УДК 504.054:556.166:665.613.2
DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.6-69.41

ВПЛИВ ДОЩОВИХ ТА ПОВЕРХНЕВИХ СТОКІВ НА МІГРАЦІЮ ТА АКУМУЛЯЦІЮ НАФТОПРОДУКТІВ У ҐРУНТОВОМУ ПОКРИВІ УРБАНІЗОВАНИХ ТЕРИТОРІЙ

Імамов В.О. (orcid.org/0009-0003-3590-9003)
Уманський національний університет
вул. Інститутська, 1, м. Умань, 20300
vyacheslav.imamov@gmail.com

У статті висвітлено результати дослідження просторово-часового розподілу, сезонної динаміки та фітотоксичності нафтопродуктів у придорожніх ґрунтах під впливом поверхневого стоку в зоні автомобільної розв'язки автошляху М-05 (м. Жашків). Встановлено визначальну роль дощових і талих вод у змиві, вертикальній інфільтрації та горизонтальному переносі вуглеводнів із водонепроникних поверхонь та їх стійкій акумуляції у верхньому горизонті ґрунту (0–10 см). Виявлено двопікову сезонну динаміку концентрацій нафтопродуктів із максимумами в осінній (дощовий) та весняний (період сніготанення) періоди. Для автомобільної розв'язки осінній та весняний максимуми в 32–36 разів перевищує фонові значення контрольної паркової зони (30–50 мг/кг). Доведено, що механізоване снігоприбирання та формування снігових відвалів уздовж узбіч узимку 2026 року зумовили їх функціонування як депонуючих сорбентів. Стрімке танення снігу навесні спричинило одномоментне вивільнення вуглеводнів у складі фільтрату, підвищивши рівні забруднення на 35–50 % понад середні багаторічні весняні показники та викликавши тимчасове блокування капілярної аерації ґрунту. Економічну та експресну оцінку екотоксичності проведено методом біоіндикації з використанням тест-об'єкту *Lepidium sativum* L. Результати засвідчили чітке градієнтне закономірне згасання фітоефекту в міру віддалення від епіцентру акумуляції стоків (0 м): пригнічення росту знижується з критичного 78,5 % (схожість 22 %, довжина корінців 8,2 мм) до помірного 31,5 % на відстані 15 м та слабкого 13,8 % на 30 м, досягаючи фонової норми (0 %) на 50 м. Встановлено, що ефективна зона фітотоксичного впливу обмежена радіусом 30 метрів, а ділянка 0–15 метрів є критичною та потребує першочергових біоремедіаційних та інженерно-екологічних заходів.
Ключові слова: нафтопродукти, поверхневий стік, придорожні ґрунти, снігові відвали, фітотестування, *Lepidium sativum* L..

Impact of Rainfall and Surface Runoff on the Migration and Accumulation of Petroleum Products in the Soil Cover of Urbanized Areas. Imamov V.

The article presents the results of a study on the spatiotemporal distribution, seasonal dynamics, and phytotoxicity of petroleum products in roadside soils influenced by surface runoff within the M-05 highway interchange (Zhashkiv). The crucial role of rainwater and snowmelt in the wash-off, vertical infiltration, and horizontal transport of hydrocarbons from impermeable surfaces and their persistent accumulation in the upper soil layer (0–10 cm) was established. A two-peak seasonal pattern in petroleum product concentrations was identified, featuring maximums during the autumn (rainy) and spring (snowmelt) periods. For the highway interchange, these autumn and spring peaks exceeded the background values of the control park zone (30–50 mg/kg) by a factor of 32–36. It was proven that mechanized snow clearing and the formation of roadside snowbanks during the winter of 2026 caused them to act as depositing sorbents. Rapid spring snowmelt led to a pulse release of hydrocarbons in the filtrate, increasing pollution levels by 35–50% above the long-term average spring values and causing temporary blockage of capillary soil aeration. The economic and rapid ecotoxicity assessment was conducted via bioindication using *Lepidium sativum* L. as a test object. The results demonstrated a clear gradient-based mitigation of the phytoeffect with increasing distance from the runoff accumulation epicenter (0 m): growth inhibition decreased from a critical 78.5% (germination rate 22%, root length 8.2 mm) to a moderate 31.5% at a distance of 15 m and a mild 13.8% at 30 m, reaching the background norm (0%) at 50 m. It was established that the effective zone of phytotoxic impact is limited to a 30-meter radius, whereas the 0–15-meter zone is critical and requires priority bioremediation and environmental engineering measures.
Key words: petroleum products, surface runoff, roadside soils, snowbanks, phytotesting, *Lepidium sativum* L.

