

УДК 504.06

МЕХАНІЗМ ВИЗНАЧЕННЯ КІЛЬКІСНИХ ХАРАКТЕРИСТИК РІВНЯ КОНЦЕНТРАЦІЇ ЗАБРУДНЮЮЧИХ РЕЧОВИН ВИКИДАМИ АВТОМОБІЛЬНОГО ТРАНСПОРТУ

О.С. Бутенко, канд. техн. наук, доцент;
В.О. Охарєв
(Національний аерокосмічний університет
ім. Н.Є. Жуковського)

Проаналізовано основні механізми забруднення приземного шару атмосфери і верхнього ґрунтового шару викидами автомобільного транспорту у придорожній смузі. Докладно розглянуто основні чинники забруднення, забруднюючі компоненти та специфіка їх негативного впливу на довкілля. Наведено ряд методів оцінки рівня забруднення, проаналізовано їх сильні та слабкі місця. Розглянута методологія видачі попереднього прогнозу розповсюдження забруднення з урахуванням збурюючих чинників та їх впливу на рівень концентрації забруднень, а також математичний апарат для визначення кількісних характеристик рівня концентрації забруднюючих речовин.

Проанализированы основные механизмы загрязнения приземного слоя атмосферы и верхнего почвенного слоя выбросами автомобильного транспорта в придорожной полосе. Подробно рассмотрены основные факторы загрязнения, загрязняющие компоненты и специфика их негативного влияния на окружающую среду. Приведен ряд методов оценки уровня загрязнения, проанализированы их сильные и слабые места. Рассмотрена методология выдачи предварительного прогноза распространения загрязнения с учетом возмущающих факторов и их влияния на уровень концентрации загрязнений, а также математический аппарат для определения количественных характеристик уровня концентрации загрязняющих веществ.

The basic mechanisms of contamination of the ground layer of atmosphere and ground epiphase are analysed by the extrass of motor transport in a wayside

© О.С. Бутенко, В.О. Охарєв, 2009

bar. The basic factors of contamination are thoroughly considered, contaminating components and specific negative influence of them on an environment. The list of estimation methods of contamination parametres is resulted, they are analysed strong and weak places. Methodology of delivery of previous prognosis of contamination distribution is taking into account revolting factors and their influence is considered, and also mathematical vehicle is considered for determination of quantitative descriptions of concentration of contaminants's parametres.

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 [1].

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 [2, 3].

Під час роботи двигуна внутрішнього згоряння джерелами викидів шкідливих речовин є відпрацьовані гази (далі — ВГ), картерні гази та продукти випаровування з 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_x), канцерогенні речовини, до яких належать складні ароматичні вуглеводні поліциклічної будови (найпоширенішим є бенз(а)пірен — $C_{20}H_{12}$), альдегіди (RHSO), сполуки свинцю (PbO_4) і сажа (C). В картерних газах і випаровуваннях містяться, в основному, вуглеводні [4].

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 відчують 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 різниться (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 _x H _y), %	2	0,5
Оксиди азоту (NO _x), %	0,6	0,2
Альдегіди (RCHO), %	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 [5, 6].

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 і 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) [7].

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 [8].

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 аерозоля, 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 з оксидами азоту і сірки).

З'єднання азоту, що поступають в атмосферу від об'єктів автотранспортного комплексу, представлені в основному NO і NO₂. Моноксид 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 моноксид 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 покриття стає все менш актуальною. В той же час все більш гостро починає виявлятися проблема забруднення ґрунтів нафтопродуктами, бенз(а)піреном, з'єднаннями цинку і деяких інших важких металів [9, 10].

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. Не дивлячись на те, що забруднення ними носить наймасштабніший і поширеніший характер, яких-небудь задовільних методик, що забезпечують прогнозні оцінки забруднення ґрунтів, до сьогодні не розроблено.

Серед показників, що характеризують забруднення ґрунту вуглеводнями, особливу значущість має бенз(а)пірен, що має канцерогенну дію. Бенз(а)пірен у складі інших поліциклічних ароматичних вуглеводнів міститься у відпрацьованих газах автомобільних двигунів [11].

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 [12].

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'єкту (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 [13].

