик, що забезпечують прогнозні оцінки забруднення ґрунтів, до сьогодні не розроблено.

Серед показників, що характеризують забруднення ґрунту вуглеводнями, особливо значущим є бенз(а)пірен, що має канцерогенну дію. Бенз(а)пірен у складі інших поліциклічних ароматичних вуглеводнів міститься у відпрацьованих газах автомобільних двигунів [17].

Дослідження, що присвячені вмісту шкідливих речовин в ґрунтовому покриві, на сьогоднішній день є необхідними з багатьох причин. Специфіка хімічного складу ґрунту впливає на сільськогосподарські властивості ґрунтів придорожньої смуги. Знати її необхідно для оптимізації сільськогосподарської діяльності в придорожній смузі. Наприклад, деякі сільськогосподарські культури є більш стійкими до забруднення важкими металами. Також це питання набуває величезної актуальності в контексті грошової оцінки земельних ресурсів.

Оцінка характеру та масштабів забруднення навколишнього середовища викидами автотранспорту може бути виконана за допомогою комплексу методів, що враховують всі аспекти забруднення. Надзвичайно складно привести численні дані до єдиного інтегрального показника, який показував би рівень забруднення довкілля. Оскільки ми розглядаємо забруднення територій уздовж автошляхів, стан водоймищ в даному випадку не є принциповим, тому зупинимось докладніше на розрахунках забруднення повітря та ґрунтового покриву [18].

При забрудненні повітряного середовища слід виходити з ситуації, що склалася, враховуючи фоновий рівень забруднення, існуючі локальні джерела забруднення і перспективи їх зміни на прогностичний період. На основі цих даних можливе проведення осмислених оцінок, що дозволяють визначити внесок нового об'єкта (в даному випадку – автомобільної дороги) в забруднення атмосфери та порядок виконання необхідних природоохоронних заходів. У зв'язку з цим необхідно розглянути питання, пов'язані з фоновими концентраціями забруднюючих речовин, з оцінкою дії руху і з загальними діями при експлуатації дороги, виходячи з розглянутих природно-кліматичних умов на прогностичний період [7].

Забруднення атмосферного повітря відпрацьованими газами автомобілів зручно оцінювати за концентрацією оксиду вуглецю (мг/мі) за формулою:

$$K_{co} = 0,5 + 0,01 \times N \times K_m \times K_a \times K_y \times K_c \times K_b \times K_n,$$

де 0,5 – фонове забруднення атмосферного повітря нетранспортного походження, мг/мі; N – сумарна інтенсивність руху автомобілів на міській дорозі, автомобілів в годину; K_n – коефіцієнт, що залежить від типу транспортного засобу; K_a – коефіцієнт, що враховує аерацію місцевості; K_y – коефіцієнт, що враховує зміну забруднення атмосферного повітря залежно від величини поздовжнього ухилу; K_c – коефіцієнт, що враховує зміну концентрації СО залежно від швидкості вітру; K_b – коефіцієнт відносної вологості повітря; K_m – коефіцієнт токсичності автомобілів по викидах в атмосферне повітря оксиду вуглецю.

Коефіцієнт токсичності автомобілів визначається як середньозважений для потоку автомобілів за формулою:

$$K_m = P_i \times K_3,$$

де P_i – склад руху в долях одиниць; K_3 – коефіцієнт збільшення забруднення атмосферного повітря СО на перехрестях.

Нижче в таблицях наведені величини відповідних коефіцієнтів в залежності від конкретних параметрів місцевості.

Таблиця 3 – Значення K_n

Тип автомобіля	K_n
Середній вантажний	2,9
Автобус	3,7
Легкий вантажний	2,3
Важкий вантажний (диз.)	0,2
Легковий	1,0

Таблиця 4 – Значення K_a

Тип місцевості за ступенем аерації	K_a
Транспортні тунелі	2,7
Транспортні галереї	1,5
Магістральні вулиці та дороги з багатоповерховою забудовою з 2 боків	1,0
Житлові вулиці з одноповерховою забудовою, вулиці та дороги у виємці	0,6
Міські вулиці та дороги з одноповерховою забудовою, набережні, естакади, віадукі, високі насипи	0,4