Постановка проблеми. Інтенсифікація процесів урбанізації та зростання щільності транспортних мереж призводять до посилення техногенного тиску на ґрунти міських екосистем. Одним із найбільш небезпечних видів векторів хімічного забруднення урбаноземів є надходження паливно-мастильних матеріалів, продуктів стирання шин і дорожнього покриття, які вимиваються з твердих поверхонь під час випадання атмосферних опадів та сніготанення. Поверхневий і талий стік функціонує як основний трансферний агент, що забезпечує акумуляцію високотоксичних вуглеводневих сполук у верхніх горизонтах придорожніх ґрунтів [1]. Це створює постійне екотоксикологічне навантаження на біоту [2] та призводить до деградації природних функцій ґрунтового покриву в зоні впливу автомагістралей.

Складність оцінки та прогнозування наслідків такого забруднення полягає у вираженій просторово-часовій динаміці надходження нафтопродуктів. Сезонні гідрометеорологічні чинники у поєднанні з роботою комунальних служб (зокрема формуванням снігових відвалів вздовж доріг) формують осе-

© Імамов В.О., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

редки критичного вмісту токсикантів. При цьому традиційний моніторинг, базований виключно на фізико-хімічному визначенні валових концентрацій, не дає повного уявлення про інтегральну біологічну активність і реальну небезпеку забруднювачів для живих організмів. У зв'язку з цим постає гостра потреба в обґрунтуванні комплексних підходів, що поєднують аналіз просторово-динамічного перерозподілу поверхневих стоків із застосуванням експресних біоіндикаційних методик для визначення зон екологічного ризику.

Актуальність дослідження. Серед різноманіття забруднювальних речовин на урбанізованих територіях окрему екотоксикологічну небезпеку становлять нафтопродукти. Основою перерозподілу цих вуглеводнів виступають дощові та талі поверхневі стоки, які змивають токсиканти з водонепроникних поверхонь та сприяють їх стійкій акумуляції у верхніх горизонтах придорожніх ґрунтів [3]. Особливої гостроти дана проблема набуває в зимово-весняний період. Механізоване снігоприбирання та згортання снігових мас на узбіччя формують тимчасові вали, які акумулюють значні обсяги паливно-мастильних матеріалів. Під час інтенсивного весняного танення відбувається вивільнення токсикантів у складі висококонцентрованого фільтрату, що викликає короткочасне критичне забруднення придорожнього ґрунтового покриву [4].

Традиційні моніторингові підходи, базовані виключно на фізико-хімічному визначенні валових концентрацій нафтопродуктів, вимагають високих фінансових витрат, використання коштовного обладнання та тривалої підготовки проб. Водночас вони не дають уявлення про інтегральну біологічну активність і реальну токсичність забруднювачів для біоти. У цьому контексті надзвичайно актуальним є залучення методів біоіндикації та фітотестування. Це дозволяє суттєво зменшити кошторис моніторингових досліджень та встановити реальні межі просторового згасання токсичного впливу поверхневого стоку для обґрунтування адресації біоремедіаційних та інженерно-екологічних заходів.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Публікацію підготовлено за результатами наукових досліджень, виконаних у межах держбюджетної кафедральної теми кафедри екології Уманського національного університету «Розробка методологічних підходів і практичного механізму екологічно-збалансованого природокористування» (номер державної реєстрації 0108U009772).