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

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

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 подовжнього ухилу; K_c — коефіцієнт, що враховує зміну концентрації СО залежно від швидкості вітру; K_g — 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:

$$K_m = P_i \times K_s,$$

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_p

Тип автомобіля	K_p
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 тоннелі	2,7
Транспортні галереї	1,5
Магістральні вулиці та дороги з багатоповерховою забудовою з 2-х сторін	1,0
Житлові вулиці з одноповерховою забудовою, вулиці та дороги у висміці	0,6
Міські вулиці та дороги з одноповерховою забудовою, набережні, естакади, віадуки, 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 Кс

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

Таблиця 8

Значення Кз

Тип перехрестя	Кз
Перехрестя, що регулюється:	
світлофорами звичайне	1,8
світлофорами кероване	2,1
саморегулюєме	2,0
Нерегулюєме:	
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 уперек 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 лісо-насаджень (залежність показана на рис. 1).

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 напряму 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

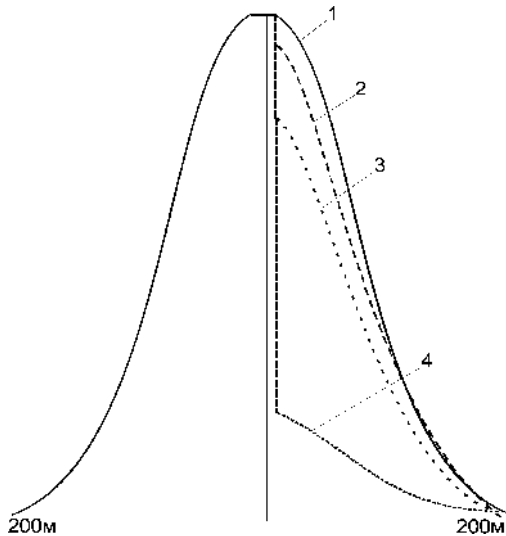


Рис. 1. Розподіл забруднення уподовж дороги: 1 — лісосмуги немає; 2 — смуга чагарника; 3 — смуга дерев; 4 — зелений масив

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).

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 аналізованої місцевості. При цьому необхідне комплексування прескриптивної та дескриптивної моделей для об'єднання апріорної інфор-

мації, 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) [14, 15].

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_{pb} , 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

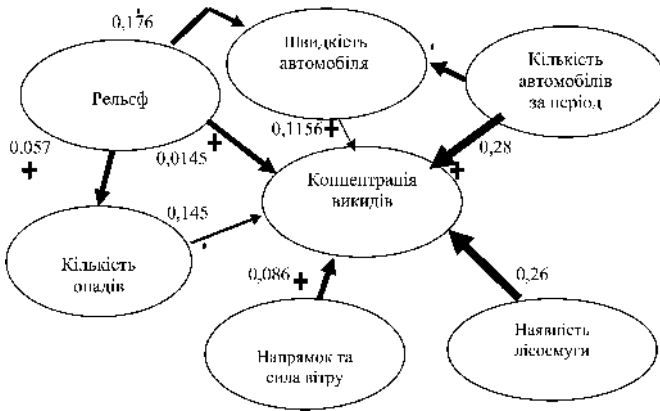


Рис. 2. Базова структура моделі обліку забруднень автомобільним транспортом уздовж доріг

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 ($R \cdot V_{авт}$) — 0,176

Рельєфу і опадів ($R \cdot O$) — 0,057

Викиди автотранспорту і швидкість автотранспорту ($K_{авт} \cdot V_{авт}$) — 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 [15].

