



Дослідження забруднення нафтопродуктами зони аерації за допомогою математичного моделювання


Олег Улицький¹

д. геол. наук, професор, директор ННІ Екобезпеки та управління
¹ Державної екологічної академії післядипломної освіти та управління,
вул. Митрополита Василя Липківського, 35, корп. 2, м. Київ, 03035, Україна,
e-mail: olegulytsky@gmail.com,  <https://orcid.org/0000-0003-2674-2208>;


Наталія Д'яченко¹

к. геол. н., ст. наук. співробітник, доцент кафедри екологічної безпеки,
e-mail: natalidyachenko1969@gmail.com,  <https://orcid.org/0000-0002-4852-0203>;

Армен Соколов¹

студент магістратури
e-mail: staroilua@gmail.com,  <https://orcid.org/0009-0007-1385-8873>;

Ольга Сердюкова²

ст. викладач, кафедра фундаментальної та прикладної геології,
² Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна,
майдан Свободи, 4, м. Харків, 61022, Україна,
e-mail: serd.64@ukr.net,  <http://orcid.org/0000-0002-8946-0243>

У статті наведено результати дослідження забруднення зони аерації за рахунок витоку нафтопродуктів (НП) під час руйнування нафтобази «Амік Україна» у м. Бородянка за допомогою математичного моделювання. Витік світлих нафтопродуктів (СНП) створив техногенну екологічну ситуацію, яка вимагала визначення: механізмів аварійного проникнення НП у ґрунт та підземні води, площі забруднення та науково-обґрунтованих способів очищення ґрунту від НП. Для оцінки площі забруднення та механізму аварійного проникнення СНП у ґрунт і підземні води проаналізовані існуючі моделі проникнення поллютантів при аварійному розливі НП, створено математичні просторові моделі геоморфологічних, гідрогеологічних та дослідно-фільтраційних даних за рахунок використання прийомів математичної інтерполяції та градієнтного аналізу. Останні дозволили виявити напрями руху поверхневого та підземного стоку на локальній площі нафтобази. У роботі розраховано гідравлічні ухили, коефіцієнт фільтрації ґрунтів, створено просторову математичну модель локального підземного градієнту потоку підземних вод з координатною прив'язкою до космоснімку завдяки ГІС-проектуванню. Досліджено, що напрямок підземного потоку (рідини з поллютантом) контролюється зоною локальної депресії, яка виражена пониженням абсолютних відміток природної літологічної товщі з перепадом висот близько 0,4 м або максимальними значеннями височини лінзи забруднення. Напрямок простягання цієї зони з півночі на південь. Проведено розрахунок потужності лінзи забруднення, яка в середньому склала 0,3 м. При цьому показнику площа забруднення налічує 4169 м², об'єм забруднення – 1250,7 м³ який відповідає заявленому витоку. Але, враховуючи анізотропію фільтраційних властивостей літологічних різновидів у різних напрямках усередині зони аерації, присутність розчищеної води за рахунок дисперсії, наявність локальних акумуляційних депресій літологічної товщі варіанти з іншими показниками потужності (0,5 м та 0,1 м) також прийнятні. Апроксимовані сумарні площі розповсюдження НП адаптовані до супутникового знімку сервісу Google Earth. Дослідження мають практичні рекомендації щодо очищення території від СНП, запобігання розповсюдженню поллютанту за рахунок відкачування нафтопродуктів зі змодельованої та фактично підтвердженої лінзи забруднення. Згідно з рекомендаціями здійснене буріння 140 свердловин глибиною до 5,2 м, діаметром 0,11-0,168 м, загальним метражем 710 м, які дали можливість запобігти розповсюдженню СНП та повторно їх використати після очищення.

Ключові слова: нафтопродукти, лінза забруднення, зона аерації, математична модель, дослідно-фільтраційні, поверхневий стік, зондувальні свердловини, градієнт потоку, надзвичайна ситуація, ГІС-проект.