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання техногенної трансформації урбаноземів та суміжних екосистем під впливом транспортних коридорів перебуває у центрі уваги багатьох вітчизняних і зарубіжних науковців. У сучасній екологічній літературі доведено, що автомобільний транспорт є одним із ключових джерел полікомпонентного забруднення, де провідну екотоксикологічну роль відіграють важкі метали та паливно-мастильні матеріали [5–7]. Дослідження фракційного складу та вертикально-просторового розподілу нафтопродуктів свідчать, що найбільша маса малорухомих і важких ароматичних фракцій депонується у верхніх горизонтах придорожніх ґрунтів безпосередньо у вузькій смузі узбіччя, утворюючи стійкі осередки деградації [8]. Водночас аналіз шляхів міграції вуглеводнів показує складний характер їх перенесення: поряд із безпосереднім розбризкуванням та витоками палива, значна частка забруднювачів надходить у складі відпрацьованих газів та аерозолів.

Останніми роками фундаментального значення набули праці, присвячені деталізації хімічного складу та поведінки комплексного дорожнього стоку [9]. Встановлено, що поверхневий та талий стік функціонує як основний трансферний агент, який змиває з покриття не лише залишки паливно-мастильних матеріалів, але й частки зносу шин та асфальтобетону, що є носіями поліциклічних ароматичних вуглеводнів і пластифікаторів [10]. Зі свого боку, вітчизняні дослідники наголошують на необхідності врахування локальної гідрологічної мережі та специфіки рельєфу придорожніх територій під час оцінки міграції токсикантів у системі «поверхневий стік–ґрунт–рослина» [11].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Попри численні дослідження урбаноземів, недостатньо вивченими залишаються закономірності просторового згасання інтегральної токсичності ґрунтів під впливом поверхневого стоку з малих регіональних авторозв'язок. Потребує оцінки вплив комунальних снігових відвалів на формування короткочасних піків забруднення під час аномальних зимово-весняних періодів. Також бракує експресних біоіндикаційних методик для зонального картографування реальної біологічної небезпеки в місцях акумуляції зливових вод.

Новизна. Вперше на основі аналізу сезонної динаміки вуглеводневого забруднення та біоіндикаційного фітотестування із застосуванням *Lepidium sativum* L. кількісно встановлено просторові межі (0–30 м) та радіус критичної екотоксичної дії (15 м) поверхневого стоку з автошляху М-05 у м. Жашків. Отримано нові дані щодо впливу екстремального снігонакопичення та танення комунальних снігових відвалів на формування короткочасних критичних піків токсичності придорожніх ґрунтів, які перевершують середньовесняні показники більш ніж на 35 %.

Методологічне або загальнонаукове значення. Методологічне значення роботи полягає у обґрунтуванні концептуального підходу до комплексної оцінки екологічного стану урбоекосистем шляхом поєднання експресних біоіндикаційних методик із просторово-динамічним аналізом техногенного навантаження. Розроблена схема оцінки фітотоксичності за допомо-

гою *Lepidium sativum* L. демонструє високу чутливість до інтегральної дії комплексного забруднення поверхневим стоком, що дозволяє верифікувати реальний екологічний ризик без залучення ресурсомістких інструментальних аналізів. Запропонована методологічна матриця делімітації зон техногенного впливу створює універсальний алгоритм для моніторингу та зонування придорожніх територій за ступенем їхньої екологічної вразливості.

Викладення основного матеріалу. Результати аналізу просторово-часового розподілу та специфіки накопичення нафтопродуктів у ґрунтовому покриві свідчать про визначальну роль поверхневого стоку в формуванні локальних зон екологічного ризику на урбанізованих територіях. Формування дощових і талих вод уздовж транспортних артерій забезпечує змив, вертикальне прочування та горизонтальний перенос вуглеводнів, що призводить до їх стійкої акумуляції у верхніх горизонтах ґрунту.

Дослідження динаміки вмісту нафтопродуктів протягом річного гідрологічного циклу показало суттєву сезонну асиметрію їхнього надходження та накопичення (рис. 1).

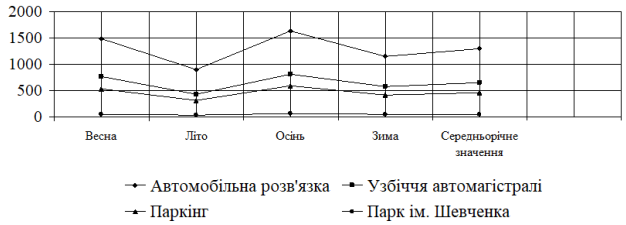

Рис. 1. Сезонна динаміка вмісту нафтопродуктів у верхньому горизонті ґрунту (0–10 см) залежно від функціонального призначення території, мг/кг сухого ґрунту

Аналіз графічних даних, що відображають сезонну динаміку вмісту нафтопродуктів у верхньому шарі ґрунту (0–10 см), демонструє чітку залежність між рівнями техногенного навантаження, функціональним призначенням території та гідролого-кліматичними чинниками.