Нечіткий предикат, таким чином, матиме наступний вигляд: $P(<0.0145, 0.28, 0.145, 0.086, 0.26, 0.1156>)$. Формально цей предикат визначається як деяке відображення з декартового добутку універсумів $X_1 \times X_2 \times X_6$, що дає нам підставу скористатись операціями алгебри кінцевих предикатів. Підсумко-

ва формула для опису сукупності впливу чинників на кількість забруднень з врахуванням їх взаємного впливу витікає з побудованого графа посилень і спирається на класичні визначення логічної диз'юнкції і логічної кон'юнкції нечітких висловів, і виглядає таким чином:

$$(R \wedge V_{\text{авт}} \wedge O) \vee (K_{\text{авт}} \wedge V_{\text{авт}}) \vee L \vee N_{\text{в}} \vee O \vee R \vee K_{\text{авт}} \vee V_{\text{авт}}.$$

Логічна кон'юнкція нечітких висловів для ситуацій $R \wedge V_{\text{авт}} \wedge O$ та $K_{\text{авт}} \wedge V_{\text{авт}}$ визначалась за формулою розрахунку добутку алгебри ступеней істинності нечітких висловів:

$$T(R \wedge V_{\text{авт}} \wedge O) = T(R) \cdot T(V_{\text{авт}}) \cdot T(O) = 0,0099$$

$$T(K_{\text{авт}} \wedge V_{\text{авт}}) = T(K_{\text{авт}}) \cdot T(V_{\text{авт}}) = 0,057.$$

Логічна диз'юнкція нечітких висловів для ситуації

$$0,0099 \vee 0,057 \vee L \vee N_{\text{в}} \vee O \vee R \vee K_{\text{авт}} \vee V_{\text{авт}}$$

визначалась за формулою розрахунку алгебри суми ступеней істинності нечітких висловів:

$$T(0,0099 \vee 0,057 \vee L \vee N_{\text{в}} \vee O \vee R \vee K_{\text{авт}} \vee V_{\text{авт}}) =$$

$$= 0,0099 + 0,057 + T(L) + T(N_{\text{в}}) + T(O) +$$

$$+ T(R) + T(K_{\text{авт}}) + T(V_{\text{авт}}) -$$

$$[0,0099 \cdot 0,057 \cdot T(L) \cdot T(N_{\text{в}}) \cdot T(O) \cdot T(R) \cdot T(K_{\text{авт}}) \cdot T(V_{\text{авт}})] = 1,87.$$

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

Емпіричним шляхом, з використанням відповідних статистичних даних були визначені функціональні залежності впли-

ву кожного з чинників (розглядаємих факторів) на рівень забруднення.

Оскільки показник складу транспортних засобів носить статистичний характер, функціональна залежність кількості викидів (K_6) від інтенсивності руху (N) буде лінійною і матиме наступний вигляд:

$$f(x_1) = (k_1 + k_2) \cdot x_1,$$

де k_1 — концентрація викидів при використанні дизельного палива, k_2 — концентрація викидів при використанні бензину.

Характеристикою кожної марки автомобіля є його оптимальна швидкість $V_{\text{опт}}$, за якої кількість викидів мінімальна. При зменшенні або збільшенні швидкості відносно $V_{\text{опт}}$ кількість викидів збільшується. Так, в режимі холостого ходу K_6 збільшується в 4–5 разів. Дана залежність може бути апроксимована функцією:

$$f(x_2) = D - a \cdot \exp(b_1 \cdot x_2 + c_1) \times \exp[-(b_2 \cdot x_2 + c_2)],$$

де D — максимальна кількість викидів (холостий хід), $a = k_{\text{max}} - k_{\text{min}}$; b_1, b_2, c_1, c_2 — коефіцієнти формування кривої (задаються виходячи з параметрів автомобілів).

Функціональна залежність кількості викидів від крутості схилу має наступний вигляд:

$$f(x_3) = \exp(b_3 x_3),$$

де b_3 — коефіцієнт формування кривої (задається виходячи з параметрів автомобілів).

При визначенні залежності рівня концентрації викидів від кількості атмосферних опадів враховувалось, що це один з небагатьох чинників, вплив якого зменшує кількість викидів в придорожній смузі, за умови, що ділянка знаходиться на схилі. Таким чином, функціональна залежність має наступний вигляд:

$$f(x_4) = \exp(-b_4x_4 + c_4),$$

де b_4, c_4 — коефіцієнти формування кривої (задаються виходячи з крутизни схилу і кількості опадів).

Під впливом напрямку і сили вітру відбувається рознесення викидів і зміщення зони забруднення. Знос викидів залежно від швидкості вітру можна описати лінійною функцією, що матиме наступний вигляд:

$$f(x_5) = kx_5,$$

де k — показник, що характеризує силу вітру.