Таблиця 5 – Значення K_v

Відносна вологість, %	K_v
100	1,45
90	1,30
80	1,15
70	1,00
60	0,85
50	0,75
40	0,60

Таблиця 6 – Значення K_u

Поздовжній ухил	K_u
0	1,00
2	1,06
4	1,07
6	1,18
8	1,55

Таблиця 7 – Значення K_c

Швидкість вітру	K_c
1	2,70
2	2,00
3	1,50
4	1,20
5	1,05
6	1,00

Таблиця 8 – Значення K_z

Тип перехрестя	K_z
Перехрестя, що регулюється:	
світлофорами звичайне	1,8
світлофорами кероване	2,1
саморегульоване	2,0
Нерегульоване:	
зі зниженням швидкості	1,9
кільцеве	2,2
з обов'язковою зупинкою	3,0

Згідно з використовуваною раніше методикою розрахунку забруднення ґрунту кількість забруднюючої речовини визначалася, виходячи з пропозиції, що всі викиди розподіляються упоперек дороги відповідно до нормального закону розподілу:

$$p(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$

де $\sigma = 60$.

Додатково враховувався факт наявності і класифікації лісонасаджень (залежність показана на рис. 1).

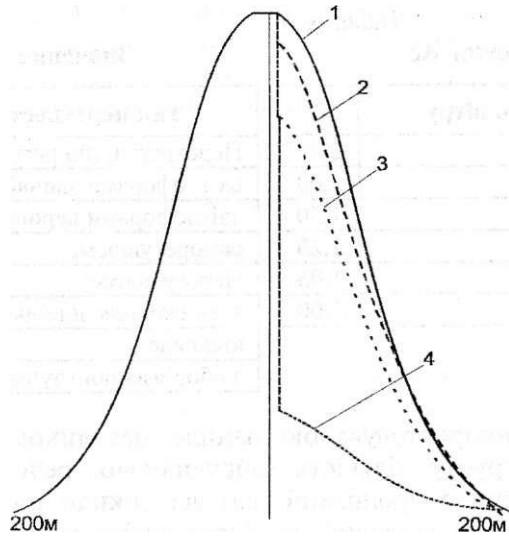


Рис. 1 – Розподіл забруднення уздовж дороги: 1 – лісосмуги немає; 2 – смуга чагарника; 3 – смуга дерев; 4 – зелений масив

Така методика розрахунку не дає можливості адекватно розрахувати концентрацію забруднень в реальних умовах, оскільки не враховується ряд збурюючих чинників.

Так само класичним варіантом підрахунку рівня забруднень є метод, заснований на використанні насамперед статистичних матеріалів, що стосуються завантаженості автошляхів, даних про найбільш розповсюджені типи автотранспорту (відповідно до цього детермінують найбільш уживаний тип палива). Похибка розрахунків на пряму залежить від якості даних, в ідеальних умовах потрібні навіть дані про марки автотранспортних засобів. Велика увага приділяється кореляції характеру забруднення з характеристиками клімату території та конкретними метеорологічними умовами (середні температури, їх добова амплітуда, річна кількість опадів, переважний напрям вітру в залежності від сезону тощо). Необхідними також є вихідні емпіричні дані про стан ґрунтового покриву (щільність ґрунту, товщина ґрунтового шару, в якому можуть розташовуватися з'єднання свинцю) [8].

Потужність емісій свинцю за даної середньодобової інтенсивності руху автотранспорту визначається за формулою:

$$P_e = K_n \times K_o \times K_m \times \sum(G_i \times P_i \times N_i),$$

де P_e – визначається в мг/мі на добу; $K_n = 0,74$ – коефіцієнт перерахунку одиниць виміру; $K_o = 0,8$ – коефіцієнт, що враховує осідання свинцю в системі випуску відпрацьованих газів; $K_m = 0,8$ – коефіцієнт, що враховує частку викидів свинцю у вигляді твердих елементів в загальному об'ємі викидів; G_i – середні експлуатаційні витрати палива для відповідної моделі автотранспорту; N_i – середньодобова інтенсивність руху автотранспорту вибраної моделі; P_i – вміст добавки свинцю в паливі, що застосовується на автомобілі обраного типу.