На графіку виразно простежується двопікова сезонна пульсація концентрацій вуглеводнів із максимумами в осінній (дощовий) та весняний (період сніготанення) періоди. Найбільш амплітудні коливання притаманні зоні прямого стоку біля автомобільної розв'язки, де осінній максимум сягає 1622 мг/кг, а весняний – 1481 мг/кг, що в 32–36 разів перевищує фонові показники контрольної паркової зони. Така тенденція зумовлена інтенсифікацією площинного змиву із заасфальтованих поверхонь у періоди випадання рясних опадів та активного танення снігового покриву.

Літній період (межень) на всіх графічних кривих характеризується спадом вмісту нафтопродуктів, зокрема до 889 мг/кг на автомобільній розв'язці та 420 мг/кг на узбіччі. Це пояснюється зменшенням обсягів поверхневого стоку, зниженням інтенсивності змиву, а також активізацією процесів мікробіологічної деструкції та випаровування легких фракцій вуглеводнів за підвищених температур. Зимові відлиги супроводжуються повторним підйомом графічних трендів через надходження важких фракцій паливно-мастильних матеріалів у складі талих вод.

Просторовий зріз даних на графіку фіксує послідовне затухання техногенного сигналу в міру віддалення від джерела емісії: від критичних рівнів акумуляції на розв'язці до помірних показників у зоні паркінгу біля універмагу (середньорічне значення 457 мг/кг) та стабільно низьких, близьких до природного фону, у парковій зоні (30–50 мг/кг). Таким чином, графічна модель переконливо доводить, що поверхневий та дощовий стік є ключовим вектором сезонного перерозподілу та просторової акумуляції нафтопродуктів у міському середовищі.

Окремого розгляду потребує аналіз екстремального техногенного навантаження, зафіксованого під час інтенсивного сніготанення навесні 2026 року. Значний обсяг зимових опадів у поєднанні з роботою комунальної техніки, яка механічно згортала та накопичувала снігові маси безпосередньо на узбіччях і у придорожній смузі, зумовив формування локальних осередків надвисокої концентрації забруднювачів.

Упродовж зимового періоду відкладені снігові відвали функціонували як ефективне депонуюче середовище-сорбент, накопичуючи не лише тверді частки та протиожеледні реагенти, а й високотоксичні важкі фракції нафтопродуктів (мастильні матеріали, залишки незгорілого палива, продукти зносу покришок). Стрімке підвищення температури навесні 2026 року спричинило одномоментне вивільнення акумульованих вуглеводнів у складі висококонцентрованого фільтрату та талого стоку (рис. 2).

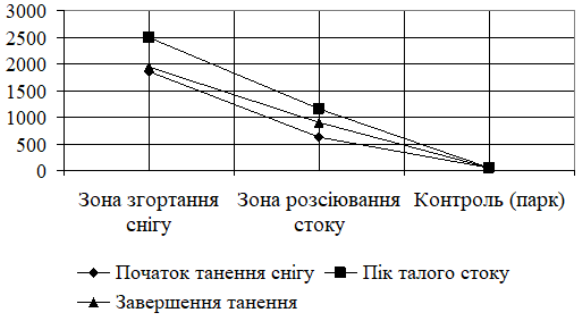

Рис. 2. Динаміка вмісту нафтопродуктів у придорожньому ґрунті (шар 0–10 см) під час танення снігових відвалів уздовж магістралі у березні–квітні 2026 року, мг/кг сухого ґрунту

Внаслідок інфільтрації цих високотоксичних талих вод у верхні горизонти придорожніх ґрунтів

спостерігалося різке короткочасне зростання вмісту нафтопродуктів, яке перевершило середні багаторічні весняні значення на 35–50 %. Механічно ущільнені снігові вали, танучи нерівномірно, формували локальні застійні зони, де відбувалося насичення ґрунтового профілю важкими вуглеводнями без можливості їхнього швидкого розбавлення чи вимивання. Це спричинило тимчасове блокування капілярної аерації ґрунту та формування деструктивних аеробно-анаеробних умов, що суттєво сповільнило початкові фази біодеградації нафтопродуктів на початку вегетаційного сезону.

