NEMYSHLIA/CSM

версія 1.0

07.03.2026

Copyright © 2026 NGO e-Dialog

Концептуальна модель забруднення нафтопродуктами території Немишлянського району і заплавно-ставковій системі річки Немишля



Керівник проекту **Олексій Мусатов**

1. Вступ

Звіт про попереднє дослідження забрудненості нафтопродуктами території Немишлянського району і заплавно-ставковій системі річки Немишля підготовлено відповідно до завдань Меморандуму про співпрацю та взаєморозуміння, укладеним між Департаментом будівництва та шляхового господарства Харківської міської ради, Науково-дослідної установи «Український науково-дослідний інститут екологічних проблем» та ГО «е-Діалог» від 07.01.2026 р.

Метою попереднього дослідження є розробка початковой Концептуальної моделі забруднення в результате розливу нафтопродуктів під час атаки на нафтобазу ТОВ «ХБН-Резерв» у лютому 2024 року (далі – Концептуальна модель забруднення) для ідентифікації і верифікації загроз за допомогою порогових нормативних показників та визначення цілей ремедіації.

Концептуальну модель забруднення розроблено

відповідно до стандарту:

ДСТУ ISO 10381-5: 2009 «Якість ґрунту. Відбирання проб. Частина 5. Настанова з процедури дослідження міських і промислових ділянок щодо забрудненості ґрунту»

згідно з методикою:

LNAPL-3: LNAPL Site Management: LCSM Evolution, Decision Process, and Remedial Technologies», Interstate Technology and Regulatory Council, USA

на підставі вихідних даних:

Анотований науково-технічний звіт «Дослідження та оцінка екологічного стану довкілля за періоди: липень-вересень 2024 р., жовтень - грудень 2024 р., січень-квітень 2025 р.», Науково-дослідна установа «Український науково-дослідний інститут екологічних проблем», 8 книг;

Науково-технічний звіт про науково-дослідну роботу на рему «Оцінка соціально-економічного стану населення Немишлянського району м. Харкова, постраждалого під час вибуху і пожежі на нафтобазі в результаті обстрілів рф, на основі проведення натурних досліджень (анкетування)», ТОВ НТВК «Україна», Харків, 2024 р.;

Звіт про інженерно-геологічні вишукування по об’єкту «Реконструкція відкритого водостоку по вул. Ясеневій на ділянці від вул. Високогірної до просп. Тракторобудівників у м. Харкові», ТОВ «Хорда-Юа», 2024 р.;

Результати польових спостережень під час інспектування ділянки забруднення, ГО «е-Діалог», грудень 2025 р.

Концептуальна модель забруднення побудована на основі аналізу відповідних ліній доказів, які охоплюють мікробіологію, гідрогеологію, нафтохімію і геохімію та вимагатиме верифікації гіпотез і уточнення меж забруднення в процесі подальшого польового дослідження з відбором і аналізом проб.

Розроблена модель інтегрує інформацію, що стосується загроз, шляхів та рецепторів впливу забруднення для прийняття економічно виправданих управлінських рішень щодо стратегії відновлення забрудненої екосистеми Немишлянського району.

2. Характеристика Немишлянського району

Рельєф території Немишлянського району міста Харкова, яка зазнала впливу забруднення нафтопродуктами, сформований схилом долини річки Немишля і має виражену терасовану будову.

У верхній частині схилу переважають лесові тераси, складені материнськими пилувато-суглинистими відкладами, перекритими шаром чорноземів різного ступеня трансформації для яких характерні середня щільність і відносно добра водопроникність. Потужність ґрунтового покриву зазвичай становить 110–120 см, при цьому гумусовий горизонт простягається до глибини 40–50 см із вмістом гумусу до 8%.

Середня частина схилу відповідає рівню нижчих лесових терас, складених суглинками та лесовидними суглинками з включеннями делювіальних відкладів, а ґрунтовий покрив представлений солонцюватими чорноземами та місцями солонцями, які характеризуються підвищеною щільністю, зниженою фільтраційною здатністю та схильністю до накопичення солей.

У межах долини материнські породи представлені алювіальними та алювіально-делювіальними відкладами, складеними суглинками, супісками та пісками, на яких сформувався ґрунтовий покрив представлений подзолистими ґрунтами, що характеризуються підвищеною водопроникністю, промивним водним режимом і відносно низьким вмістом гумусу.

Клімат району відноситься до південного лісостепу з помірним континентальним. Середньомісячна температура повітря вище 0 °С спостерігається з квітня по листопад, а вище 15 °С — з травня по вересень.



Рисунок 1. Ситуаційний план, Немишлянський район, м. Харків

У зимові місяці середня температура поверхні ґрунту незначно відрізняється від середньої температури повітря, а найнижча середньомісячна температура ґрунту −7 °С спостерігається у січні. У березні температура ґрунту залишається від'ємною і становить близько −1 °С, після чого вона підвищується до близько +18 °С у травні. Влітку температура ґрунту поступово підвищується до +26 °С у липні, при цьому в літні місяці вона, як правило, на 3–5 °С вища за температуру повітря. Зниження температури ґрунту починається вже у серпні, проте у листопаді середня температура поверхні ґрунту залишається ще додатною і становить +1 °С.

Температура ґрунту гумусового шару на різних глибинах змінюється значно повільніше та зазнає суттєво менших коливань, однак температура ґрунту протягом року слідує за температурою його поверхні. У середньому за рік кількість днів із температурою ґрунту 0 °С і нижче становить близько 87 днів на глибині 0,25 м і близько 36 днів на глибині 0,5 м, до від'ємних значень щороку промерзає лише верхній шар ґрунту глибиною близько 50–60 см.

За кількістю атмосферних опадів район належить до зони недостатнього зволоження: середньорічна сума опадів становить близько 528 мм, причому характерний континентальний річний хід опадів із максимумом у літні місяці та мінімумом узимку. Значними вважаються опади понад 8 мм за 12 годин, у середньому за рік у районі спостерігається близько 13 півдіб із такими опадами які випадають переважно в теплий період року.

3. Характеристика ділянки забруднення

Ділянка, що зазнала впливу забруднення нафтопродуктами, характеризується як складна урбанізовано-природна екосистема, яка поєднує промислову і житлову зону з заплавно-ставкової системою річки Немишля.

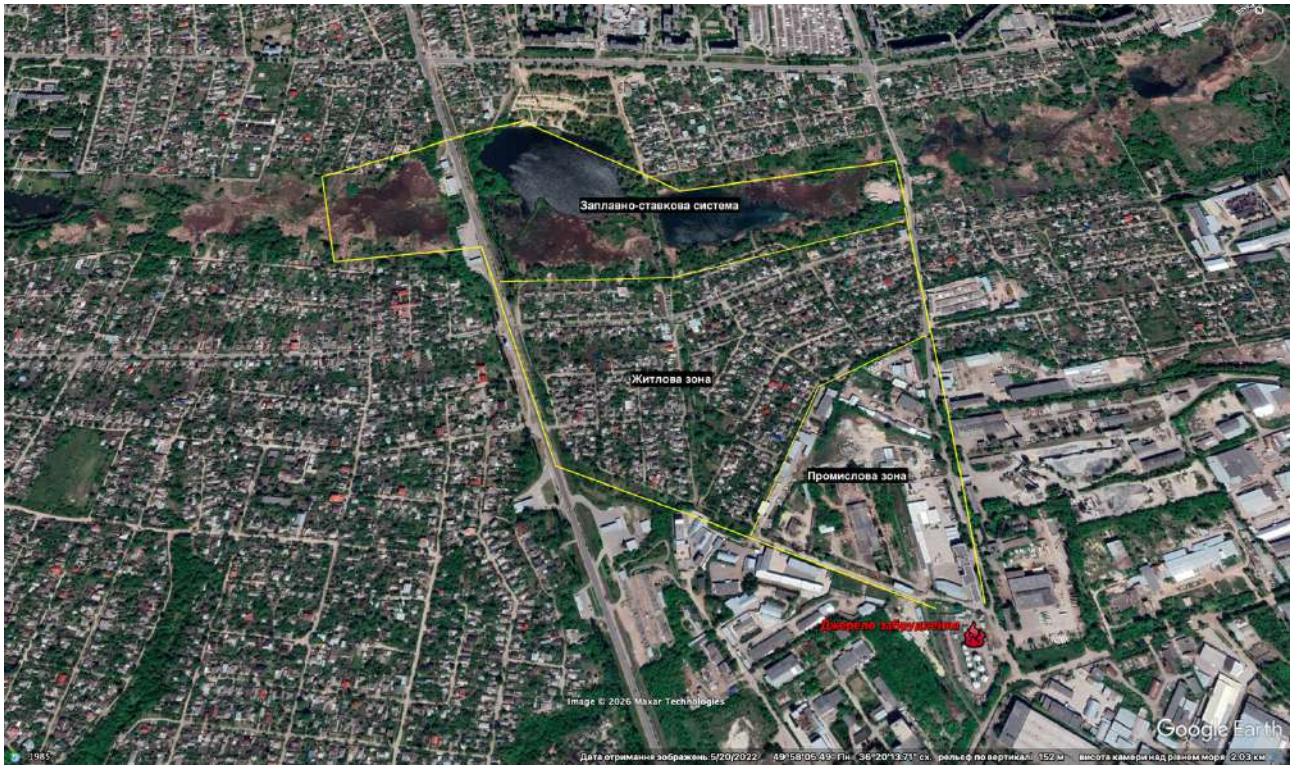


Рисунок 2. Ситуаційний план ділянки забруднення

Промислова зона розміщена на вищій частині пагорба та включає підприємства приватної власності з виробництва кабельної продукції, промислового порошкового фарбування, виготовлення нафтопромислового й енергетичного обладнання, об'єкти зберігання нафтопродуктів і металопрокату, а також оптової торгівлі хімічними речовинами, що вказує на тривале техногенне навантаження на довкілля. Характер благоустрою промислової зони визначається переважанням твердих покриттів: виробничі та складські майданчики влаштовані з бетону або представлені спланованим ущільненим ґрунтом, проїзди здебільшого виконані із залізобетонних плит, а периметр забудови сформований бетонними огорожами.

Житлова зона розташована на схилі пагорба та представлена щільною садибною забудовою, що налічує понад 332 приватних домоволодінь із присадибними ділянками. Значна частина домоволодінь на даний час не використовується для проживання у зв'язку з забрудненням ґрунтів нафтопродуктами. Серед мешканців, що залишилися, переважають особи похилого віку, для яких вирощування продукції на присадибних ділянках є важливим джерелом харчування. Домоволодіння підключені до централізованої системи водопостачання і водовідведення, проте значна частина мешканців історично використовує підземні води через свердловини та колодязі, зокрема для поливу городів.

У минулому широко практикувалося вирівнювання території шляхом засипання будівельними та промисловими відходами, що сприяло вимиванню забруднювальних речовин і забрудненню

ґрунтових вод [1]. Вулична мережа сформована насипним ґрунтом, який зазнав природного ущільнення внаслідок тривалої експлуатації транспортом і пішохідного навантаження. Як і територія промислової зони, житлова забудова облаштована системою ливневої каналізації.