Як цитувати: Улицький Олег. Дослідження забруднення нафтопродуктами зони аерації за допомогою математичного моделювання / Олег Улицький, Наталія Д'яченко, Армен Соколов, Ольга Сердюкова // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, серія «Геологія. Географія. Екологія», 2023. – Вип. 59. – С. 44-54. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2023-59-04>

In cites: Ulytsky Oleg, Diachenko Natalia, Sokolov Armen, Serdiukova Olga, (2023). Studies of oil product pollution in the aeration zone by mathematical modelling. Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, series "Geology. Geography. Ecology", (59), 44-54. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2023-59-04> [in Ukrainian]

Постановка проблеми.

Масштабні військові дії 2022-2023 років проти України на жаль призвели до серйозного пошкодження інфраструктури, включаючи нафтобази. Цей фактор має широкий вплив не тільки на економіку країни та життя мешканців, але суттєві негативні наслідки з точки зору екологічної

безпеки.

Зруйнування нафтобаз може мати серйозний вплив на довкілля. Виток нафти в природне середовище завжди має негативний вплив на водні ресурси, ґрунт, рослинність, тваринний світ і загальний екологічний баланс або руйнування екологічних систем [1]. Забруднення водних ресурсів

внаслідок витоку в річку, озеро або підземні води може мати довготривалі наслідки залежно від розміру забруднення і можливостей його очищення [2]. Саме тому, з метою зменшення впливу на довкілля, необхідно завчасно розробляти та вживати превентивні заходи для очищення нафтових забруднень.

У 2022 році внаслідок війни була частково зруйнована нафтобаза компанії «Amic Україна», що розташована в м. Бородянка Київської області. Відбувся миттєвий витік політантів у вигляді світлих нафтопродуктів (СНП) на ґрунт прилеглої території. В такому випадку надходження нафтопродуктів у ґрунт впливає не тільки на зменшення його біологічної продуктивності, але призводить до подальшого проникнення нафтопродукту в води зони аерації та у підземні води. Результат - техногенна екологічна ситуація, що вимагала після деокупації не тільки негайної ліквідації аварійного розливу, але й визначення площі аварійного проникнення СНП у ґрунт та підземні води.

Оскільки аварійна ситуація сталася під час бойових дій на тимчасово окупованій території, документування, візуальний контроль за розливом для збору інформації з метою виявлення, визначення, оцінки та контролю сценарію розливу, що відбувався, та для створення загальної оперативної картини реагування були неможливі. На сьогодні ще не створено стандартизованих підходів щодо вирішень прикладних завдань еколого-гідрогеологічного напрямку у таких складних ситуаціях. Саме тому, виникла необхідність у створенні ПС-проекту з залученням результатів математичного моделювання геоморфологічних, гідрогеологічних, інженерно-геологічних та дослідно-фільтраційних даних з використанням геоданих сервісу Google Earth з метою визначення механізму, площі та глибини забруднення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Більша частина сучасних досліджень стосовно аварійного розливу нафтопродуктів присвячена надзвичайним ситуаціям в переробній, хімічній та транспортній промисловості. Як правило, для визначення радіусу розливу використовуються моделі гравітаційного розтікання, які не враховують просочення СНП вглибину. У роботі [3] розглядаються всі представлені моделі для прогнозування площі, досягнутої розливом рідини в стані рівноваги, та ефективність цих моделей. За думкою авторів, існує декілька сценаріїв розливу легкозаймистих рідин, запропонованих ще у 70-х роках минулого століття (модель Бетчелора, Райсбека та Мохтаді) та у сучасні часи (модель Хассена), але найбільш ефективними є моделі площі розливу як функції об'єму розливу, тому що експериментальні дані показують, що площа розливу лінійно збільшується з об'ємом

розливої рідини. В випадку руйнування нафтобази «Amic Україна» об'єм фактичного розливу був відомий приблизно, бо достеменно невідомо скільки СНП згоріло під час руйнації та пожежі.

За оцінкою фахівців [2, 4-6], СНП надходячи у зону аерації у рідинному стані, мігрують як рідина, яка не змішується з водою. В результаті на поверхні ґрунтових вод формується мобільна лінза забруднення, яка в залежності від нахилу поверхні ґрунтових вод, проникності вміщуючих порід, нахилу земної поверхні може мігрувати на значні відстані та досягати місць природного розвантаження ґрунтових вод (водойми, водотоки) або зосереджуватися під джерелом витоку.