Рівень забруднення свинцем поверхневого ґрунтового шару на різних відстанях від автодороги визначається за формулою:

$$P_c = \frac{P_n}{h \times \rho},$$

де P_c – рівень забруднення ґрунту з'єднаннями свинцю, мг/кг; h – товщина ґрунтового шару (в метрах), в якому розташовуються викиди свинцю, для орних земель приймається за 0,2 м; ρ – щільність ґрунту; P_n – відклади свинцю на поверхні землі (мг/м³), величина яких визначається за формулою:

$$P_n = 0,4K_1 \times U_v \times T_p \times P_e,$$

де K_1 – коефіцієнт, що враховує відстань від автодороги; U_v – коефіцієнт, що залежить від сили та напрямку вітру, приймається як рівний відношенню площі рози вітрів з боку дороги, протилежного досліджуваній зоні, до загальної площі; T_p – розрахунковий строк експлуатації дороги в добах, приймається за 7300 діб, що відповідає 20-річному прогнозованому строку; P_e – потужність емісії свинцю.

Переваги цього методу перед розглянутим раніше полягають саме в більш детальному аналізі статистичних даних, що стосуються транспортних засобів, оскільки, як доведено вище, характеристики забруднення суттєво різняться в залежності від типу двигуна (типу палива) та інших параметрів. Проте коефіцієнти, що використовуються в даному методі, носять емпіричний характер, а співвідношення, отримані емпіричним шляхом, не дозволяють враховувати деякі особливості, зокрема наявність і використання апріорної інформації про місцевість і характер впливу окремих чинників або їх взаємний вплив на якість визначення рівня забруднень.

Для цього потрібне використання більш точної функціональної моделі на основі теорії статистичних рішень з урахуванням сезонних змін і інших особливостей аналізу місцевості. При цьому необхідне комплексування прескриптивної та дескриптивної моделей для об'єднання апріорної інформації, отриманої контактними і дистанційними методами зондування земної поверхні на заданій ділянці місцевості. Побудова такої функціональної моделі повинна бути заснована на алгебрі нечіткої логіки, що дозволяє аналізувати нечіткі ситуації і давати кількісні оцінки відповідним комбінаціям даних чинників впливу.

Наприклад, аналіз та урахування лише декількох чинників, таких як інтенсивність руху та його швидкість, крутизна схилу, кількість опадів, наявність лісосмуги, дає суттєві переваги при кількісній оцінці концентрації викидів автомобільного транспорту уздовж автошляхів. Розглянемо механізм урахування та взаємного впливу вищевказаних чинників на показник, що оцінює рівень забруднень в даній місцевості.

Аналізуючи проблему екологічного забруднення викидами автотранспорту уздовж доріг, торкаємось системи, що містить велике число змінних, які взаємодіють один з одним, реагуючих на зміни кожної іншої змінної, які представляються у вигляді причинно-наслідкових відносин, що можна виразити у вигляді графових моделей взаємодії (рис. 2). Використання нечіткої логіки як модель складної системи засноване на наступному. Найістотніші процеси для даної проблеми зображуємо вершинами графа. Від вершини u до вершини v проводиться дуга, якщо зміна u надає безпосередню істотну дію на v і дана дуга має знак «плюс», якщо дія є «посиленням» (за інших рівних умов збільшення u приводить до збільшення v і зменшення u – до зменшення v), і знак «мінус», – якщо дія викликає «гальмування» (за інших рівних умов збільшення u приводить до зменшення v і зменшення u – до збільшення v) [19].