Заплавно-ставкова система розташована у долини та включає русло річки Немишля, заплаву та штучні водойми, зокрема Петренківський ставок і менший, безіменний ставок (далі — Малий ставок). Малий ставок ймовірно утворений шляхом влаштування дамби в пониженні русла річки для забезпечення роботи Немишлянського піщаного кар'єру, тоді як Петренківський ставок сформувався пізніше внаслідок затоплення відпрацьованого кар'єру. Наразі ці водойми використовуються як рекреаційні міські водні об'єкти для купання, рибальства та відпочинку населення.

Заплава річки Немишля характеризується наявністю стоячої води, потужних мулистих відкладів та густих заростей очерету. Живлення заплави здійснюється за рахунок вод річки, талих вод і дощових опадів, а також розвантаження ґрунтових вод. Рівень води в річці та заплаві визначається весняним повінем (кінець лютого – початок березня) і тривалою літньо-осінньою (кінець квітня – початок травня) та зимовою меженню. У період весняної повені заплава затоплюється на глибину від 1,0 до 3,0 м терміном на 10-15 днів. В окремі роки дощові паводки в період межені викликають короткочасні підйоми рівня, що досягають 0,5-1,0 м, а іноді і 1,6-2,0 м. Льодостав встановлюється у другій половині листопада — першій половині грудня із середньою тривалістю 2,5–3,0 місяці.

Між заплав-ставкою системою та житловою забудовою розташована буферна озеленена територія, вкрита природною трав'янистою, чагарниковою та деревною рослинністю.

Річка Немишля відноситься до басейну р. Сіверський Донець, у межах можливого поширення шлейфа забруднення розташовані прибережні мікрорайони м. Харків та 17 селищ Харківській області із загальною чисельністю населення близько 43 900 осіб.

4. Історія розливу нафтопродуктів

О 22:46 09 лютого 2024 р. нафтобаза ТОВ «ХБН-Резерв» із проєктним обсягом зберігання нафтопродуктів в дев'яти наземних резервуарах 6 100 т зазнала атаки ударних безпілотних літальних апаратів.

У результаті вибуху та пошкодження частини наземних резервуарів стався витік близько 3 000 – 4 000 т [5] дизельного палива та бензину [6], що супроводжувався масштабною пожежею. Як згадують очевидці, «вибухом паливо буквально розприскалось навколо, паливно-мастильні матеріали потрапили на дахи будівель, дерева, у подвір'я» [3].



Рисунок 3. Пожежа в результаті атаки на нафтобазу ТОВ «ХБН-Резерв»

Відсутність або руйнування під час атаки захисних споруд на нафтобазі призвело до «витоку пального на вулицю (Ясенева) та подальшого стікання вниз у напрямку житлових будинків» [5], [6], нафтопродукти, «змішавшись зі снігом, стікали вниз вулицею (Ясенева)» [2]. З урахуванням ухилу вулиці близько 5%, наявності покриття залізобетонних плит та огородження з обох боків бетонними парканами промислових підприємств, розлиті нафтопродукти поширювалися вздовж вулиці переважно шляхом поверхневого стікання у напрямку пониження рельєфу і просочування в ґрунт на ділянках дороги, не облаштованих плитами.

На перехресті вулиці Ясенева з вулицею Високогірна частина потоку нафтопродуктів потрапила до ґрунтової водовідвідної канави прямокутного профілю, яка є частиною ділянки міської зливової системи, що відводить воду в річку Немишля, нижче за течією від мосту проспекту Тракторобудівників.

Інша частина потоку продовжила стікати вздовж вулиці Ясенева, а згодом — і вулицею Котельна з ухилом більше 7%. За словами керівника слідчого управління обласної поліції

«місце події не є (тільки) ця вулиця (Котельна), це фактично невеликий мікрорайон. Це не одна вулиця Котельна, це вулиці, по яких йшло паливо, яке горіло» [6]. Вогонь поширився на прилеглу житлову забудову вулиці Ясенева і Котельна, внаслідок чого було зруйновано та пошкоджено 15 житлових будинків, загинуло 7 осіб [7].



Рисунок 4. Вулиця Котельна після розливу нафтопродуктів

Інші вулиці району подій не містять ознак пожежі, таких як обгорілі дерева, паркани та будинки та мають вищі висотні відмітки порівняно з вулицею Ясенева в місцях перехресть, що вказує на відсутність поширення нафтопродуктів цими вулицями шляхом поверхневого стікання, проте їхнє забруднення могло відбутися внаслідок розкидання нафтопродуктів під час вибуху.

Поширюючись вниз дорогою з покриттям із ущільненого насипного ґрунту вулиці Котельна, частина нафтопродуктів просочувалася в ґрунт і потрапляла до каналізаційних шахт, розташованих уздовж дороги біля домоволодінь. У долині, на перехресті з вулицею Немишлянська, потік нафтопродуктів разом із талою водою надходив до міської системи ливневої каналізації, якою в подальшому потрапляв до заплав Петренківського та Малого ставків [3].

Заплава, що характеризується відсутністю сталого водообміну та щільним заростанням очеретом, виконала функцію природного фільтра на шляху поширення забруднення, утримавши основний обсяг важких фракцій нафтопродуктів. Проте вона має ділянку, не відокремлену від Петренківського ставка ґрунтовою перемичкою, через яку легкі фракції нафтопродуктів потрапили до річки Немишля.

З річкою Немишля шлейф забруднення поширився на річки Харків, Лопань, Уди і Сіверський Донець [12]. За даними Державної екологічної інспекції [2], концентрація нафтопродуктів у річковій воді на відстані до 27 км від місця аварії перевищила гранично допустиму норму у 7–8 разів, тоді як у річці Немишля - у 95 разів.



Рисунок 5. Нафтопродукти у ґрунті перемички між заплавою і Петренківським ставком на відстані більше 1 км від джерела розливу, грудень 2025 р.

За словами екологічних активістів [4], на п’ятий день після розливу на річках було встановлено бонові загородження та застосовано сорбент. На ділянках, що зазнали найбільшого впливу нафтопродуктів унаслідок поверхневого розливу, виконано заміну верхнього шару ґрунту.

Улітку 2024 року територія вдруге зазнала ракетного обстрілу, унаслідок чого в заплаві виникла пожежа, під час якої згоріли очерет та легкі фракції нафтопродуктів, накопичені на поверхні води [8].

За офіційною інформацією площа території забруднених ґрунтів становить 10 000 м^2 [2], поверхневих вод річок – 780 000 м^2 [5].

5. Пріоритетні шляхи міграції забруднення

Під пріоритетними шляхами міграції розуміють канали поширення забруднення, якими воно переміщується зі швидкістю, що значно перевищує швидкість міграції в матриці навколишнього середовища, на більші відстані та в напрямках, які за звичайних умов є неочікуваними.

Ділянка забруднення характеризується наступними пріоритетними шляхами міграції:

- розкидання нафтопродуктів під час вибуху
- рельєф місцевості
- підземні комунікації
- міська система ливневої каналізації
- верхній насипний шар ґрунту

5.1 Розкидання нафтопродуктів під час вибуху

Розкидання нафтопродуктів унаслідок ураження наземного резервуара ударним безпілотним літальним апаратом відбувається за механізмом гідродинамічного удару [9]. Енергія детонації бойової частини миттєво передається рідким нафтопродуктам, у яких формується ударна хвиля, що спричиняє розриви стінок резервуара. У товщі рідини утворюється порожнина з газоподібних продуктів детонації, швидке розширення якої витісняє нафтопродукти до периферії та створює ефект гідравлічного поршня всередині резервуара. Розширення газової порожнини в обмеженому об’ємі резервуара формує імпульс внутрішнього тиску, який виштовхує нафтопродукти через пробоїну та розриви стінок резервуара. За високих швидкостей викиду струмені швидко розпадаються на краплі. Процес викиду відбувається раніше за займання, тому нафтопродукти викидаються на значну відстань без згоряння.

З урахуванням нелінійності процесу точне визначення дальності розкидання нафтопродуктів є неможливим, оскільки на неї одночасно впливають тиск вибуху, геометрія пошкодження, об’єм рідини та подальше дроблення струменів на краплі. Тому для інженерної оцінки першого наближення доцільно застосувати спрощену балістичну модель польоту крапель як тіл, під кутом до горизонту з урахуванням початкової висоти. За умови початкової швидкості струменя рідини 111 м/с, зафіксованої у балістичних експериментах з гідродинамічного удару [10], висоти резервуара 12 м, кута розкидання близько 45° та з урахуванням аеродинамічного опору крапель 0,5, розрахункова зона розкидання нафтопродуктів може бути описана як кругова область радіусом близько 635 м із центром у точці вибуху.

Відповідно до спрощеної моделі, розкидання нафтопродуктів мало нерівномірний характер і могло відбутися на локальних ділянках промислової території та в межах двох кварталів житлової забудови. Житлова забудова розташована на периферії розрахункової дальності розкидання, тому інтенсивність випадіння нафтопродуктів у цій зоні була істотно меншою порівняно з промисловою зоною. За умов щільної забудови сформувався додатковий екрануючий ефект: краплі осідали переважно на дахах, фасадах і огорожах, після чого стікали локально вздовж периметрів будівель на ґрунт у вигляді вузьких смуг, у результаті чого утворилося дискретне поверхневе забруднення верхнього шару ґрунту.

Дискретний характер забруднення в зоні розкидання нафтопродуктів підтверджується результатами анкетування мешканців: жителі пров. 1-й Плідний оцінили частку забрудненої території приблизно у 15 % площі, тоді як мешканці вул. Танкова, розташованої на основному шляху поверхневої міграції нафтопродуктів, — у 100 % [8].

Після розтікання нафтопродуктів по території різко зростає площа відкритої поверхні, що призводить до швидкого випаровування легких фракцій і формування пароповітряної суміші над плямою розливу. Одночасно під дією турбулентних потоків і теплової конвекції частина рідини додатково дробиться на дрібні краплі, утворюючи мелкодисперсний паливний аерозоль. Поширення аерозольної хмари може відбуватися на відстані до кількох кілометрів і визначається напрямком вітру та конвективними повітряними потоками.