При цьому, за висновками в роботі [7], ця лінза являє собою «тіло» концентрованих рухомих вуглеводнів, які концентруються в локальній зоні вуглеводневого насичення ґрунтів, та зосереджуються безпосередньо над дзеркалом ґрунтових вод. Міграція СНП у зоні аерації має менш складний характер, ніж у підземних водах. Існування на межі зони аерації та водонасиченої товщі «капілярної облямівки», за рахунок присутності «порогового» тиску, поряд з низькою щільністю нафтопродуктів по відношенню до води, призводить до формування лінзи з надлишковим вмістом політантів. Залежно від гідрогеологічних умов, тривалості та інтенсивності надходження нафтових продуктів, потужність такої лінзи може змінюватися від сантиметрів до декількох метрів. Максимальні значення потужності завжди присвячені центральній частині лінзи, а мінімальні характерні для крайових частин. Саме в нафтопродуктовій лінзі зосереджена основна маса мобільного СНП, яку можна вилучити з можливістю їх подальшого використання.

У дослідженнях Бодачівської Л. Ю. [8] зроблено висновок, що швидкість і напрям руху вуглеводневої рідини залежать як від властивостей ґрунту і від співвідношення нафтопродуктів, повітря й води в багатофазній рухомій системі. «Капілярне просочування відбувається переважно у вертикальному напрямі та у бік гідравлічного ухилу до межі шарів ґрунту – водоупору й рівня підстилаючих вод».

Вивчення питань нафтового забруднення геологічного середовища на прикладі дендропарку «Олександрія» [9] показало, що нафтові вуглеводні здатні мігрувати впродовж кількох десятиліть до природних об'єктів вздовж основного напрямку руху потоку підземних вод і передбачуваної міграції забруднюючих речовин.

Результати моделювання на основі даних гідрогеологічного буріння та фізичної розвідки [2] в м. Ібінь (Китай), показали, що вертикальна інфільтрація забруднюючих речовин після витоку з нафтового резервуару була основним шляхом

проникнення забруднюючих речовин через ґрунт у ненасичену зону під нафтобазою. При визначенні шляхів забруднення підземних вод, ненасичена зона визначена важливим захисним бар'єром для середовища підземних вод, оскільки вона має здатність перехоплювати забруднюючі речовини та перешкоджати їх проникненню. Моделювання показало, що витік з нафтобази вплинув на підземні води навколишнього середовища навколо нафтобази та вниз за градієнтом у напрямку потоку підземних вод.

При цьому, інтенсивність просочення політантау за дослідженнями [10] залежить від фізичних властивостей рідини і підстилаючої поверхні. Інтенсивність просочення буде тим більшою, чим меншою є кінематична в'язкість рідини. При цьому, просочення рідини вглибину підстилаючої поверхні зменшує розміри (площу) розливу. Тобто, ґрунти з невисокою проникністю сприятимуть виникненню лінзи СНП. Автори запропонували модель розтікання рідини у випадку миттєвого розливу (при катастрофічному руйнуванні ємності із рідиною) у вигляді системи рівнянь, що містять δ -функцію Дірака, але, за висновками досліджень «знаходження аналітичного розв'язку є неможливим внаслідок нелінійності рівнянь по невідомим функціям (товщини шару рідини і глибини просочення). Отже для цього мають бути застосовані чисельні методи, зокрема, метод сіток». В той же час, запропонований авторами метод оцінки параметрів моделі просочення рідини вглиб ґрунту включає вимірювання глибини просочення в певні моменти часу. Ці висновки послужили відправною точкою для здійснення дослідно-фільтраційних спостережень на території нафтобази та за її межами.

Теоретичні складові попередніх досліджень були використані у цій роботі при розв'язанні прикладних завдань еколого-гідрогеологічного напрямку, питань стосовно визначення механізмів аварійного проникнення політантів у ґрунт та підземні води та планування дослідно-фільтраційних робіт.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми.