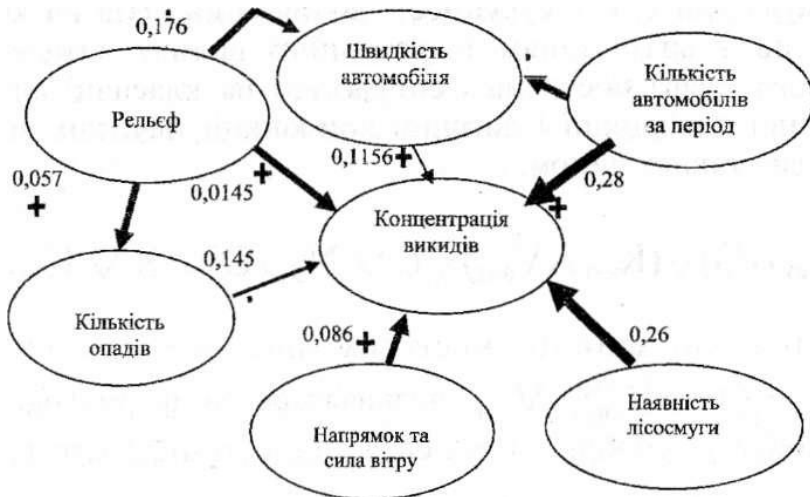


Рис. 2 – Базова структура моделі обліку забруднень автомобільним транспортом уздовж доріг

Для побудованого графа посилень, що показує взаємний вплив перерахованих вище чинників один на одного і впливи цих же чинників на кількість викидів солей свинцю $P_{рв}$, необхідно встановити значення вагових коефіцієнтів ступеня впливу відповідно до алгоритму Флойда. Ці коефіцієнти приймуть наступні значення:

1. При впливі чинника на кількість забруднень:
Рельєф (R) – 0,0145
Викиди автотранспорту ($K_{авт}$) – 0,28
Опади (O) – 0,145
Вітер (N_v) – 0,086
Наявність лісосмуги (L) – 0,26
Швидкість автотранспорту ($V_{авт}$) – 0,1156.

2. При взаємному впливі чинників:

Рельєфу на швидкість автотранспорту ($R \bullet V_{\text{авт}}$) – 0,176

Рельєфу і опадів ($R \bullet O$) – 0,057

Викиди автотранспорту і швидкість автотранспорту ($K_{\text{авт}} \bullet V_{\text{авт}}$) – 0,057.

Отримані значення вагових коефіцієнтів використовуються в подальших розрахунках, зокрема для обчислення консеквента (висновка сумісних логічних висловів) при операціях логічної диз'юнкції і кон'юнкції при визначенні інтегрального показника сукупності комбінаторних множин для побудови подальшої функціональної залежності, що визначає значення функції приналежності [13].

Таким чином, середнє значення інтегрального показника сукупності комбінаторних множин дорівнює 1,87.

Емпіричним шляхом, з використанням відповідних статистичних даних були визначені функціональні залежності впливу кожного з чинників на рівень забруднення: інтенсивності руху на даній дорозі; вірогідності проїзду даної марки машини; вмісту добавки свинцю в паливі, вживаному на автомобілі даного типу; вірогідності використання даної марки бензину.

Маршрути проводились для картографування територій ландшафтів на основі візуальних спостережень, для складання карт забруднення ґрунтів, поверхневих і ґрунтових вод, атмосферного повітря та порушень геологічного середовища вздовж автомобільних шляхів. Під час маршрутів, крім польового картування окремих компонентів урбоєкосистеми, відбирались проби (зразки) ґрунтів, поверхневих і ґрунтових вод, атмосферного повітря і рослинності. Всього було відібрано 105 проб ґрунтів, 38 проб поверхневих і 37 проб ґрунтових вод і 30 проб рослинності (рис. 3).

Всі проби були проаналізовані різними методами у Центральній біохімічній лабораторії м. Київ.