Застосування інструментальних фізико-хімічних методів для визначення вмісту нафтопродуктів потребує дороговартісного обладнання, імпортних реактивів та тривалої підготовки проб. Залучення методів біоіндикації та фітотестування дозволяє суттєво зменшити кошторис моніторингових досліджень (у 5–8 разів), забезпечуючи експресну оцінку не просто концентрації вуглеводнів, а їхньої інтегральної біологічної активності та реальної токсичності для живих організмів.

Для аналізу просторового згасання токсичного впливу поверхневого стоку було проведено серію фітотестів з використанням тест-об'єкту *Lepidium sativum* L. на зразках ґрунту, відібраних на різній віддалі від основного локального зниження рельєфу – зони скупчення зливових вод біля розв'язки автошляху М-05 у м. Жашків (табл. 1).

Результати фітотестування із застосуванням *Lepidium sativum* L. засвідчують чітко виражену градієнтну закономірність просторового згасання токсичного впливу поверхневого стоку в міру віддалення від осередка його акумуляції біля автошляху М-05 у м. Жашків.

Епіцентр накопичення зливових вод (0 м) характеризується критичним рівнем екотоксичності: пригнічення росту тест-культури сягає 78,5 %, а схожість насіння та морфометричні параметри проростків становлять лише 22 % від контролю та 8,2 мм відповідно. Зазначений ефект зумовлений високою концентрацією токсичних компонентів стоку, насамперед нафтопродуктів та супутніх забруднювачів.

У міру віддалення від джерела емісії спостерігається послідовна редукція фітоефекту. Уже в зоні періодичного затоплення (5 м) токсичність знижується до 57,0 %, за якої схожість зростає до 45 %, а довжина корінців – до 16,4 мм. Буферна зона узбіччя (15 м) та зона розсіювання (30 м) демонструють помірний (фітоефект 31,5 %) та слабкий (13,8 %) рівні токсичного навантаження відповідно, що проявляється інтенсифікацією ростових процесів досліджуваного фітоіндикатора (довжина проростків підвищується до 26,1–32,8 мм, а схожість насіння досягає 72–88 %).

На відстані 50 м від розв'язки автошляху показники схожості насіння (98 %) і довжини корінців (38,0 мм) досягають фонових значень, що відповідає допустимому рівню токсичності та свідчить про повну нейтралізацію негативного впливу поверхневого стоку ґрунтово-рослинним комплексом.

Таким чином, ефективна зона фітотоксичного впливу зливових стоків від автошляху обмежена радіусом 30 метрів, тоді як ділянка в межах 0–15 метрів потребує впровадження спеціальних біоремедіаційних або інженерно-екологічних заходів для локалізації забруднення та запобігання його міграції в суміжні екосистеми.

Головні висновки. Проведені дослідження засвідчують, що поверхневий та дощовий стік виступає провідним фактором просторово-часового перерозподілу нафтопродуктів у ґрунтовому покриві урбанізованих територій, викликаючи двопікову пульсацію вмісту вуглеводнів із максимумами в осінній та весняний періоди. Накопичення снігових мас на узбіччах під час суворих зим та їхнє подальше танення створює додатковий сплеск токсичного навантаження, що перевершує середньовесняні показники на 35–50 % та локально блокує аерацію ґрунтового профілю. Застосування фітотестування з *Lepidium sativum* L. довело свою високу економічну та аналітичну ефективність, зафіксувавши градієнтне згасання токсичності від критичного рівня (фітоефект 78,5 %) у центрі акумуляції стоку біля автошляху М-05 до допустимого значеннння на відстані 50 метрів.