Загалом, велику роль у розповсюдженні забруднення на денній поверхні, окрім геологічної будови ділянки аварійного розтікання та просочування, грає геоморфологічні характеристики земної поверхні (рельєф), які створюють умови пряму стоку рідини з нафтопродуктами, але аналітичні розв'язання розрахунку площі розливу та глибини аварійного проникнення СНП практично відсутні або не можуть бути застосовані за рахунок невідповідності вихідних даних досліджуваної ситуації модельним умовам. Виходячи з вищенаведеного, сформульована мета представлених

досліджень.

Формулювання мети статті.

Метою цієї статті є розкриття механізму проникнення СНП у ґрунт і підземні води та розробка заходів з очищення геологічного середовища від політантів, розрахунок глибини та площі розповсюдження забруднення з використанням математичного моделювання даних цифрових моделей рельєфу (морфометричні параметри - (величина ухилу, експозиція схилу, різні види кривизни земної поверхні, напрямок стоку) та дослідно-фільтраційних робіт (гідрогеологічні параметри) за умови залучення геоданих сервісу Google Earth.

Виклад основного матеріалу дослідження.

Початкова оцінка розливу, яка повинна проводитися в перші 3-6 годин, в умовах військових дій була недоступна. Саме тому, база геопросторових даних сервісу Google Earth стала основою отримання вихідних картографічних продуктів. Оброблені космічні знімки високої роздільної здатності попередніх років дали нам можливість розпланувати місця дослідно-фільтраційних робіт, зробити планово-висотне обґрунтування з подальшою математичною обробкою та моделюванням [11], знизити грошові та трудові витрати на підготовку та виконання геодезичних робіт за рахунок камеральної обробки просторових геоданих [12].

Для досягнення мети в роботі використані наступні методи досліджень: цифровізація рельєфу земної поверхні (створення цифрової моделі місцевості за матеріалами даних сервісу Google Earth та наявних картографічних матеріалів), прийоми морфометричного аналізу у вигляді просторової інтерполяції висотних показників рельєфу та градієнтного аналізу цієї поверхні, структурно-геологічні та дослідно-фільтраційні прийоми (графічне моделювання та метод визначення гідродинамічних параметрів інженерно-геологічного елементу), математично-розрахункові методи (традиційні гідрологічні розрахунки) та прийоми просторового математичного моделювання методом часткових похідних по напрямках максимального ухилу земної поверхні (з уточненням на локальному рівні).

Особливості математичного моделювання геоморфологічних, гідрогеологічних, інженерно-геологічних та дослідно-фільтраційних даних в поєднанні з матеріалами космічної зйомки.

Територія досліджень (рис. 1, а) належить до Київського Полісся, де розповсюджені палеоген-неогенові дочетвертинні породи. Абсолютні відмітки рельєфу земної поверхні навколо смт. Бородянка варіюють в межах +136 - +158 м (рис. 1, б). Але за рахунок штучно створеної поверхні території «Amic Україна», останні дорівнюють + 139,8 -