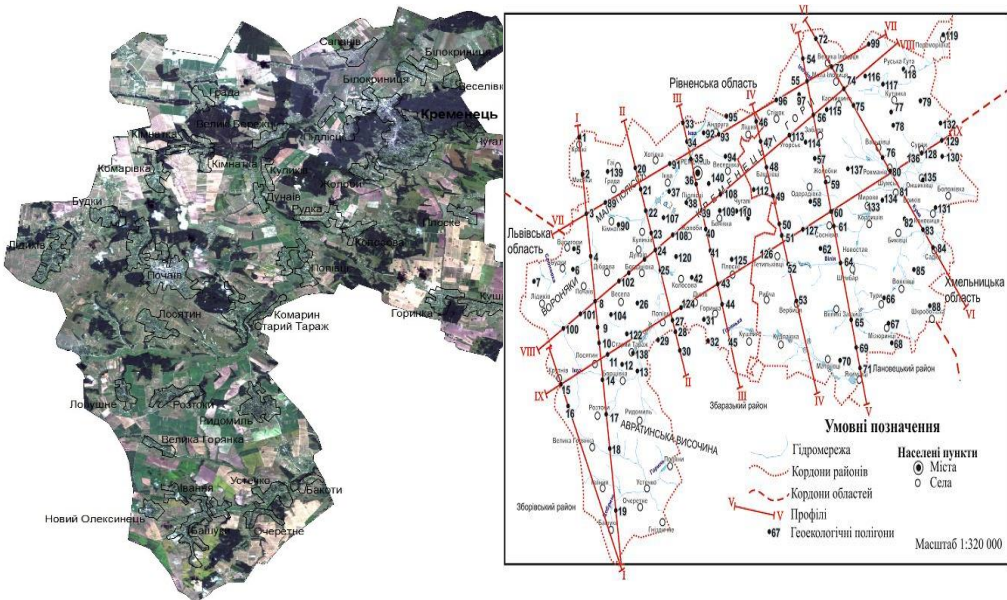


Рис. 3 – Космічний знімок з супутника Landsat 5 та картосхема відбору проб Кременецького району

В результаті були виготовлені еколого-техногеохімічні карти ґрунтів, поверхневих і ґрунтових вод, атмосферного повітря і рослинності (рис. 4).

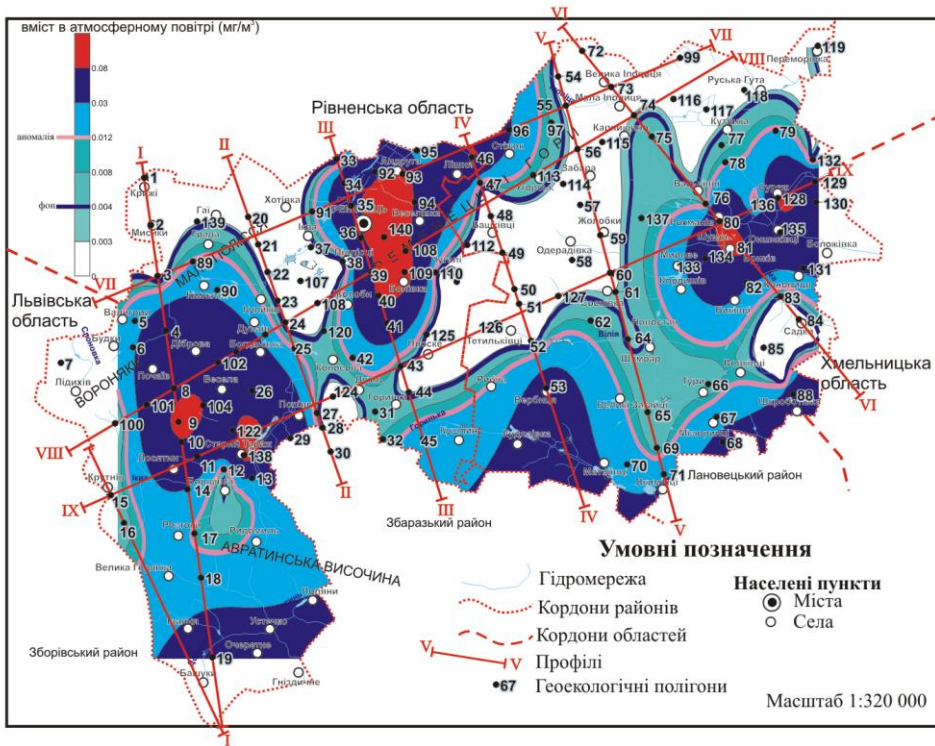


Рис. 4 – Картосхема розповсюдження вуглекислого газу (CO₂) в атмосферному повітрі

Характерною рисою більшості сучасних міст і сіл, в тому числі і Тернопільщини, є перетворення первинних природних ландшафтів у нові природно-техногенні геоекосистеми та досить істотна зміна екологічного стану основних компонентів урбоекосистеми [4, 5]. На екологічній карті відображені просторові особливості змін геологічного середовища, геофізичних полів, рельєфу, поверхневих і ґрунтових вод, атмосферного повітря, ґрунтового і рослинного покривів, стану здоров'я населення та об'єктів техносфери, яка істотно впливає на всі попередні складові природного середовища. Карта дозволила оцінити наскільки змінені первинні ландшафти, які кількісні і якісні зміни відбулись у всіх компонентах довкілля і як ці трансформації вплинули на людину.