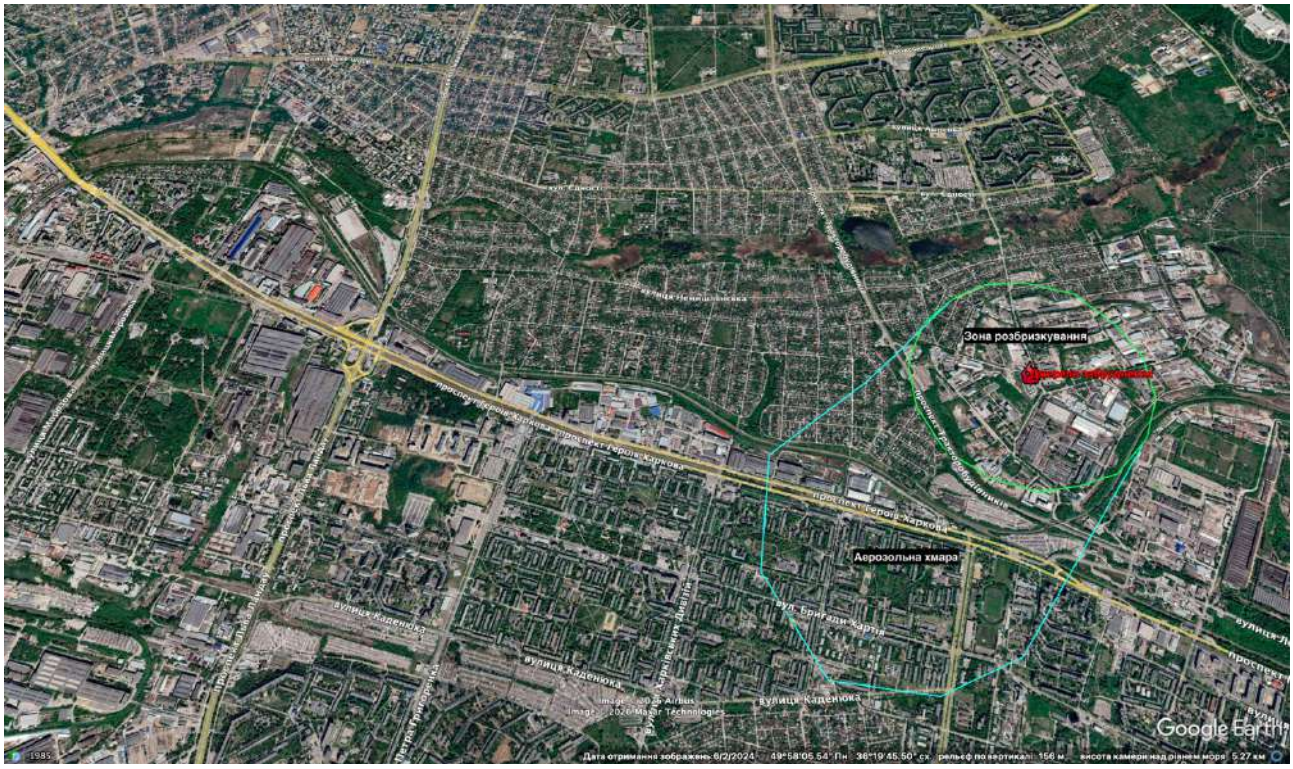


Рисунок 6. Просторовий розподіл поверхневого забруднення

Протягом 09 лютого 2024 року за умов слабкого північно-східного вітру 1–3 м/с і від’ємної температури повітря -2…-4 °C аерозольна хмара повільно зміщувалася у південно-західному напрямку у бік просп. Героїв Харкова. За таких метеорологічних умов відбувалося осідання незначних об’ємів нафтопродуктів на великій площі, що призвело до формування переважно тонкого, рівномірного та суцільного поверхневого забруднення території промислової зони без утворення потужних локальних накопичень забруднення.

5.2 Рельєф місцевості

У результаті пошкодження резервуарів відбулося витікання нафтопродуктів на територію технологічної зони нафтобази. Потік нафтопродуктів із зони уловлювання та локалізації аварійних розливів, поширився через майданчик наливу залізничних цистерн у напрямку вул. Ясенева через пошкоджені елементи зовнішнього огородження.

Подальша поверхнева міграція забруднення визначалося поєднанням факторів рельєфу та інженерного облаштування території. Наявний ухил поверхні сприяв гравітаційному потоку нафтопродуктів, тоді як лінійні елементи інженерного облаштування (огородження, бордюрні балки, покриття з залізобетонних плит та ущільнений верхній шар ґрунту дорожнього полотна) перетворили вулиці на напрямні канали поверхневого стоку.



Рисунок 7. Основний і додатковий шляхи поверхневої міграції забруднення

Основний шлях поверхневої міграції забруднення, пролягав вздовж вул. Ясенева до перехрестя з вул. Котельною та далі по вул. Котельній. Прилеглі вулиці Високогірна та Родюча мають вищі відмітки території, що обмежувало розтікання нафтопродуктів поза межами основного напрямку поширення.

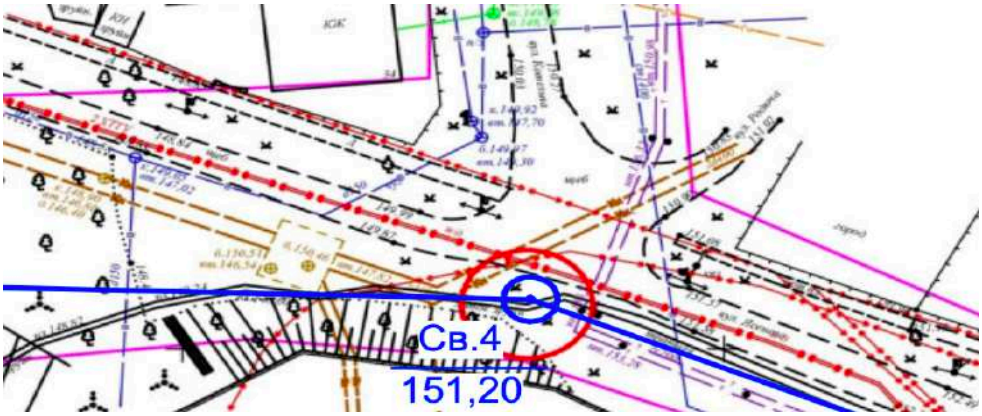


Рисунок 8. Позначки висот території на перехресті вулиць Ясенева і Котельна

На локальній ділянці в районі перехрестя з вул. Котельною вул. Ясенева втрачає виражений ухил, що сприяло перерозподілу потоку нафтопродуктів у напрямку вул. Котельної як більш пониженої ділянки рельєфу.

Водночас не виключається, що певна частина нафтопродуктів продовжила переміщення по вул. Ясенева. На це опосередковано вказують зафіксовані сліди термічного впливу пошкодження перших будинків, розташованих по вул. Ясенева нижче перехрестя з вул. Котельна. Разом з тим зазначені пошкодження можуть бути також наслідком поширення пожежі між сусідніми будівлями без прямого зв'язку з рухом потоку нафтопродуктів.

Розтікання нафтопродуктів підтверджено свідченнями мешканців, які проживають за адресами вул. Котельна, Танкова, та Могілевська. Зі слів господарів під час розливу по вул. Могілевська, 43/1 через подвір'я текли нафтопродукти та впродовж декількох місяців у погреб стікало приблизно 200 л води з нафтопродуктом [12]. У дворі по вул. Танкова, 129 під час зняття верхнього шару ґрунту на глибині понад 1 м було зафіксовано наявність нафтопродуктів [12].

Результати досліджень хімічного складу водних витягів ґрунтів виконувалися лише для верхнього насипного шару до глибини 1 м і не характеризують положення тіла забруднення в глибших горизонтах. Водночас вони відображають межі поверхневого розтікання та розкидання нафтопродуктів унаслідок первинного розливу.

Отримані результати підтверджують гіпотезу про напрямок поверхневого розтікання. Зокрема, підвищені концентрації нафтопродуктів у ґрунтах зафіксовані на вул. Ясенева, 41/1 (т.5) — до 40,2 ГДК, вул. Котельна, 30 (т.9) — до 13,0 ГДК та вул. Танкова, 129 (т.26) — до 9,3 ГДК. Водночас перевищення допустимих концентрацій не виявлено на вул. Плідна, 28 (т.15), пров. 1-й Плідний, 22/9 (т.19), вул. Немишлянська, 256А (т.38), вул. Заповідна, 54 (т.35), вул. Заповідна, 40 (т.34), вул. Заповідна, 22 (т.32) та вул. Заповідна, 4 (т.31), що свідчить про обмежений характер латерального поверхневого поширення забруднення. Відсутність нафтопродуктів у ґрунтах за адресою вул. Могилевська, 64 (т.11) пояснюється тим, що основний потік розтікання відбувався по протилежному боці вулиці з нижчими відмітками.



Рисунок 9. Концентрації нафтопродуктів у приповерхневому шарі ґрунту і донних відкладах , норма – 500 мг/кг)

5.3 Підземні інженерні мережі

Вулиці житлової зони облаштовані підземними мережами газифікації, центрального водопостачання та каналізації. Під час поверхневого розтікання по вул. Котельна нафтопродукти через негерметичні залізобетонні кришки, розташовані на рівні поверхні території, потрапили до 12 підземних шахт. Надалі забруднення мігрувало вздовж лінійної підземної комунікації. Додатковим опосередкованим підтвердженням наявності цієї комунікації є збережені на двох будинках попереджувальні написи з маркуванням «ГНТ-7.5»



Рисунок 10. Схема розташування кришок шахт підземних інженерних мереж по вул. Котельна

5.4 Міська система ливневої каналізації

У процесі поширення вздовж основного шляху поверхневої міграції забруднення перехоплювалося елементами міської системи зливової каналізації на вул. Ясенева та вул. Немишлянська. Відкриті ділянки цієї системи представлені неукріпленими канавами прямокутного профілю, які в місцях перетину з дорогами переходять у закриті підземні ділянки з металевих труб. Колекторна камера забезпечує з’єднання відкритих відрізків системи з підземною трубопровідною ділянкою.

Унаслідок потрапляння до міський системи ливневої каналізації забруднення мігрувало у заплави Петренківського та Малого ставків, а також безпосередньо до р. Немишля. Під час огляду заплави в період літньо-осінньої межені 2024 р. на поверхні донних відкладень зафіксовано залишки важких фракцій нафтопродуктів [12].

Випуск у заплаву Малого ставка частково заблокований донними відкладеннями і очеретом, що, знижує пропускну здатність системи. Це призвело до локального підтоплення прилеглої ділянки занедбаного приватного домоволодіння по вул. Заповідна.



Рисунок 11. Схема фрагмента міської системи ливневої каналізації, задіяної у процесі міграції забруднення

5.5 Верхній насипний шар ґрунту

Верхній шар у межах основного шляху поверхневої міграції забруднення представлений насипним різнорідним ґрунтом (суглинок, чорнозем, пісок) із включенням будівельного сміття [11]. Неоднорідна структура такого шару, відсутність природної стратифікації та наявність техногенних включень зумовлюють формування локальних зон підвищеної проникності та макропористості. Порівняно невелика об’ємна вага ґрунту 15,80 кН/м³ опосередковано свідчить про підвищену пористість і нещільну будову насипу під відносно ущільненим тонким приповерхневим шаром.

Ці особливості можуть формувати локальні техногенні канали фільтрації, що характеризуються вкрай мінливим напрямком руху потоку та швидкостями, які можуть бути на кілька порядків вищими порівняно з умовно однорідним ґрунтовою матрицею. Така структура середовища зумовлює випадковий і слабо прогнозований характер латеральної міграції забруднення, її підвищену просторову мінливість та складність відстеження меж поширення. За цих умов забруднення поширюється не суцільним фронтом, а окремими потоками вздовж локальних каналів, пов’язаних із неоднорідністю насипного ґрунту, ущільненими поверхнями та зонами техногенного порушення.

З урахуванням зазначеного, у якості потенційно забрудненої доцільно розглядати смугу території в межах ширини основного шляху поверхневої міграції, обмежену у напрямку зниження відміток рельєфу фундаментами будинків, які виконують роль умовних бічних бар’єрів для подальшого латерального поширення потоку забруднення.

6. Просторовий розподіл тіла забруднення

Під тілом забруднення слід розуміти тривимірний об’єм у підповерхневій матриці природного середовища, в межах якого нафтопродукт присутній у вигляді неводної фази в порах ґрунту. Тіло забруднення являє собою багатофазну систему, де пори ґрунту одночасно зайняті водою, повітрям і нафтопродуктом у різних пропорціях.