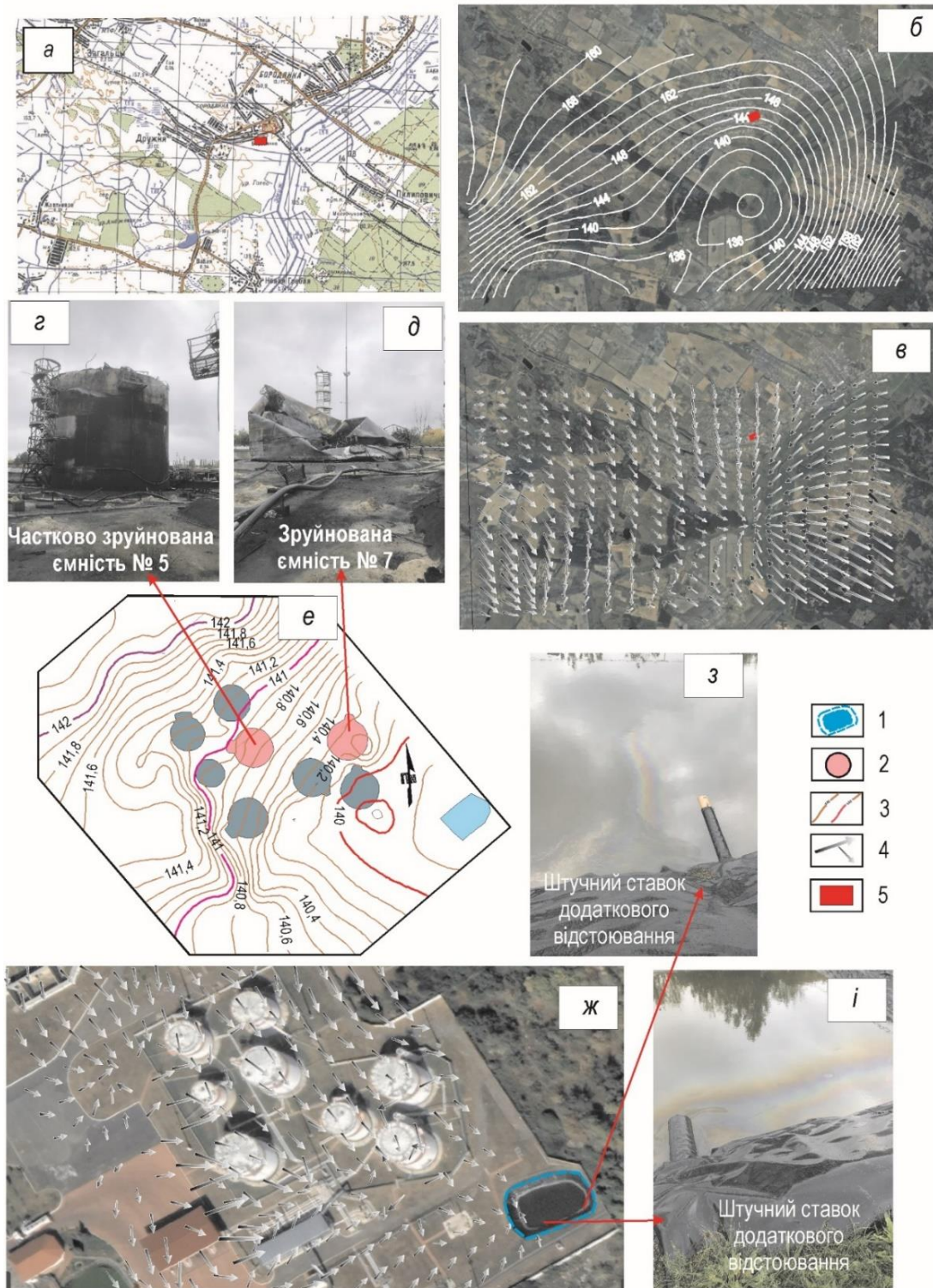


Рис. 1. Результат математичного просторового моделювання напрямків поверхневого стоку з наступними деталями: фрагмент номенклатурного аркушу (а), цифрова векторна модель рельєфу місцевості в ізолініях (б); градієнтна модель напрямків поверхневого стоку навколо Бородянки (в); цифрова векторна модель штучно створеного рельєфу території нафтобази (е); градієнтна модель напрямків поверхневого стоку на території нафтобази (ж); фото витоку СНП в штучну водойму (з, і); фото зруйнованих ємностей (г, д). Умовні позначки: 1 – штучний ставок додаткового відстоювання, 2 – зруйновані ємності, 3 - ізолінії рельєфу, 4 – вектор напрямків поверхневого стоку, 5 – територія дослідження / Fig. 1. The result of mathematical spatial modeling of surface runoff directions with the following details: a fragment of the nomenclature sheet (a), digital vector model of the terrain in isolations (б); gradient model of surface runoff directions around Borodyanka (в); digital vector model of the artificially created relief of the territory of the oil depot (е); gradient model of surface runoff directions on the territory of the oil depot (ж); photos of oil products leaking into an artificial reservoir (з, і); photos of destroyed tanks (г, д)

+ 141,8 м (рис. 1, е). Територією течуть невеликі річки: Вабля, Бучка та Здвиж.

Застосування методу часткових похідних (градієнтний аналіз [13,14]) дозволило створити просторові математичні моделі напрямів поверхневого стоку як штучно створеного на теренах нафтобази (рис. 1, ж), так й прилеглої місцевості (рис.1, в) за рахунок математичної обробки цифрових векторних моделей рельєфу земної поверхні на локальному та загальному рівнях (рис. 1, б, е) методом часткових похідних по напрямках максимального ухилу (кривизни лінії профілю, закладеної вздовж напрямку лінії стоку).