Висновки

Розроблена методологія є одним зі способів видачі попереднього прогнозу розповсюдження забруднень з урахуванням збудовуючих чинників за наявності апріорних даних. В даній методології враховуються сукупність чинників впливу на рівень концентрації забруднень і отримані емпіричним шляхом функціональні залежності впливу кожної зі збудовуючих складових на рівень забруднення. Побудована модель взаємодії встановлених чинників у вигляді графа взаємодії характеризує причинно-наслідкові відносини.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Красовський Г.Я., Трофимчук О.М., Крета Д.Л., Клименко В.І., Пономаренко І.Г., Суходубов О.О. Синтез картографічних моделей забруднення земель техногенним пилом з використанням космічних знімків // Екологія і ресурси. – К.: ПНБ, 2005. – №12. – С. 37–55.
2. Адаменко О.М., Міщенко Л.В. Екологічний аудит територій: Підручник / О.М. Адаменко, Л.В. Міщенко. – Івано-Франківськ: ФАКЕЛ, 2000. – 241 с.
3. Гуцуляк В.М. Ландшафтна екологія. Геохімічний аспект: Навч. Посіб / В.М. Гуцуляк. – Чернівці: Рута, 2002. – 272 с.
4. Триснюк В.М. Екологія Гусятинського району / В.М. Триснюк. – Тернопіль. Тернограф. 2004. – 219 с.
5. Рудько Г.І., Назаренко М.В. Геоінформаційні технології в надрокористуванні / Г.І. Рудько, М.В. Назаренко – К.: «Академпрес», 2011. – 336 с.
6. Данилко В.К. Забруднення атмосферного повітря автомобільним транспортом: підходи до стратегічного визначення // Статистика України. – К., 2003. – № 4. – С. 9–11.
7. Бутенко О.С. Комплексний підхід к дешифруванню снимков по данным космического мониторинга / О.С. Бутенко, С.И. Березина, Г.Я. Красовский. – Екологічна безпека та природокористування: 36. наук. праць / М-во освіти і науки України, К., 2008. – Вип. 1. – С. 23–41.
8. Trysnyuk, V., Okhariev, V., Trysnyuk, T., Zorina, O., Kurylo, A., Radlowska, C. (2019). Improving the algorithm of satellite images landscape interpretation. In *18th International Conference Geoinformatics – Theoretical and Applied Aspects*, vol. 2019, p. 1-5.
<http://www.earthdoc.org/publication/publicationdetails/?publication=98507>
DOI: 10.3997/2214-4609.201902084
9. Trysnyuk, V.M., Smetanin K.V., Trysnyuk T.V., Holowan Y.V., Kashchishin O.L., Radlowska K.O. (2019). The improvement of the system of ecological monitoring of the environment through the application of remotely piloted aircraft systems. *XIII International Scientific Conference – “Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment”*, Extended Abstracts.
<http://www.earthdoc.org/publication/publicationdetails/?publication=10050>
10. Триснюк В.М. Аерогеолокаційний екологічний контроль. / В.М. Триснюк, А.В. Павлишин, А.В. Курило // MONOGRAFIA POKONFERENCYJNA. Warszawa, 2020. С. 46.
11. Триснюк В.М. Екологічна безпека телекомунікаційних систем та технологій / В.М. Триснюк, К.В. Сметанін, А.В. Курило, Ю.М. Голован, Т.В. Триснюк // Ризики нестабільності: безпека і управління. Міждисциплінарна науково-практична конференція. Київ. 16 березня 2018 р. – С. 49–52.
12. Okhariev, V., Trysnyuk, V. [2019] Environmental aspects of Ukrainian energy sector in connection with transition to low-carbon development. *Conference – Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment*.
13. Trofymchuk O., Myrontsov M., Okhariev V., Anpilova Y., Trysnyuk V. [2021] Transdisciplinary analytical system for support the environmental researches. *Systems, decision and control in energy II. Studies in systems, decision and control*. Springer. Cham.
14. Trofymchuk, O., Lebid, O., et al. (2019). Dynamic certification of landslide protection structures in a seismically hazardous region of Ukraine: experimental and analytical research. Earthquake geotechnical engineering for protection and development of environment and constructions. In: Silvestri F., Moraci N. (eds.). Proc. of the VII ICEGE 7th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, Rome, Italy, 17-20 June 2019, 5337-5344.
15. Макарова А.И. Ореолы рассеяния тяжелых металлов на территории, прилегающей к автомагистрали. / А.И. Макарова, С.Ф. Полунин, Н.П. Ильин, Ф.И. Славин // Гигиена и санитария, 1993, № 7. – С. 63–64.
16. Greben, S., Trofymchuk, O., Trysnyuk, V., Krasovskiy, G. [2020] Interpretation of remote sensing data for ecological tasks. *IEEE Ukrainian Microwave Week (UkrMW): 10th*