Таблиця 1

Динаміка біоіндикаційних показників ґрунту (*Lepidium sativum* L.) залежно від віддаленості від точки акумуляції зливових стоків

Віддаленість від центру скупчення стоків, м	Схожість насіння, % від контролю	Довжина проростків (корінців), мм	Фітоефект (пригнічення росту), %	Рівень токсичності ґрунту
0 м (центр акумуляції стоку)	22±2,4	8,2±0,9	78,5	сильнотоксичний (критичний)
5 м (зона періодичного затоплення)	45±3,8	16,4±1,5	57,0	токсичний
15 м (буферна зона узбіччя)	72±5,1	26,1±2,2$	31,5	помірнотоксичний
30 м (зона розсіювання)	88±6,0	32,8±2,7	13,8	слабкотоксичний
50 м (умовний контроль)	98±4,2	38,0±2,4	0,0	допустимий

ISSN: 2306-9716 (Print), ISSN: 2664-6110 (Online)

Перспективи використання результатів дослідження. Отримані дані створюють основу для оптимізації систем муніципального екологічного моніторингу шляхом впровадження економічно доцільних біоіндикаційних методик та корегування містобудівних регламентів щодо ширини і флористичного складу загороджувальних біофільтраційних смуг вздовж магістралей. З'ясована роль снігових відвалів у критичному забрудненні ґрунтів обґрунтовує необхідність перегляду технологічних регламентів комунальних служб із вимогою вивозу снігу на спеціально обладнані майданчики за межі селітебних зон. Крім того, виділення зон критичного фітоефекту (0–15 м) дозволяє адресно впроваджувати фіторемедіаційні технології для прискорення самоочищення міських ґрунтів.

Література

1. Mykhailova L., Fischer T., Iurchenko V. Distribution and Fractional Composition of Petroleum Hydrocarbons in Roadside Soils. *Applied and Environmental Soil Science*, 2013. Vol. 2013. 6 p. https://doi.org/10.1155/2013/938703
2. Риженко Н. О., Жаврида Д. Є., Бохонов Ю. О., Риженко Д. В. Оцінка техногенного навантаження та міграції токсикантів у системі «ґрунт–рослина». *Екологічні науки,* 2021. № 2 (35). С. 90–93. https://doi.org/10.32846/2306-9716/2021.eco.2-35.15
3. Gillis Patricia, Parrott Joanne, Helm Paul. Environmental Fate and Effects of Road Run-Off. *Archives of environmental contamination and toxicology*, 2022. 82. https://doi.org/10.1007/s00244-021-00906-3.
4. Baensch-Baltruschat B., Kocher B., Stock F., Reifferscheid G. Tyre and road wear particles (TRWP) – a review of generation, properties, emissions, human health risk, ecotoxicity, and fate in the environment. *Sci. Total Environ.*, 2020. 733:137823. https://doi.org/10.1016/j.scito tenv.2020.137823.
5. Трошин Михайло, Кістол Антоніна, Баранник Вадим. Вплив автомобільного транспорту на довкілля. *Grail of Science*, 2023. 26. С. 261–264. https://doi.org/10.36074/grail-of-science.14.04.2023.047.
6. 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.
7. 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.
8. Polkowska Ż., Skarżyńska K., Dubiella-Jackowska A., Staszek W., Namieśnik J. Evaluationof pollutant loading in the runoff waters from a major urban highway (Gdansk Beltway,Poland). *Global NEST Journal*, 2007. Vol 9, No 3. P. 269–275.
9. Піціль А. О. Екологічні аспекти формування талого поверхневого стоку з території міста (на прикладі м. Житомир). *Зб. наук. пр. Подільського держ. аграр.-техн. ун-ту.*, 2009. Спец. вип.: Сучасні проблеми збалансованого природокористування. С. 215–217.
10. Jiang Yang, Wang Chunzhi, Ma Ling, Gao Tiantian, Wāng Yán. Environmental profiles, hazard identification, and toxicological hallmarks of emerging tire rubber-related contaminants 6PPD and 6PPD-quinone. *Environment international*, 2024. 187. 108677. https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.108677.
11. Адамова Г. В. Комплексна еколого-аналітична оцінка системи «автомобіль – дорога – середовище» на прикладі ділянки дороги М-29. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, серія «Екологія»*, 2021. Вип. 25. С. 55–69. https://doi.org/10.26565/1992-4259-2021-25-05.

Дата першого надходження статті до видання: 16.10.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 04.11.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 23.11.2026