На відміну від цього, підповерхневе забруднення характеризується наявністю нафтопродукту у вигляді тонкої плівки або нашарування на поверхні рослинного покриву, будівельних конструкцій чи верхнього шару ґрунту без суттєвого проникнення у ґрунтову матрицю.

З урахуванням пріоритетних шляхів поверхневої міграції та за винятком ділянок поширення по міській системі зливової каналізації, подальший розгляд просторового розподілу тіла забруднення у ґрунтовий матриці здійснюється з урахуванням інженерно-геологічних, геоморфологічних та гідрогеологічних умов території в межах таких виокремлених зон:

- територія нафтобази
- міські вулиці
- заплава річки Немишля

6.1 Територія нафтобази

Ділянка розливу нафтопродуктів на нафтобазі обмежена технологічною зоною та майданчиком наливу залізничних цистерн, тоді як інша частина нафтобази зазнала значного розкидання нафтопродуктів унаслідок вибухів. Аналіз супутникового знімка свідчить, що територія, яка експлуатується понад 30 років, до аварії перебувала у стані хронічного забруднення. Ознаками є локальні бурі плями в межах майданчику наливу залізничних цистерн та зона з порушеним рослинним покривом нижче по схилу.



Рисунок 12. Ознаки хронічного характеру забруднення території нафтобази

Відомості про геологічну будову і глибину залягання дзеркала ґрунтових вод відсутні. Водночас, з огляду на хронічний характер і масштаб аварійного розливу, можна припустити, що ґрунти в районі нафтобази перебувають у мобільному стані насичення нафтопродуктами. Іншими словами, нафтопродукти займають значну частку загальної пористості ґрунтів, утворюють взаємопов'язану мережу та можуть переміщуватися вертикально і латерально під дією градієнтів тиску, зокрема під час відкачування насосами.

6.2 Міські вулиці

Просторовий розподіл тіла забруднення в ґрунтовій матриці змінюється вздовж основного шляху поверхневої міграції нафтопродуктів у зв'язку зі зміною геологічних і гідрогеологічних умов уздовж схилу. Формування та конфігурація тіла забруднення визначаються напрямком градієнта тиску потоку нафтопродуктів, фільтраційними властивостями ґрунтів та капілярним опором порового простору.

З урахуванням позитивних температур і періодичних слабких опадів протягом кількох днів до аварії ґрунти, перебували у вологому стані з частковим заповненням пор водою, особливо в суглинках і супісках. У день аварії за наявності слабких опадів у вигляді дощу та снігу і від'ємної температури повітря верхній насипний шар ґрунту міг перебувати у стані локального промерзання, що призводило до зниження його водопроникності та інфільтраційної здатності. Заповнення пор вологою та їх локальне блокування льодом зменшували можливість швидкого вертикального проникнення нафтопродуктів у глибші шари.

За таких гідрометеорологічних і ґрунтових умов переважною була поверхнева та латеральна міграція нафтопродуктів насамперед уздовж схилу по контактах шарів із різною проникністю, тоді як вертикальна інфільтрація в ґрунтову товщу мала обмежений і нерівномірний характер.

Найбільше насичення пор ґрунту нафтопродуктами відбувалося на ділянках схилу з найбільшим гідродинамічним тиском, тобто в зонах зі зменшеним ухилом, де швидкість стоку знижувалася, збільшувався час контакту нафтопродуктів із ґрунтом та утворювалися локальні зони скупчення рідини: на перехрестях вул. Ясенева-Високогірна (2), Ясенева-Котельна (4) та на ділянці вул. Котельна від вул. Могилівської до вул. Немишлянська (7).

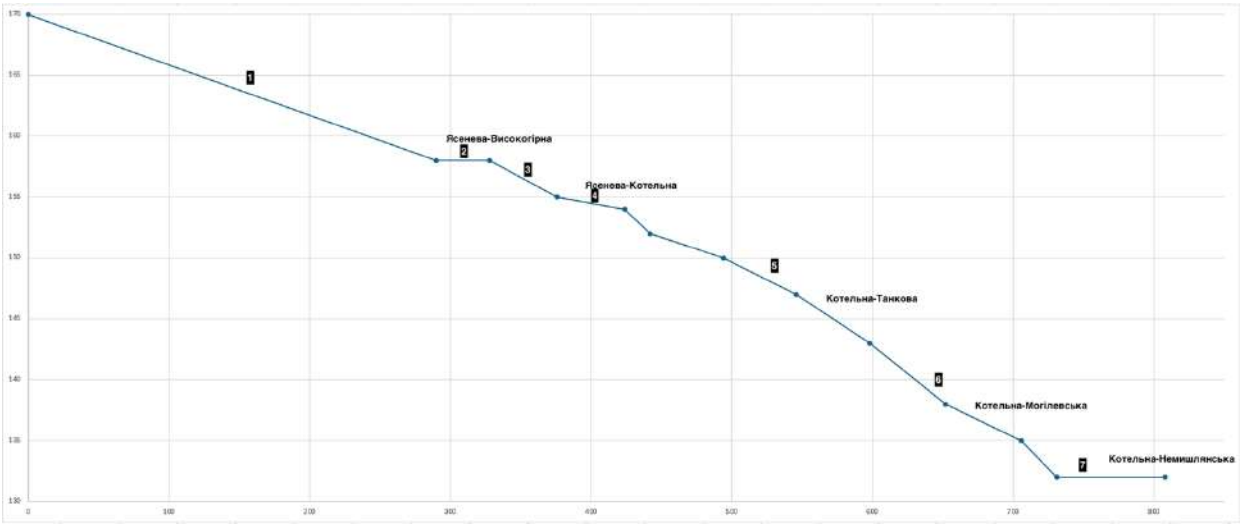


Рисунок 13. Поздовжній профіль рельєфу вздовж основного шляху поверхневої міграції нафтопродуктів

Вихідні дані щодо геологічної будови схилу наведено на основі результатів інженерно-геологічних вишукувань, виконаних по вул. Ясенева на ділянці від вул. Високогірної до просп. Тракторобудівників [11], виконаних в вересне 2024 р. В геоморфологічному відношенні ділянка розташована в межах надзаплавних терас річки Немишля, складеної четвертинними алювіальними піщано-глинистими відкладеннями, перекритими з поверхні насипними ґрунтами. Ґрунти до глибини 4.0 м представлені з шести інженерно-геологічних елементів (ІГЕ), наявність і потужність шарів яких змінюються вздовж схилу (див. рисунок 14).

ІГЕ-1. Насипний шар: суглинок, чорнозем, пісок з включенням будівельного сміття, злежаний, слабковологий, різнорідний з потужністю від 0.5 м на нижній частині до 1.3 м на верхній частині схилу. Характеризується підвищеною фільтраційною здатністю та нерівномірною проникністю.

ІГЕ-2. Ґрунтово-рослинний шар: чорний, суглинистий, гумусований, з домішками органічних речовин, корінням рослин, пухкий з потужністю від 0.3 м до 0.5 м. Характеризується підвищеною пористістю та проникністю з одночасно високою сорбційною здатністю органічної речовини.

ІГЕ-3. Суглинок лесовидний, жовто-бурий, твердої консистенції, просадний з потужністю від 0.7 м до 1.7 м та наступними фізико-механічними властивостями: вологість природна – 0.16 (в вересне), щільність ґрунту – 1.86 г/см^3, коефіцієнт пористості – 0.79, ступень вологості – 0.6. Характеризується низькою фільтраційною здатністю та високою здатністю до утримання нафтопродуктів у поровому просторі, оскільки частина пор залишається заповненою повітрям, що допускає проникнення нафтопродуктів у верхню частину шару, однак дрібнопориста структура та капілярні сили обмежують їх подальше просочування вглиб.

ІГЕ-4. Суглинок світло-коричневий, твердої консистенції з потужністю близько 0,9 м та наступними фізико-механічними властивостями: вологість природна – 0.18 (в вересне), щільність ґрунту – 1.93 г/см^3, коефіцієнт пористості – 0.86, ступень вологості – 0.68. Характеризується дещо більшою вологістю та пористістю, а також ще нижчою фільтраційною здатністю.

ІГЕ-5. Супісок жовто-сірий, твердої консистенції з потужністю від 1.1 м до 1.6 м та наступними фізико-механічними властивостями: вологість природна – 0.16 (в вересне), щільність ґрунту – 1.98 г/см^3, коефіцієнт пористості – 0.7, ступень вологості – 0.69. Характеризується помірною водопроникністю та розвиненою макропористою структурою.

ІГЕ-6. Піски сірі зеленувато-сірі, дрібні, середнього ступеню водонасичення, середньої щільності з наступними фізико-механічними властивостями: вологість природна – 0.2 (в вересне), щільність ґрунту – 2.1 г/см^3, коефіцієнт пористості – 0.48, ступень вологості – 0.95. Дрібнозерниста структура обумовлює високу фільтраційну здатність.

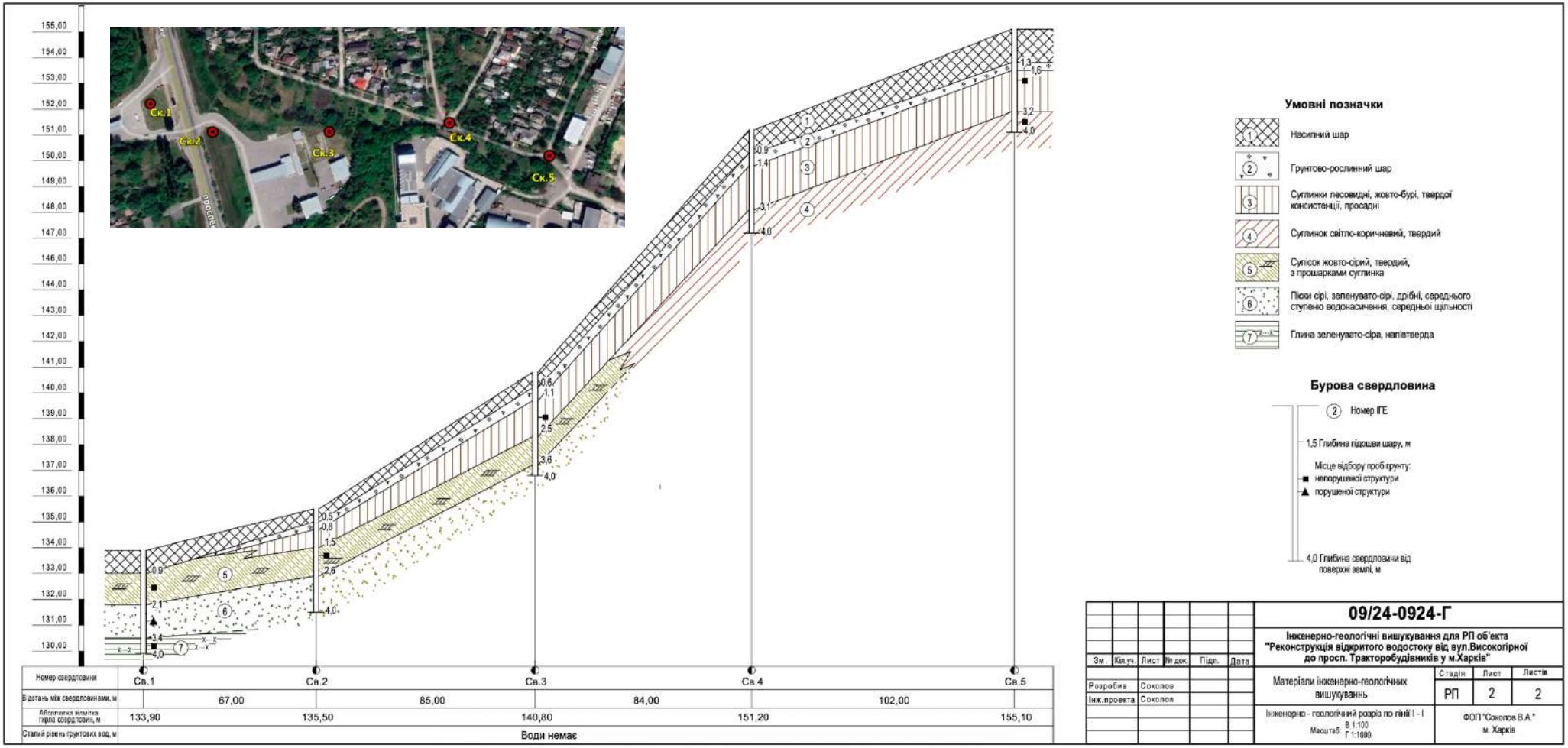


Рисунок 14. Інженерно-геологічний розріз по вул. Ясенева на ділянці від вул. Високогірної до просп. Тракторобудівників

Гідрогеологічні умови встановлено за результатами спостережень за рівнями ґрунтових вод і підземних вод глибших горизонтів у колодязях і свердловинах, розташованих на вулицях Заповідна (2к, 5к), Немишлянська (7к), Могилівська (22к) та Танкова (25к) [12].