International Kharkiv Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (21–25 September, Kharkiv, Ukraine), Volume 3, P. 772–776.

17. Trofymchuk, O., Okhariev V., Trysnyuk V. [2019] Environmental security management of geosystems. *Conference Proceedings. 18th International Conference on Geoinformatics – Theoretical and Applied Aspects*.

18. Триснюк В.М. Екологічна безпека Карпатського регіону в умовах техногенного пилового забруднення атмосферного повітря / В.М. Триснюк, В.О. Шумейко, Т.В. Триснюк, А.В. Курило, Ю.М. Голован, В.В. Мирончук // Збірник наукових праць «Системи управління, навігації та зв'язку». Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка. Випуск 1(59) 2020 р. С. 127–131.

19. Триснюк Т.В., Підвищення рівня екологічної безпеки об'єктів природно-заповідного фонду / Т.В. Триснюк, Ю.М. Голован, А.В. Курило // Сучасні інформаційні технології управління екологічною безпекою, природокористуванням, заходами в надзвичайних ситуаціях: Колективна монографія: XVII Міжнародна науково-практична конференція. Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАНУ. Київ. 25-26 вересня 2018 р. – С. 213–214.

Стаття надійшла до редакції 25.01.2021 і прийнята до друку після рецензування 04.05.2021

REFERENCES

1. Krasovsky, G.Ya., Trofimchuk, O.M., Kreta, D.L., Klimenko, V.I., Ponomarenko, I.G., & Sukhodubov, O.O. (2005). Synthesis of cartographic models of land pollution by man-made dust using space images. *Ecology and resources*, 12, 37-55 (in Ukrainian).
2. Adamenko, O.M., & Mishchenko, L.B. (2000). *Ecological audit of territories: Textbook*. Ivano-Frankivsk: FAKEL (in Ukrainian).
3. Gutsulyak, V.M. (2002). *Landscape ecology. Geochemical aspect: Textbook*. Chernivtsi: Ruta (in Ukrainian).
4. Trysnyuk, V.M. (2004). *Ecology of Husiatyn district*. Ternopil: Ternograph (in Ukrainian).
5. Rudko, G.I., & Nazarenko, M.V. (2011). *Geoinformation technologies in subsoil use*. Kyiv: "Academpress" (in Ukrainian).
6. Danilko, V.K. (2003). Atmospheric air pollution by road transport: approaches to strategic determination. *Statistics of Ukraine*, 4, 9-11 (in Ukrainian).
7. Butenko, O.S., Berezina, S.I., & Krasovsky, G.Ya. (2008). A comprehensive approach to decoding images based on space monitoring data. *Environmental safety and nature resources*, 1, 23-41 (in Russian).
8. Trysnyuk, V., Okhariev, V., Trysnyuk, T., Zorina, O., Kurylo, A., & Radlowska, C. (2019). Improving the algorithm of satellite images landscape interpretation. In *18th International Conference Geoinformatics – Theoretical and Applied Aspects*. (Vol. 2019, pp. 1-5). <http://www.earthdoc.org/publication/publicationdetails/?publication=98507>
DOI: 10.3997/2214-4609.201902084
9. Trysnyuk, V.M., Smetanin, K.V., Trysnyuk, T.V., Holowan, Y.V., Kashchishin, O.L., & Radlowska, K.O. (2019). The improvement of the system of ecological monitoring of the environment through the application of remotely piloted aircraft systems. In *XIII International Scientific Conference - "Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment"*, Extended Abstracts.
<http://www.earthdoc.org/publication/publicationdetails/?publication=10050>
10. Trysnyuk, V.M., Pavlishin, A.V., & Kurilo, A.V. (2020). *Aerogelocation ecological control*. Warszawa.
11. Trysnyuk, V.M., Smetanin, K.V., Kurylo, A.V., Holovan, Yu.M., & Trysnyuk, T.V. (2018). Ecological safety of telecommunication systems and technologies. In *Risks of instability: security and management. Interdisciplinary scientific-practical conference*. (pp. 49-52). Kyiv (in Ukrainian).