І останнім з чинників, що урахувались, є чинник наявності лісосмуги. Наявність, а так само клас лісосмуги значно зменшують зону забруднення. Таким чином, дана залежність може бути описана наступною функцією:

$$f(x_6) = \exp(-b_6x_6) + d.$$

Після визначення виразів, що визначають функціональні залежності впливу кожного з розглянутих чинників на рівень забруднень і отримання значення інтегрального показника впливу сукупності чинників, побудуємо формулу визначення додаткового забруднення, що визначаємо переважно вищезгаданими чинниками [16, 17].

$$\Delta P_{pb} = \left[\frac{\partial f}{\partial x_1} K_{\text{авт}} + \frac{\partial f}{\partial x_2} V_{\text{авт}} + \frac{\partial f}{\partial x_3} R + \frac{\partial f}{\partial x_4} O + \frac{\partial f}{\partial x_5} N_{\text{в}} + \frac{\partial f}{\partial x_6} L \right] \times 1,87,$$

де $f(x_1) = (k_1 + k_2) \cdot x_1$; $f(x_2) = D - a \cdot \exp(b_1 \cdot x_2 + c_1) \times \exp[-(b_2 \cdot x_2 + c_2)]$;

$f(x_3) = \exp(b_3x_3)$; $f(x_4) = \exp(-b_4x_4 + c_4)$; $f(x_5) = kx_5$;

$f(x_6) = \exp(-b_6x_6) + d$.

Визначимо правочинність складеного рівняння. Повний диференціал (сума часткових похідних) визначає швидкість накопичення забруднення за сукупністю впливу вказаних чинників. Знак «плюс» між частковими похідними має місце,

оскільки йдеться про роботу в єдиному полі. Вагові коефіцієнти, отримані за алгоритмом Флойда з графа посилень, є скалярами, і при множенні на них жодних змін фізичного характеру не відбувається. Множення повного диференціала на інтегральний показник сукупності комбінаторних множин є об'єктивним посиленням впливу чинників, заснованих на комбінаторному поєднанні нечітких ситуацій [18, 19].

Таким чином, кінцева формула для розрахунку кількості забруднень за добу матиме наступний вигляд:

$$\begin{aligned}
 P_{\Sigma} &= N \cdot \sum_{i=1}^N \prod_{i=1}^N P_{pb} \cdot \Delta P_{pb} = \\
 &= 1,87 \cdot N \cdot \sum_{i=1}^N \prod_{i=1}^N \left[\frac{\partial f}{\partial x_{1_i}} K_{\text{авт}} + \frac{\partial f}{\partial x_{2_i}} V_{asm} + \frac{\partial f}{\partial x_{3_i}} R + \right. \\
 &\quad \left. + \frac{\partial f}{\partial x_{4_i}} O + \frac{\partial f}{\partial x_{5_i}} N_e + \frac{\partial f}{\partial x_{6_i}} L \right] \times P_i R_i G_i M_i.
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P_{\Sigma} &= N \cdot \sum_{i=1}^N \prod_{i=1}^N P_{pb} \cdot \Delta P_{pb} = \\
 &= 1,87 \cdot N \cdot \sum_{i=1}^N \prod_{i=1}^N \left[\frac{\partial f}{\partial ((k_1 + k_2)x_{1_i})} K_{\text{авт}} + \right. \\
 &\quad \left. + \frac{\partial f}{\partial [D - a \cdot e^{b_1 \cdot x_2 + c_1} \cdot e^{b_2 \cdot x_2 + c_2}]} V_{asm} + \right. \\
 &\quad \left. + \frac{\partial f}{\partial [e^{b_3 x_3}]} R + \frac{\partial f}{\partial [e^{-b_4 x_4 + c_4}]} O + \right. \\
 &\quad \left. + \frac{\partial f}{\partial [kx_5]} N_e + \frac{\partial f}{\partial [e^{-b_6 x_6} + d]} L \right] \times P_i R_i G_i M_i,
 \end{aligned}$$

де N — інтенсивність руху на даній дорозі; M_i — вірогідність проїзду даної марки машини; P_j — вміст добавки свинцю в паливі, вживаному на автомобілі даного типу; R_j — вірогідність використання даної марки бензину.