Рисунок 15. Схема відбору проб ґрунту і підземних вод: синій - колодязі, зелений – свердловини, червоний - свердловини інженерно-геологічних вишукувань

Рівень ґрунтових вод у річковій долині (2к, 5к, 7к) залежно від близькості до заплави та пори року становить 1,0–1,4 м. Інформація про глибину залягання ґрунтових вод на схилі відсутня, однак сукупність непрямих ознак свідчить про їх залягання на глибині понад 6–8 м. Зокрема, відсутність колодязів вище вул. Могилівська та використання свердловин глибиною 15–42 м по вул. Могилівська (22к), пров. 1-й Плідний (11к, 12к), вул. Танкова (25к) свідчить про те, що перший водоносний горизонт залягає на значній глибині. Додатково це підтверджується свідченнями мешканців будинку по вул. Танкова, 129 про відсутність ґрунтових вод на глибині щонайменше 5 м [12], а також даними інженерно-геологічних вишукувань по вул. Ясенева, за якими у серпні ґрунтові води до глибини 4 м виявлені не були [11].

Ймовірні сценарії формування тіла забруднення на ділянках 1–6 основного шляху поверхневої міграції (див. рис. 13) з урахуванням рельєфу, геологічних і гідрогеологічних умов а також часу, що минув з моменту розливу, узагальнені в таблиці 1.

Таблиця 1

Діл.	Кут нахилу	Геологічна колонка	Грунтові води	Тіло забруднення
1	$4,0^0$	ІГЕ-1, ІГЕ-2, ІГЕ-3, ІГЕ-4	> 8 м	Переважний об'єм нафтопродуктів поширювався шляхом поверхневого стоку. Навіть та частина забруднення, що просочилася в ґрунт, заповнювала поровий простір латерально за напрямком ухилу, що домінувало над вертикальної інфільтрацією. Основне тіло забруднення локалізоване в зоні аерації вздовж лінії огорожі та обмежене по вертикалі покрівлею шару ІГЕ-4 на глибині близько 3 м. У шарі ІГЕ-1 сформувалася зона залишкової фазової насиченості, тоді як основне тіло мобільної фази зосереджене в межах шарів ІГЕ-2 та ІГЕ-3, досягаючи максимальної потужності на контакті з водотривким горизонтом ІГЕ-4.
2	0^0	ІГЕ-1, ІГЕ-2, ІГЕ-3, ІГЕ-4	> 8 м	Внаслідок застійного характеру розливу грунтова матриця від поверхні до глибини понад 4 м перебуває у стані, близькому до повного насичення нафтопродуктами, з локалізацією в плані в межах ділянки з пониженими відмітками рельєфу. Вертикальний розподіл забруднення відповідає моделі «акулячого плавнику»: основна маса мобільної фази охоплює товщу шарів ІГЕ-1, ІГЕ-2 та ІГЕ-3 і досягає максимальної потужності на контакті з шаром ІГЕ-4. Частина нафтопродуктів обмежено проникає в ІГЕ-4, тоді як основний об'єм поширюється латерально по покрівлі цього шару в напрямку загального ухилу місцевості.
3	$3,6^0$	ІГЕ-1, ІГЕ-2, ІГЕ-3, ІГЕ-4	> 8 м	Аналогічно ділянці 1
4	$1,2^0$	ІГЕ-1, ІГЕ-2, ІГЕ-3, ІГЕ-4	> 8 м	Аналогічно ділянці 2
5	$4,0^0$	ІГЕ-1, ІГЕ-2, ІГЕ-3, ІГЕ-4	> 5 м	Аналогічно ділянці 1
6	$4,3^0$	ІГЕ-1, ІГЕ-2, ІГЕ-3, ІГЕ-5, ІГЕ-6	2-4 м	Переважний об'єм поширювався шляхом поверхневого стоку з локалізацією в плані вздовж лінії огорожі та фундаментів будівель. Та частина забруднення, що просочилася в ґрунт, заповнювала поровий простір в латеральному напрямку за ухилом рельєфу, що переважало над вертикальною інфільтрацією. У шарі ІГЕ-1 сформувалася зона залишкової насиченості нафтопродуктами. Просторовий розподіл тіла забруднення істотно залежить від глибини залягання підземних вод. У пробах води з джерел, розташованих вище по схилу від вул. Могилевська (вул. Котельна, 12; вул. Могилевська, 49; вул. Могилевська, 43/1), не зафіксовано перевищень гранично допустимих концентрацій нафтопродуктів [12]. Це свідчить про відсутність забруднення водоносного горизонту у середній та верхній частині схилу. За високого рівня підземних вод основне тіло мобільної фази формується безпосередньо над дзеркалом у межах шару ІГЕ-3, де капілярна облямівка обмежує подальшу вертикальну міграцію та сприяє латеральному розтіканню. Потужність зони розмазування визначається сезонними коливаннями рівня вод і становить орієнтовно близько 0,3 м. У разі більш глибокого залягання підземних вод відбувається поступове насичення нафтопродуктами товщі ІГЕ-3, після чого можливі локальні вертикальні прориви крізь більш проникні прошарки ІГЕ-5 до пісків ІГЕ-6 з подальшим забрудненням водоносного горизонту. В обох випадках латеральна

				міграція забруднення відбувається в напрямку загального ухилу місцевості.
7	0^0	ІГЕ-1, ІГЕ-2, ІГЕ-3, ІГЕ-5, ІГЕ-6	1,1-1,4 м	Формування тіла забруднення визначається малою глибиною залягання підземних вод та наявністю каналізаційного колектора ливневої каналізації, який виконує роль техногенного дренажу. Тіло забруднення за моделлю «акулячого плавника»: пік насиченості локалізований у шарі ІГЕ-2 в межах капілярної облямівки, збігаючись із дзеркалом ґрунтових вод або перебуваючи трохи вище нього, зі зменшенням насиченості вище і нижче цієї позначки. Потужність зони розмазування визначається сезонними коливаннями рівня підземних вод і становить близько 0,3 м. Поєднання витоку нафтопродуктів із початком повені тимчасово обмежило поширення тіла забруднення в напрямку заплави. Під час весняного сніготанення інфільтраційний потік зі схилу формував додатковий тиск зверху, тоді як підпір ґрунтових вод із боку заплави діяв знизу. Унаслідок цього відбулося переважно латеральне розширення тіла забруднення вздовж вул. Немишлянська. Підтвердженням гіпотези є свідчення мешканців вул. Немишлянська, 258 про просочування нафтопродуктів через тріщини в пішохідному тротуарі через шість місяців після розливу [12]. Після спаду рівня води сформований гідравлічний градієнт зумовив інтенсивну міграцію забруднення в напрямку заплави.

За матеріалами інженерно-геологічних вишукувань [11] у долини відмічається наявність глинистого шару, що виконує роль водоупору та може мати лінзовидну неоднорідну будову. З огляду на узагальнений характер геологічної та гідрогеологічної інформації запропонована концептуальна модель забруднення, що передбачає безнапірний тип водоносного горизонту, підлягає обов’язковій перевірці результатами польових досліджень.



Рисунок 16. Просторовий розподіл тіла забруднення в плані вздовж вул. Ясенева та Котельна.

6.3 Заплава річки Немишля

Міська система зливової каналізації у трьох місцях здійснює скид нафтопродуктів у заплави річки Немишля:

- заплава Петенківського ставка
- заплава Малого ставка
- русло річки Немишля нижче за течією в районі мосту через проспект Тракторобудівників

З огляду на те, що нафтопродукти мають меншу густину за воду, вони поширювалися переважно по межі розділу «повітря–вода» до моменту врівноваження сил міжфазного натягу на фронті шару нафтопродуктів. З урахуванням значного об’єму та місця розташування витікання забруднення повністю охопило заплави Петренківського та Малого ставків, а також розподілилися вглиб заплави в районі мосту через проспект Тракторобудівників.

Частина нафтопродуктів, що надійшла безпосередньо у русло річки, не сковане льодовим покривом, транспортувалася потоком вниз за течією з подальшим поширенням у межах річкової системи. Факт того, що концентрація нафтопродуктів у річковій воді на відстані до 27 км від місця аварії перевищувала гранично допустимі норми у 7–8 разів [2], свідчить про надходження до річкової системи не лише розчиненої фази, а й значних об’ємів нафтопродуктів.