12. Okhariev, V., & Trysnyuk, V. (2019). Environmental aspects of Ukrainian energy sector in connection with transition to low-carbon development. In *Conference - Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment*.
13. Trofymchuk, O., Myrontsov, M., Okhariev, V., Anpilova, Y., & Trysnyuk, V. (2021). Transdisciplinary analytical system for support the environmental researches. In *Systems, decision and control in energy II. Studies in systems, decision and control*. Springer, Cham.
14. Trofymchuk, O., Lebid, O., et al. (2019). Dynamic certification of landslide protection structures in a seismically hazardous region of Ukraine: experimental and analytical research. Earthquake geotechnical engineering for protection and development of environment and constructions. In: Silvestri F., Moraci N. (eds.). *Proc. of the VII ICEGE 7th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*, Rome, Italy, 17-20 June 2019, 5337-5344.
15. Makarova, A.I., Polunin, S.F., Ilyin, N.P., & Slavin, F.I. (1993). Scattering halos of heavy metals in the area adjacent to the highway. *Hygiene and Sanitation*, 7, 63-64 (in Russian).
16. Greben, S., Trofymchuk, O., Trysnyuk, V., & Krasovskiy, G. (2020). Interpretation of remote sensing data for ecological tasks. In *IEEE Ukrainian Microwave Week (UkrMW): 10th International Kharkiv Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves* (Vol. 3, pp. 772-776). Kharkiv, Ukraine.
17. Trofymchuk, O., Okhariev, V., & Trysnyuk, V. (2019). Environmental security management of geosystems. In *18th International Conference on Geoinformatics - Theoretical and Applied Aspects*.
18. Trysnyuk, V.M., Shumeiko, V.O., Trysnyuk, T.V., Kurylo, A.V., & Golovan, Yu.M. (2020). Ecological safety of the Carpathian region in the conditions of technogenic dust pollution atmospheric air. *Control, Navigation and Communication Systems. Academic Journal*, 1 (59), 127-131. <https://doi.org/https://doi.org/10.26906/SUNZ.2020.1.127> (in Ukrainian).
19. Trysnyuk, T.V. Golovan, Yu.M., & Kurilo, A.V. (2018). Increasing the level of environmental safety of nature reserves. In *Modern information technologies for environmental safety management, nature management, emergency measures: Collective monograph: XVII International scientific-practical conference* (pp. 213-214). Kyiv: Institute of Telecommunications and Global Information Space of NASU (in Ukrainian).

The article was received 25.01.2021 and was accepted after revision 04.05.2021

Триснюк Василь Миколайович

доктор технічних наук, старший науковий співробітник, завідувач відділу досліджень навколишнього середовища Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України

Адреса робоча: 03186, Київ, Чоколівський бульвар, 13

ORCID 0000-0001-9920-4879, **e-mail:** trysnyuk@ukr.net

Шумейко Віктор Олександрович

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник відділу досліджень навколишнього середовища Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України

Адреса робоча: 03186, Київ, Чоколівський бульвар, 13

ORCID 0000-0002-0285-4566, **e-mail:** shym1983@ukr.net

Голован Юрій Миронович

аспірант Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України

Адреса робоча: 03186, Київ, Чоколівський бульвар, 13

ORCID 0000-0001-7050-9310, **e-mail:** dirrecta@gmail.com