Аналіз отриманих результатів моделювання дозволив встановити, що рух поверхневих вод здійснюється в межах водозбірного формуючого басейну до річкової долини (рис. 1, б), який посилюється за рахунок наявності системи водознижувальних каналів, що створені для додаткового осушення прилеглих територій навколо нафтобази. Але, в межах ділянки, зруйнованої під час військової агресії нафтобази (рис. 1, з, д, штучно створений рельєф створив додаткові локальні умови напрямів поверхневого стоку, який суттєво вплинув на площу проникнення нафтопродуктів у ґрунт та розповсюдження у підземні води (рис. 1, ж). Аналіз отриманих моделей показав, що рух потоку фіксується у південно-східному напрямку, що підтверджено фактичною присутністю полютанту у воді ставку додаткового відстоювання (рис. 1, з, і).

Для розв'язання означених завдань, нами було створено ГІС-проект, який дозволив об'єднати різноманітні поверхні (модельні та фактичні) та проаналізувати гідрогеологічні умови поверхневого стоку в єдиній системі координат.

Проведені під час польових робіт влітку 2022 року обстеження місцевості та інженерно-геологічні вишукування досліджуваної території дозволили вивчити геологічну будову ділянки досліджень шляхом буріння зондувальних свердловин (ЗС) глибиною до 5,2 м з координатною прив'язкою до місцевості за допомогою GPS технологій. Кількість опитних свердловин для моніторингу рівня води для верифікації моделі стоку склала 9 одиниць, Розташування ЗС планувалося згідно з отриманими передчасно результатами математичного моделювання (див. рис.1).

Аналіз результатів буріння свердловин дозволив виділити наявні інженерно-геологічні елементи: I – ґрунтово-рослинний шар, потужністю 0,2 м; II – пісок мілкий, малого ступеню водонасичення, середньої щільності, від сірого до жовто-сірого кольору, потужністю 1,3-1,4 м; III – су-пісок легко-пластичної консистенції, сіро-жовтого кольору, потужністю 0,7-0,8 м; IV - пісок середньозернистий, насичений водою, середньої

щільності, від світло-жовтого до світло-сірого кольору, розкритою потужністю до глибини 5,1-5,2 м.

Слід зазначити, що СНП, потрапляючи у ґрунт, опускаються вертикально вниз під впливом гравітаційних сил і поширюються вшир під впливом поверхневих і капілярних сил. Швидкість просування СНП залежить від їх властивостей, виду та фільтраційних властивостей ґрунту, конструкції «дорожнього» покриття і співвідношення СНП, повітря і води в багатофазній системі, що рухається. Під час досліджень, визначені властивості нафтопродуктів – густина, в'язкість, молекулярна маса, поверхневий натяг (сталагмометричний метод) з урахуванням густини палива дизельного ДП-3- Є-80 (0,733 г/мл) з вмістом сірки до 10% та густини води (0,9982 г/мл).

Дослідно-фільтраційні роботи здійснювалися по 9 характерним ЗС (рис.2, а, б). Вибір місця закладки останніх обумовлено зоною формування лінзи розтікання полютанту (рис. 2, в, з) та напрямком поверхневого стоку.

За рахунок цих робіт, було визначено та підтверджено коефіцієнт фільтрації (K_f) ґрунтів на теренах нафтобази шляхом аналітичного аналізу даних, що були отримані під час відкачувань рідини з ЗС. Для пісків середньозернистих K_f склав 10 м/добу. При цьому, кількість нафтопродукту [Q], що відкачувалася із свердловини (Т4) не приводило до певного зниження стовпа рідини. Це свідчить про те, що об'єм припливу рідини (СНП) значно перевищує об'єм відкачки. Крім того, нами було зафіксовано, що об'єм відкачки із зазначеної свердловини (Т4) протягом 5 хвилин склав 12 л нафтопродукту або 144 л/год. Водночас здійснені заміри рівня залягання верхньої межі рідини з СНП (h_1) й рівня дзеркала ґрунтових вод (нижній рівень рідини з полютантом (h_2)).