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 кожного зі збурюючих складових на рівень забруднення. Побудована модель взаємодії встановлених чинників у вигляді графа взаємодії характеризує причинно-наслідкові відносини.

* * *

1. Пшенин В.Н. Актуальные вопросы оценки загрязнения почвенного покрова вблизи автомагистралей // Труды Всероссийского научно-практического семинара «Экологизация автомобильного транспорта», МАНЭБ / В.Н. Пшенин. — СПб., 2003 г., С. 83—88.

2. Транспорт и окружающая среда / М.Л. Красовицкая, М.Т. Дмитриев, Т.А. Кулеш, С.Я. Барихин. — Гигиена и санитария, 1984, № 9. — С. 9—11.

3. Владимиров А.М. и др. Охрана окружающей среды / А.М. Владимиров и др. . Санкт-Петербург: Гидрометеиздат, 1991.

4. Евгеньев И.Е. Автомобильные дороги в окружающей среде / И.Е. Евгеньев, Б.Б. Каримов. — М.: ООО Транснаука, 1997. — 285 с.

5. Автотранспортное загрязнение придорожной территории / В.П. Подольский, В.Г. Артюхов, В.С. Турбин, А.Н. Канишев. — Воронеж.: Воронежский университет, 1999. — 263 с.

6. Найман С.М. Образование производственных отходов в жизненном цикле дороги / С.М. Найман. — Экология и промышленность России, 2004, № 8. — С. 35—39.

7. Болбас М.М. Основы промышленной экологии / М.М. Болбас. — М.: Высшая школа, 1993.

8. Малышева А.Г. Гигиеническая оценка фотохимической трансформации выхлопных газов автомобилей под действием озона / А.Г. Малышева. — Гигиена и санитария. 1993. № 9. — С. 6—8.

9. 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.

10. Скибинская А.А. Локальный экологический мониторинг загрязнения окружающей среды от автомобильно-дорожного комплекса / А.А. Скибинская. — Казань, 2002. — 201 с.

11. Подольский В.П. Методика определения коэффициента экологической безопасности / В.П. Подольский. — Автомобильные дороги, 1995, № 1—2. — С. 31—33.

12. Дистанционное зондирование: количественный подход / Ш.М. Дейвис, Д.Я. Ландгребе, Т.Л. Филлипс и др. — М.: Недра, 1983. — 415 с.

13. Бутенко О.С. Комплексный подход к дешифрированию снимков по данным космического мониторинга / О.С. Бутенко, С.И. Березина, Г.Я. Красовский. — Екологічна безпека та природокористування: Зб. наук. праць / М-во освіти і науки України, К., 2008. — Вип. 1. — С. 23—41.

14. Алтунин А.Е. Модели и алгоритмы принятия решений в нечетких условиях: Монография / А.Е. Алтунин, М.В. Семухин. — Тюмень: Изд-во Тюменского государственного университета, 2000. — 352 с.

15. Алексеев А.В. Применение нечеткой математики в задачах принятия решений / А.В. Алексеев / В сб.: Методы и системы принятия решений. — Рига: РПИ, 1983 — С. 38—42.

16. Иванов С.А. Стохастические фракталы в информатике / С.А. Иванов / Научно-техническая информация. Сер. 2, 2002. — 8. — С. 7—18.

17. Бутенко О.С. Анализ возможности прогнозирования распространения аномалий по данным космического мониторинга / О.С. Бутенко // Системи обробки інформації: Зб. наук. праць / М-во оборони України, Х., 2008. — Вип. 5(72). — С. 38—44.

18. Бутенко О.С. Механизм построения кратковременного прогноза по априорным данным. Системи управління, навігації та зв'язку / О.С. Бутенко. — К.: Центральний науково-дослідний інститут навігації і управління, 2008. — Вип. 3(7), — С. 37—40.

19. Брайчевський С.М. Современные информационные потоки: актуальная проблематика / С.М. Брайчевський, Д.В. Ландэ // Научно-техническая информация. Сер. 1, 2005. — 11. — С. 21—33.

Отримано: 25.04.2009 р.