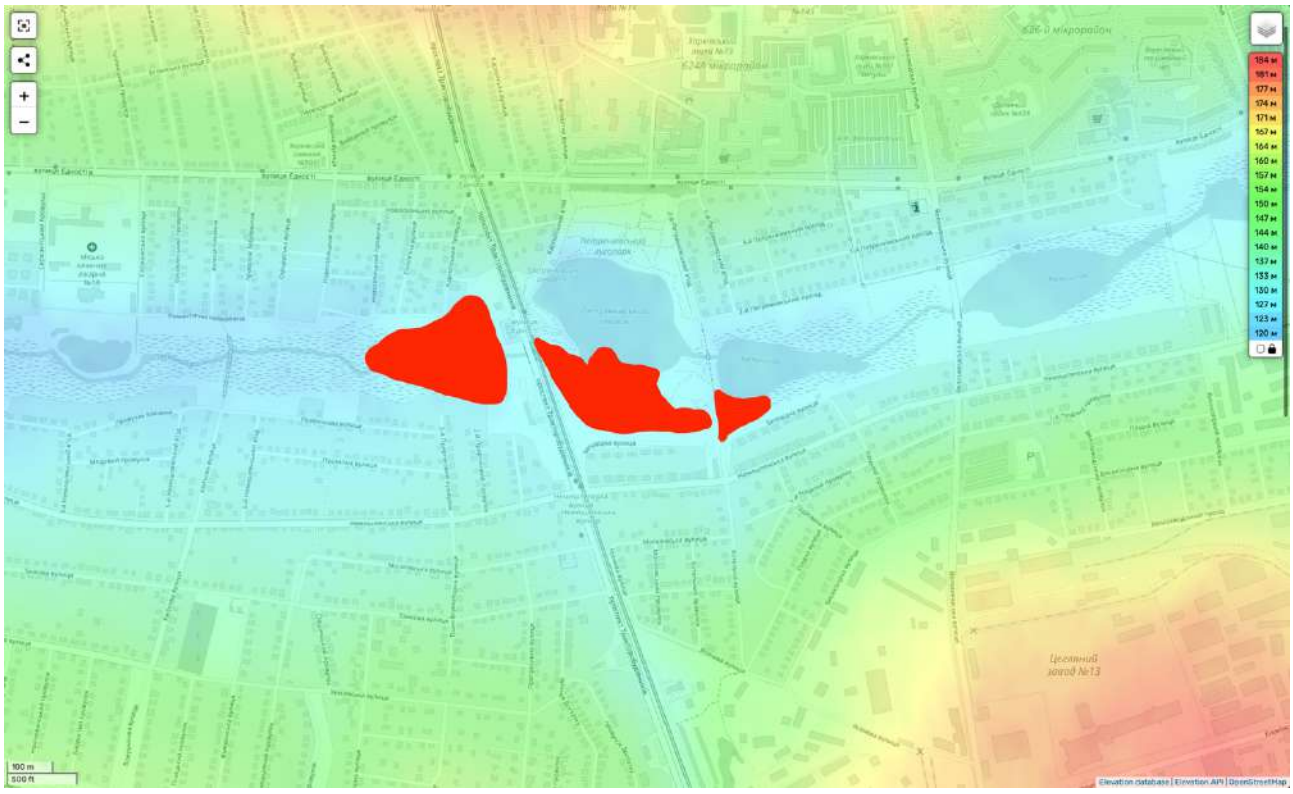


Рисунок 17. Просторовий розподіл тіла забруднення в плані в заплавні річки Немишля

Інша частина нафтопродуктів, що потрапила у заплаву у вигляді плаваючого шару нафтопродуктів була затримана природним біогеохімічним бар'єром. Обмежений водообмін між заплавою та ставками, який здійснюється лише на локальних ділянках, сприяв зниженню швидкості руху води, накопиченню нафтопродуктів у застійних зонах та обволіканню стебел очерету. У результаті заплавна зона сформувала стійке вторинне джерело хронічного забруднення, яке зумовило тривале надходження розчинних фракцій забруднюючих речовин у річкову систему.

Відповідно до результатів досліджень очеретових біоплато в Омане [13] донні відклади здатні акумулювати до 45% нафтопродуктів від власної маси, надземна біомаса очерету — до 56%, тоді як безпосередньо ґрунтова матриця утримує відносно невеликі концентрації порядку 15 мг/кг без суттєвого подальшого накопичення. Результати досліджень впливу сильно забруднених нафтою ґрунтів на очеретяні болота на нафтовому родовищі Ляохе [14] показали, що після одного вегетаційного сезону важка нафта переважно концентрувалася в кореневій системі очерету. Тіло забруднення локалізується у приповерхневому органо-мінеральному шарі донних відкладень і практично не проникає у водонасичену ґрунтову матрицю.

З урахуванням пожежі в заплаві влітку 2024 року та дворічного періоду природної трансформації забруднення в заплаві річки Немишля сформувалося вторинне тіло забруднення:

- в донних відкладах, локалізоване переважно в ризосфері кореневої системи очерету та у приповерхневому шарі потужністю до 0,6 м
- у період весняної повені внаслідок підйому рівня води посилюється інфільтрація розчиненої фази в ґрунти прибережної буферної зони заплави Петренківського ставка, що призводить до формування вторинного забруднення у стані залишкової насиченості в межах зони розмазування від поверхні до глибини близько 1,2 м

Результати досліджень хімічного складу водних витягів донних відкладів у Малому ставку (5д) підтверджують наявність нафтопродуктів у кількостях (873 - 3218 мг/кг), що перевищують гранично допустимі норми до 6,4 ГДК [12].

6.4 Розподіл обсягів забруднення

Точний розподіл обсягів забруднення в природному середовищі встановити неможливо, однак за орієнтовними розрахунками ситуація виглядає таким чином:

- Близько 200 т (5%) у перші години аварії було розбризкано, частково згоріло та частково осіло на поверхні території у вигляді аерозольних випадінь на площі близько 400 га
- Орієнтовно 800 т (20%) інфільтрувалося в ґрунті та заповнило поровий простір ґрунтової матриці в процесі поверхневої міграції на площі близько 2 га
- Приблизно 1000 т (25%) поширилося по поверхневих водах річок Немишля, Харків, Лопань та Уди на площі близько 78 га
- Основна частина до 2000 т (50%) акумулювалася в донних відкладах заплави річки Немишля на площі близько 10 га

Оцінка заснована на максимальному сценарії витоку нафтопродуктів, обсяг якого достеменно не встановлено, та не включає зменшення маси забруднення внаслідок процесів природного ослаблення: випаровування, розчинення та біодеградації.



Рисунок 18. Просторовий розподіл тіла забруднення

7. Хімічний склад забруднення

Неприйнятний ризик для здоров'я людини або довкілля визначається концентраціями окремих компонентів забруднення, а не загальною масою нафтопродуктів у ґрунті, ступенем його насичення чи показниками мобільності.

Забруднення представляє собою суміш бензину та дизельного палива - легких нафтопродуктів із різними фізико-хімічними характеристиками.

Бензин є легкою фракцією нафти з переважанням вуглеводнів діапазону С4–С12, характеризується високою леткістю, підвищеною часткою низькомолекулярних ароматичних та аліфатичних сполук, відносно більшою розчинністю окремих фракцій у воді та здатністю швидко формувати парогазову фазу в зоні аерації.

Дизельне паливо належить до середньодистилятних фракцій із переважанням вуглеводнів С10–С22, характеризується нижчою леткістю та меншою водорозчинністю, проте має вищу схильність до сорбції та адсорбції на органічній речовині та мінеральній матриці ґрунту.

Оцінка забруднення ґрунтів при розливі бензину та дизельного палива здійснюється за показниками гранично допустимих концентрацій наступних небезпечних хімічних речовин, відповідно до постанови Кабінету Міністрів України від 15.12.2021 № 1325 [15]:

Таблиця 2

Найменування речовини	Нормативи гранично допустимої концентрації, міліграмів на кілограм ґрунту з урахуванням фону
Загальний вміст нафтопродуктів:	
для земель нафтобази	1000
для інших земель	500
Бензол	0,3
Толуол	0,3
Ксилол	0,3
Бенз(а)пірен	0,02
Фенол (вторинний продукт)	4
Стирол (вторинний продукт)	0,1

Важкі метали можуть виявлятися у ґрунтах, підземних водах і донних відкладах, однак вони не є діагностичними ознаками розливу бензину чи дизельного палива. Підвищені концентрації металів у зоні забруднення найчастіше пов'язані з вторинними процесами - зміною окисно-відновних умов, кислотності середовища, розвитком анаеробної деградації вуглеводнів та мобілізацією елементів із мінеральної матриці ґрунтів.

Гранично допустимі концентрації забруднюючих речовин в атмосферному повітрі населених місць узагальнені у виданні, підготовленому Управлінням атмосферного повітря України [18]

Таблиця 3

Найменування речовини	Нормативи гранично допустимої концентрації, міліграмів на $м^3$ повітря, середньодобові
Бензин (нафтовий, малосірчистий, у перерахунку на вуглець)	1,5
Бензол	0,1

Толуол	0,6
Етилбензол	0,02
Ксилол	0,2
Ізопропілбензол	0,014

З огляду на те, що загрози від парової фази нафтопродуктів пов'язані не лише з впливом на здоров'я населення, а й з ризиком вибухонебезпечності у разі накопичення парів у замкнених, малих за об'ємом, підвальних приміщеннях приватних будинків, доцільно виконати оцінку концентрацій парів нафтопродуктів у порівнянні з нижніми та верхніми концентраційними межами вибухонебезпечності.

Таблиця 4

Найменування речовини	НКПР (LEL, % об.)	ВКПР (UEL, % об.)	Температура спалаху (°С)
Бензол	1,2-1,3	7,1-8,0	- 11
Толуол	1,1-1,2	7,1	+ 4
Етилбензол	0,8-1,2	6,7-7,8	+ 13
Ксилол	0,9-1,1	6,6-7,0	+ 27
Ізопропілбензол	0,8-0,9	6,0-6,5	+ 31

Згідно із законом Рауля, рівноважна концентрація парів окремого компонента над нафтопродуктом визначається його мольною часткою у рідкій вуглеводневій суміші та тиском насиченої пари чистої речовини.

Проте не існує універсальної концентрації нафтових вуглеводнів у розчиненої або паровій фазах, яка б однозначно свідчила про наявність забруднення нафтопродуктами, що зумовлено варіабельністю складу нафтопродуктів, різною часткою окремих компонентів у сумішах палива, а також ступенем фізико-хімічного вивітрювання, біодеградації та масообміну між фазами. У зв'язку з цим інтерпретація результатів моніторингу базується не на абсолютних порогових значеннях концентрацій, а на їх співвідношенні з теоретичною ефективною розчинністю компонентів у водній фазі та на сукупності ліній доказів, що характеризують близькість шлейфа вуглеводнів до тіла забруднення.

Згідно з методикою ITRC [17], концентрації речовин у повітрі понад 500 ppm для нещодавніх розливів розглядаються як діагностичний індикатор можливого розташування шлейфа в безпосередній близькості до тіла забруднення. З урахуванням того, що з моменту розливу нафтопродуктів минуло понад два роки, більш релевантним критерієм є концентрації розчинених речовин у підземних водах на рівні понад 1–5% від їх розрахованої ефективної розчинності, що також свідчить про близькість шлейфа до джерела забруднення.

Таблиця 5

Найменування речовини	Мольна частка в нафтопродукті	Молекулярна маса, г/моль	Тиск насиченої пари, Па	Діагностичний індикатор, мг/ м^3
Бензол	0,03	78,11	10000	96-480
Толуол	0,15	92,14	2900	164-822
Етилбензол	0,05	106,17	930	20-100
Ксилол	0,15	106,16	900	59-294
Ізопропілбензол	0,02	120,20	530	5-26

Визначення рівня забруднення підземних та поверхневих вод при розливі бензину та дизельного палива проводиться відповідно до гігієнічних нормативів якості води водних об'єктів другої категорії, затверджених наказом МОЗ України від 02.05.2022 № 721 [16]:

Таблиця 6

Найменування речовини	Нормативи гранично допустимої концентрації, міліграмів на дм^3 води
Загальний вміст нафтопродуктів:	
нафта багатосірчиста	0,1
нафта міцна	0,3
бензин	0,1
Бензол	0,5
Толуол	0,5
Етилбензол	0,01
Ксилол	0,05
Нафталін	0,01
Тіофен (газойль)	2,0
Ізопропілбензол	0,1
Фенол (вторинний продукт)	0,001
Стирол (вторинний продукт)	0,1

Згідно із законом Рауля, розчинена концентрація компонента нефтепродукта у ґрунтових водах є добутком його концентрації в самому нафтопродукті та розчинності чистого компонента у воді - вона не залежить від насиченості нафтопродуктом порового простору ґрунтової матриці.