На ділянці поза межами нафтобази тільки 20% свердловин мали наявність рідини полютантів (Т7-Т9). Під час буріння в окремих свердловинах зафіксовано рівень підземних вод на глибині 4,78 – 5,13 м від поверхні землі, який відповідає абсолютним відміткам земної поверхні: +134,65 - +135,80 м. Водонасні горизонти інших комплексів не розглядалися.

Під час досліджень виконано математичне моделювання даних польових замірів рівня підземних вод по свердловинах розташованих по площі нафтобази у вигляді картограми гідроізогіпс (рис. 2, б) рівня підземних вод (поверхні рідини – полютантів). Залучення прийомів градієнтного аналізу щодо отриманої математичної моделі гідроізогіпс, дозволило розробити просторову математичну модель локального підземного градієнту потоку підземних вод (рис. 2, б). Координатна прив'язка отриманих моделей до космознімку зроблена завдяки ГІС-проектуванню. На-

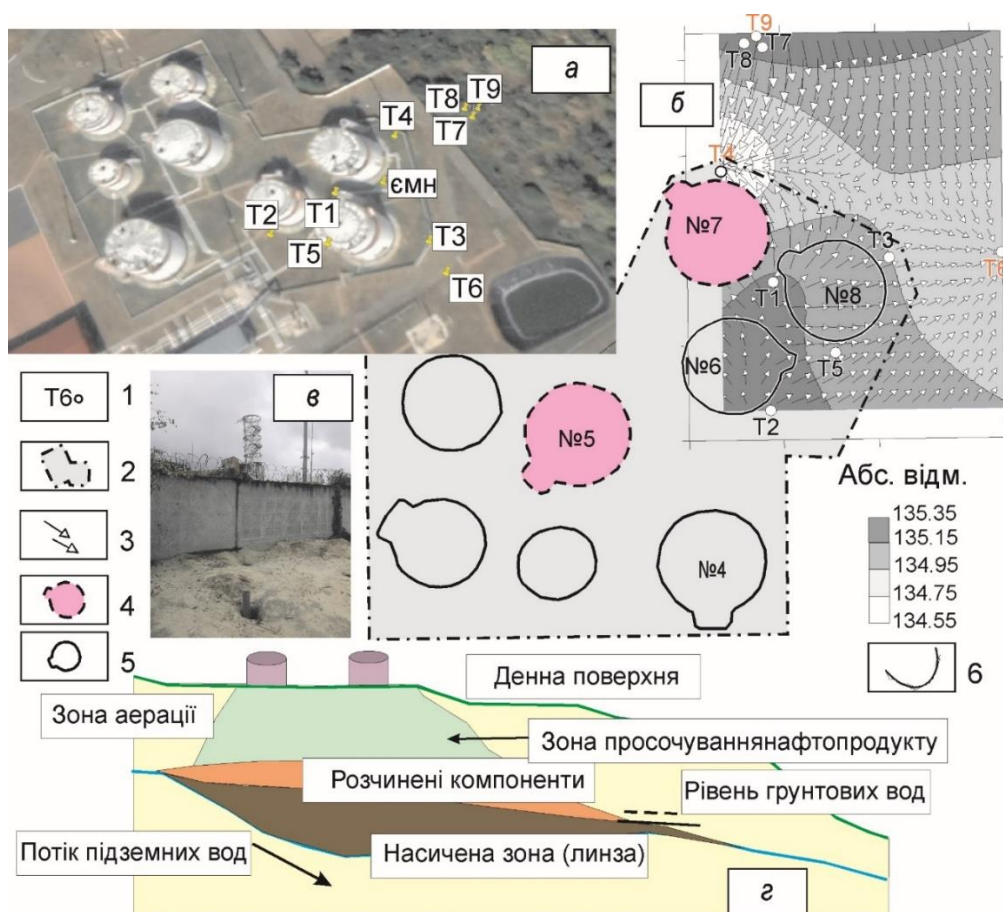


Рис. 2. Фрагмент супутникового фото сервісу Google Earth з координатною прив'язкою ЗС польового спостереження (а) з деталізацією: картограм гідроізогіпс рівня підземних вод та локального підземного градієнту потоку підземних вод (б); фото зондувальної свердловини (в); схеми формування насиченої нафтопродуктами лінзи (г). Умовні позначки: 1 – свердловина польового спостереження, 2 – територія нафтобази, 3 – напрямок локального підземного градієнту потоку підземних вод, 4 – зруйновані ємності, 5 – непошкоджені ємності, 6 – ізолінії гідроізогіпс рівня підземних вод /