Для оцінки теоретичної ефективної розчинності компонентів у шлейфі виконано розрахунок їх максимально можливих рівноважних концентрацій у водній фазі на основі мольної частки індивідуальних компонентів у суміші бензину та дизельного палива. Згідно з методикою ITRC [17], концентрації розчинених речовин у підземних водах на рівні понад 1-10% від розрахованої ефективної розчинності розглядаються як діагностичний індикатор можливого розташування шлейфа в безпосередній близькості до тіла забруднення.

Таблиця 7

Найменування речовини	Мольна частка в нафтопродукті	Максимальна розчинність у воді, мг/ дм^3	Діагностичний індикатор, мг/ дм^3
ТРН			> 30
BTEX			> 20
Бензол	0,03	1780	0,5-5,0
Толуол	0,15	530	1,0-8,0
Етилбензол	0,05	170	0,1-0,85
Ксилол	0,15	180	0,3-2,7
Нафталін	0,08	31	0,02-0,25
Тіофен (газойль)	0,03	400	0,15-1,2
Ізопропілбензол	0,02	50	0,01-0,1

8. Просторовий розподіл шлейфів забруднення

Загрози забруднення можуть впливати на реципієнтів через адсорбцію забруднюючих речовин у поверхневому шарі ґрунту на твердих частинках, а також через міграцію забруднювачів у розчиненій та паровій фазах. Оскільки основні шляхи поверхневої міграції нафтопродуктів були частково обмежені огорожами та фундаментами будівель, забруднення ділянок поверхневого гумусового шару, що використовується для вирощування сільськогосподарської продукції, відбулося переважно внаслідок поверхневого осідання нафтопродуктів під час їх розбризкування у момент вибуху, а також випадіння з аерозольної хмари.

8.1 Шлейф розчиненої фази забруднення у поверхневих водах

Шлейф розчиненої фази у заплаві річки Немишля формується як багатовекторна система. Розчинені забруднювачі насичують товщу поверхневих вод у межах обмеженого об’єму заплави та підтримують підвищені концентрації за рахунок постійного надходження з тіла забруднення, локалізованого у донних відкладах

Забруднені поверхневі води із заплави фільтруються крізь ґрунтову перемичку та надходять у Петренківський ставок, у якому відбувається їх накопичення. Водночас частина забруднених вод із заплави безпосередньо надходить у Малий ставок. Це зумовлює підвищення концентрацій нафтопродуктів у водах Малого ставка, що підтверджується результатами їх хімічного аналізу: напередодні повені вміст нафтопродуктів досягає 1,5 ГДК [12].

У періоди сніготанення посилюється гідравлічний зв’язок із протокою, внаслідок чого забруднені води виносяться у річку Немишля. Розчинені вуглеводні підхоплюються течією, інтенсивно перемішуються турбулентними потоками та формують витягнутий шлейф забруднення нижче за течією, що проявляється періодичними підвищеннями концентрацій нафтопродуктів у контрольних створах. Зазначене підтверджується пульсуючим характером забруднення поверхневих вод нижче за течією в районі мосту по вул. Краснопільська, 77: наприкінці грудня та у лютому їх значення досягають 6,1 ГДК [12].

Співвідношення зафіксованих концентрацій узгоджується з гіпотезою про переважне накопичення нафтопродуктів у заплаві Петренківського ставка, тоді як у Малому ставку фіксуються відносно нижчі значення, що свідчить про його вторинний характер забруднення.

8.2 Шлейф розчиненої фази забруднення в грутових водах

З урахуванням наявної інформації про гідрогеологічний режим ділянки забруднення очікується формування шлейфів нафтопродуктів в грутових водах в районі вул. Котельна (на ділянках 6-7) та Заповідна. Наявність шлейфу підтверджується результатами аналізу хімічного складу води з колодязя за адресою вул. Немишлянська, 256А (7к) та пров. 1-й Плідний, буд. 9, де зафіксовано підвищену концентрацію нафтопродуктів 7,1 ГДК та 16,8 ГДК [12] відповідно.

Шлейф розчиненої фази формується у напрямку природного руху підземних вод — до зони їх розвантаження в заплаві Петренківського ставка. Його наявність підтверджується результатами хімічного аналізу води з колодязя за адресою вул. Немишлянська, 256А (7к), де зафіксовано концентрацію нафтопродуктів на рівні 7,1 ГДК [12].

У період весняної повені підвищення рівня води у плавнях спричиняє підпір підземних вод та ускладнює їх природне розвантаження в напрямку заплави. За таких умов відбувається тимчасова зміна гідравлічного градієнта, внаслідок чого шлейф орієнтується вздовж долини — у напрямку вул. Немишлянська. Максимальні концентрації нафтопродуктів 16,8 ГДК [12], зафіксовані наприкінці лютого у колодязі за адресою пров. 1-й Плідний, 9, підтверджують сезонну трансформацію конфігурації шлейфа.

У ближній зоні шлейфу переважають компоненти дизельної складової (нафталін, тіофен), а також частина ароматичних сполук із високими початковими концентраціями (ксилол, етилбензол, ізопропілбензол), тоді як у більш віддаленій зоні домінують більш розчинні компоненти бензинової фракції (бензол, толуол), а також вторинні продукти трансформації (фенол, стирол).



Рисунок 19. Просторовий розподіл шлейфу розчиненої фази забруднення у поверхневих і ґрунтових водах під час повені (концентрація нафтопродуктів в мг/дм^3, норма - 0,1)

Шлейф розчиненої фази сформований у верхній частині водоносного горизонту, охоплює весь інтервал насичення пор нафтопродуктами з урахуванням зони розмазування, а поперечні розміри визначаються передусім латеральними межами тіла забруднення та очікуються дещо більшими внаслідок поперечної дисперсії підземних вод. Відповідно до закону Дарсі, швидкість міграції шлейфу забруднення разом із ґрунтовими водами у ґрунтово-рослинному шарі оцінюється на рівні близько 14 м/рік у середньорічних умовах та може зростати до приблизно 46 м/рік у короткий період після завершення паводка. З урахуванням відстані близько 130 м від тіла забруднення до заплави, шлейф розчиненої фази майже досяг заплави Петренківського ставка.

8.3 Шлейф розчиненої фази забруднення в інфільтраційних водах атмосферних опадів

У низинах ґрунтові води існують постійно як зона накопичення та розвантаження, а на схилі вони мають тимчасовий характер, оскільки через високий гідравлічний градієнт вода лише транзитно стікає по водотривкому шару під час опадів, не формуючи стабільного дзеркала через відсутність постійного підживлення (верховодка). Під час такої фільтрації крізь забруднені ґрунти відбувається розчинення окремих компонентів нафтопродуктів та їх перехід у водну фазу, що зумовлює шлейфів розчинених вуглеводнів у напрямку зниження рельєфу.

Це зумовлює пульсуючий характер забруднення колодязів і свердловин у середній частині схилу Плідна, 28 (до 4,5 ГДК), пров. 1-й Плідний, буд. 9 (до 16,8 ГДК) та пров. 1-й Плідний, буд. 16 (до 3,0 ГДК) [12] пов’язаний із періодичним надходженням інфільтраційних вод. На відміну від цього, у шлейфах ґрунтових вод зазвичай спостерігається поступове зниження концентрацій нафтопродуктів у міру виснаження розчинних компонентів тіла забруднення.

Такий режим свідчить, що водозабірні споруди розташовані поза межами зони мобільного насичення та перебувають на певній відстані від основного осередку забруднення або нафтопродукти у ґрунтовому масиві знаходяться у стані залишкового насичення після поверхневого розливу.

Якби свердловини безпосередньо перетинали зону мобільної фази, концентрації розчинених нафтопродуктів залишалися б стабільно високими без періодів повного самоочищення. Відсутність прямої кореляції між опадами та рівнем забруднення пояснюється часовим лагом міграції інфільтраційного шлейфу, де пікові жовтневі опади 122 мм [19] зумовлюють максимальний сплеск концентрації через затримку, необхідну для насичення ґрунтової матриці та подолання відстані від тіла забруднення до свердловин.

Це узгоджується з гіпотезою локалізації зони поверхневого забруднення, сформованої внаслідок розкидання нафтопродуктів під час вибуху, в межах вулиці Плідна та пров. 1-й Плідний.

Постійний характер забруднення води у свердловині нафтопродуктів по вул. Танкова, 129 в діапазоні 0,9–8,3 ГДК [12] свідчить про її гідравлічну близькість до тіла забруднення.

Через те, що на території нафтобази та по вул. Ясенева і Котельна, ділянки 1–5 тіло забруднення залягає в зоні аерації та обмежене шаром ІГЕ-4, який характеризується високою щільністю і низькою фільтраційною здатністю, формування шлейфу розчиненої фази у вертикальному напрямку вниз під впливом інфільтрації атмосферних опадів не очікується.

8.4 Шлейф розчиненої фази забруднення ґрунтових вод прибережній зони під час повені

У період весняного водопілля, внаслідок різкого підвищення рівня води у ставків активізуються процеси інфільтрації води, збагаченої розчиненою фазою нафтопродуктів, у ґрунти прибережної буферної зони заплави Петренківського та Малого ставків. Це призводить до посилення вертикальної фільтрації та вторинного надходження розчинених нафтопродуктів у підземні води.

Ймовірно, саме зазначеним механізмом пояснюється підвищення концентрацій розчинених нафтопродуктів у джерелах за адресами вул. Заповідна, 54 (5к) та вул. Заповідна, 66 (6к) до 4,3 ГДК та 6,4 ГДК [12]. Зазначені підвищення відбуваються синхронно зі зростанням вмісту нафтопродуктів у поверхневих водах Малого ставку до 1,5 ГДК та р. Немишля до 6,1 ГДК [12] на початку водопілля у лютому 2025 р.

8.5 Шлейф парової фази забруднення

Шлейфи парової фази формуються з летких органічних сполук над тілом забруднення та над шлейфом розчинених вуглеводнів унаслідок їх випаровування і дифузійного переносу в поровому повітрі зони аерації. Завдяки дифузії леткі компоненти забруднення переміщуються з областей із вищою концентрацією до областей із нижчою концентрацією - із підповерхневих зон тіла забруднення до поверхні землі та атмосфери. Цей процес стає менш суттєвим у міру старіння та зменшення частки найбільш летких компонентів у складі забруднення.

9. Оцінка стабільності тіла і шлейфів забруднення

Після припинення активного витоку гідравлічний напір нафтопродуктів швидко знизився, що в підсумку обмежило загальний об'єм забруднення, доступний для латеральної міграції.

За високого рівня насиченості порового простору мобільність нафтопродуктів зумовила їх розтікання до периферії тіла забруднення. Однак у міру зменшення насиченості латеральна міграція поступово припинилась. Стабілізація меж тіла забруднення відбувається тоді, коли капілярний тиск входу нафтопродуктів у пори ґрунтової матриці разом із процесами природного виснаження забруднення компенсують градієнт розтікання.

Природне вичерпання почалось відразу після розливу нафтопродуктів через випаровування та розчинення, та з часом найінтенсивніше через біодеградацію, та триває більше двох років.

Випаровування, розчинення та біодеградація є складовими природного виснаження, який охоплює сукупність фізичних і біогеохімічних механізмів перерозподілу та трансформації компонентів нафтопродуктів у водну та газову фази з подальшим їх мікробіологічним розкладанням. Ці процеси з часом зменшують масу, насиченість і мобільність нафтопродуктів.

Основне зменшення маси вуглеводнів відбувається за рахунок біодеградації при контакті з мікроорганізмами, а також деградації розчинених компонентів на межі нафтопродуктів з водою та летких фракцій після переходу в газову фазу. Найбільш ці процеси проявляються в ненасиченій зоні та зоні розмазування, де забезпечується активний масообмін і доступ кисню, тоді як у насиченій зоні їх перебіг зазвичай уповільнений через відмінні геохімічних умов. У міру вичерпання кисню в якості акцепторів електронів мікроби послідовно переходять до використання нітратів, потім оксидів марганцю та заліза, а потім сульфатів.

Біодеградація відбувається по всій зоні розмазування за допомогою безлічі механізмів як в аеробних, так і в анаеробних умовах. Газоподібні побічні продукти цієї реакції вуглекислий газ (CO_2) та метан (CH_4) безпосередньо виводяться у вадозну зону і не потрапляють у водну фазу. Коли метан (CH_4) дифундує вгору, він зустрічається з киснем (O_2), що дифундує вниз з атмосфери, що дозволяє місцевим метанотрофам та іншим мікроорганізмам споживати метан (CH_4) і утворювати вуглекислий газ (CO_2) та водяну пару. Ефлюкс вуглекислого газу (CO_2) є доказом ефективності процесів біодеградації нафтопродуктів.

Ефект біодеградації розчинених вуглеводнів можна спостерігати у шлейфах ґрунтових вод шляхом вимірювання змін геохімічних параметрів: зниження вмісту розчиненого кисню (O_2), нітратів (NO_{3-}) та сульфатів (SO_4^{2-}) і збільшення вмісту розчиненого двовалентного заліза (Fe^{2+}), марганцю (Mn^{2+}), вуглекислого газу (CO_2) та метану (CH_4).

Відповідно до прийнятої концептуальної моделі забруднення, нафтопродукти зберігають здатність до подальшої міграції лише в межах території нафтобази та у застійних зонах накопичення на ділянках 2, 4 і 7. У межах плавнів нафтопродукти локалізувалися в приповерхневому органо-мінеральному шарі донних відкладень. На інших ділянках основного шляху поверхневої міграції поширення забруднення обмежене обсягом інфільтрації в ґрунт.

Результати моніторингу рівнів ґрунтових вод не підтверджують появи нафтопродуктів у досліджуваних джерелах на нових ділянках протягом року спостережень. Також результати хімічного аналізу ґрунтових і поверхневих вод не свідчать про тенденцію до зростання концентрацій розчинених компонентів нафтопродуктів у часі.

Відсутність мобільної фази нафтопродуктів у джерелах спостереження, відсутність тенденції до зростання концентрацій у ґрунтових водах, а також сплив двох років з моменту розливу можуть свідчити про ймовірну стабілізацію меж тіла забруднення та сформованих шлейфів розчиненої фази без ознак їх подальшого поширення за встановлені контури.

Очікується, що процеси природного виснаження забруднення найбільш активно відбуваються в зоні поверхневого забруднення та в ґрунтовій матриці житловій та промисловій зон у зв'язку з розташуванням тіла забруднення переважно в зоні аерації, а також інтенсивним режимом руху підземних вод у зоні їх розвантаження в межах долини.

В донних відкладах заплавно- ставкової зони процеси природного виснаження забруднення є вкрай уповільненими через анаеробні умови та уповільнений водообмін. Високий вміст органічної речовини в донних відкладах також радикально сповільнює темпи природного виснаження через процеси адсорбції та секвестрації вуглеводнів. Органіка міцно утримує нафтопродукти у своїй матриці, різко обмежуючи їхню біодоступність для мікроорганізмів.

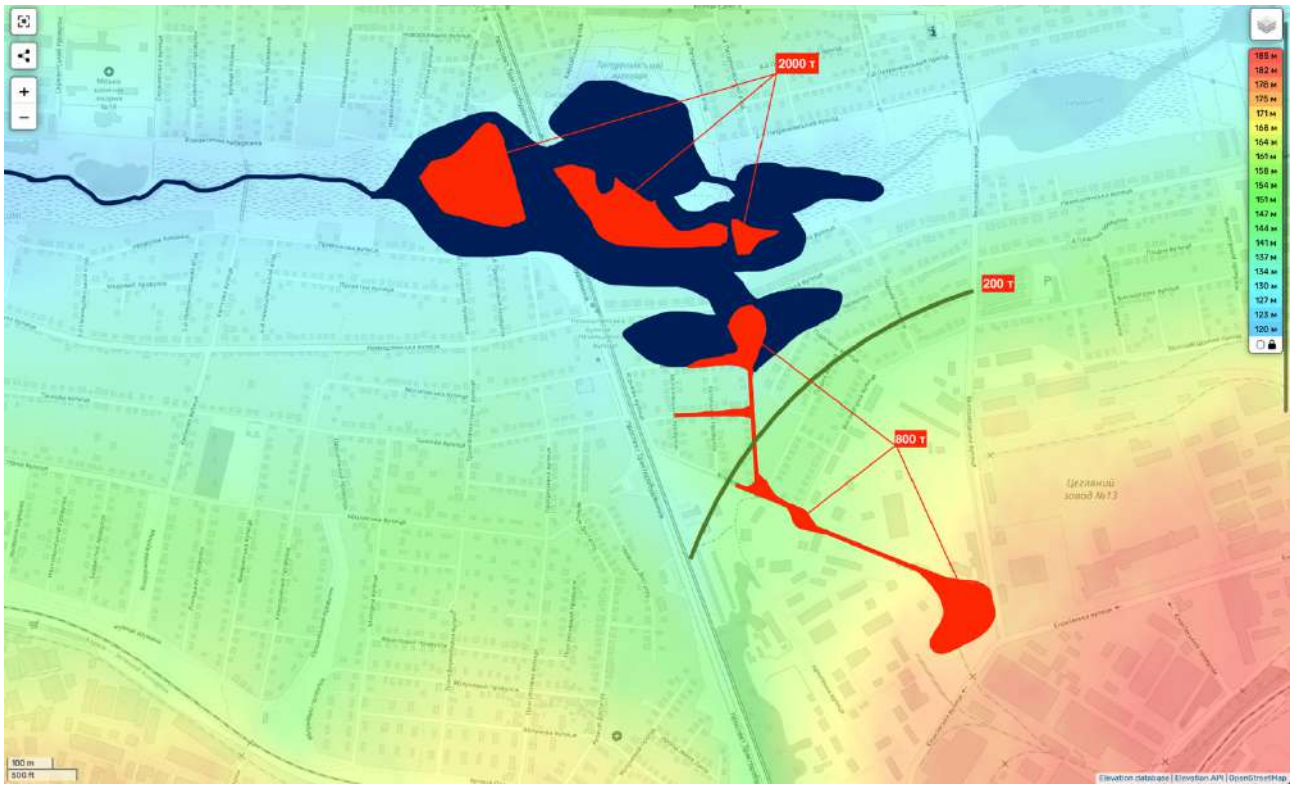


Рисунок 20. Концептуальна модель забруднення: червоний – тіло забруднення, синій – шлейф розчиненої фази, зелений – межа локальних ділянок поверхневого забруднення

Інформація щодо кількісної оцінки швидкості природного виснаження забруднення на об'єкті відсутня. Водночас узагальнені дані свідчать, що більшість виміряних значень перебувають у відносно вузькому діапазоні. Зокрема аналіз швидкостей природного виснаження забруднення на 25 об'єктах показав, що у 50% випадків вони становили від 6,5 до 26 т/га/рік [17].

Термін природного виснаження забруднення зі швидкістю 16 т/га/рік в житловій та промисловій зонах та - 8 т/га/рік в заплавно-ставковій системі складе близько 23 років.

Перелік використаних джерел

1. «Клімат Харкова», Український регіональний науково-дослідний інститут, 1983 р.

2. «Російський удар по нафтобазі та бездіяльність влади призвели до екологічної катастрофи у водоймах Харкова», інтернет-ресурс Асамблея, 12.02.2024

3. Поширення забруднення на третій день після розливу, відео волонтера-екозахисника Артема Приходько, 12.02.2024

4. Локалізація шлейфу забруднення на річках, відео волонтера-екозахисника Артема Приходько, 16.02.2024

5. «Що відомо про нафтобазу в Харкові, яку не вперше атакували російські безпілотники», інтернет-ресурс KHARKIV Today, 15.02.2024

6. «Атака дронів на Харків: російські безпілотники влучили по нафтобазі», інтернет-ресурс KHARKIV Today, 10.02.2024

7. Наслідки обстрілу Немишлянського району Харкова, відео Харківської обласної прокуратури, 10.02.2024

8. Науково-технічний звіт про науково-дослідну роботу на рему «Оцінка соціально-економічного стану населення Немишлянського району м. Харкова, постраждалого під час вибуху і пожежі на нафтобазі в результаті обстрілів рф, на основі проведення натурних досліджень (анкетування)», ТОВ НТВК «Україна», Харків, 2024 р.

9. «Hydrodynamic ram analysis in high-speed projectile penetrating into water-filled vessels», Harbin Institute of Technology, Zitao Guo, 2022

10. «Experimental study on the cavity evolution and liquid spurt of hydrodynamic ram», Nanjing Institute of Technology, Yangziyi Ji, 2021

11. Звіт про інженерно-геологічні вишукування по об'єкту «Реконструкція відкритого водостоку по вул. Ясеневій на ділянці від вул. Високогірної до просп. Тракторобудівників у м. Харкові», ТОВ «Хорда-Юа», 2024 р.

12. Анотований науково-технічний звіт «Дослідження та оцінка екологічного стану довкілля за періоди: липень-вересень 2024 р., жовтень - грудень 2024 р., січень-квітень 2025 р.», Науково-дослідна установа «Український науково-дослідний інститут екологічних проблем»

13. «The Use of Reed bed Technology for Treating Oil Production Waters in the Sultanate of Oman», SPE International Conference on Health, Abdullah Al Mahruki, Brian Alloway, Heiko Patzelt, 2006

14. «Impact of heavy oil-polluted soils on reed wetlands», Ecological Engineering, Guodong Ji, Tieheng Sun, Jinren Ni, 2007

15. Нормативи гранично допустимих концентрацій небезпечних речовин у ґрунтах, а також переліку таких речовин, затверджені постановою Кабінету Міністрів України від 15.12.2021 №1325

16. Гігієнічні нормативи якості води водних об’єктів для задоволення питних, господарсько-побутових та інших потреб населення, затверджені Наказом Міністерства охорони здоров’я України від 02.05. 2022 № 721

17. «LNAPL-3: LNAPL Site Management: LCSM Evolution, Decision Process, and Remedial Technologies», Interstate Technology and Regulatory Council, 2023

18. Гранично допустимі концентрації та орієнтовні безпечні рівні діяння забруднюючих речовин в атмосферному повітрі населених місць, Управляння атмосферного повітря України

19. Щомісячна та річна кількість опадів у Харкові, Weather & Climate, 2026.