Fig. 2. Fragment of Google Earth satellite photo with coordinate reference to the field observation station (a) with details: hydroisohypsum maps of groundwater level and local underground gradient of groundwater flow (б); photo of the probing well (в); scheme of formation of the oil-saturated lens (г)

правлення підземного потоку (рідини з поліютантом) показує акумуляцію останнього в зоні локальної депресії (див. рис. 2, б), яка виражена пониженням абсолютних відміток природної літологічної товщі з перепадом висот близько 0,4 м або максимальними значеннями височини лінзи забруднення (рис. 2, г). Простягання цієї зони фіксується з півночі на південь.

Вона може розглядатися як зона максимального накопичення рідини з нафтопродуктів. Саме тут розташовані свердловини, які на момент проведення відкачок за невеликий проміжок часу (5 хв) дозволили відкачати 12 л рідини (Т4). Така ж сама ситуація спостерігалася в свердловинах Т3 (рис. 2, в) та Т6. Абсолютні відмітки рівня рідини знаходяться у межах +135,3 - +135,75 м. Напрямок підземного потоку дозволяє створити схему розповсюдження поліютантів та розрахувати гідравлічні ухили (L_h), які за проведеними розрахунками склали – 0,001 – 0,016.

Прийнята модель розтікання паливної рідини та розрахунок потужності лінзи СНП.

Як вже було вказано вище, існуючі сучасні моделі розтікання паливної рідини, що призначені для оцінки площі розливу, стосуються горизонтальних та похилих поверхонь, коли розтікання двофазних потоків (система вода-СНП) має форму кола або форму лінзи. Моделі миттєвого розливу та розтікання рідини з одночасним її просоченням, де математична модель процесу являє собою сукупність диференціального рівняння параболічного типу, враховують просочення СНП вглиб підстилаючої поверхні лише в вертикальному напрямку. Виходячи з того, що за характером розтікання розрізняють миттєвий розлив і такий, що триває у часі. Перший має місце при катастрофічному руйнуванні ємності із рідиною (ємність № 7 в нашому випадку), а другий – при ушкодженні ємності, яке призводить до поступового витікання рідини з неї (ємність № 5). Багато

дослідників стверджують [15-17], що миттєве витікання є граничним випадком довготривалого витікання, якщо час витікання скорочується, прямує до нуля, а загальний об'єм розлитої рідини залишається сталим.

В нашому випадку характер розтікання та проміжок часу витоку нам невідомий, бо об'єкт був пошкоджений під час окупації території смт. Бородянка. Тому, прийнятним рішенням з погляду міграційного процесу, що описує окремі стадії міграції – інфільтрацію через зону аерації та міграцію по поверхні ґрунтових вод, є розрахунок міграційної лінзи легких нафтопродуктів у рамках спрощених аналітичних рішень, заснованих на рівняннях багатофазної фільтрації.

В досліджуваному випадку полютанти, що знаходяться у рідкому стані, не змішуються з водою. Слід зазначити, що забруднення зосереджене у верхній частині водоносного горизонту, а з глибиною концентрації нафтопродуктів знижуються. При міграції у гірських породах вони, займаючи частину порового простору, формують самостійну фазу, що перебуває у контакті з водою фазою. При цьому, процес супроводжується міжфазним масообміном, що призводить до формування ареалів забруднення підземних вод розчиненими компонентами. При досягненні забруднювача ґрунтового водоносного горизонту, самостійна фаза легких нафтопродуктів утворила плаваючі на поверхні підземних вод (вод зони аерації) скупчення – лінзи, міграція яких контролюється градієнтом природного фільтраційного потоку [18].

Для подолання капілярного тиску та проникнення у водонасичене пористе середовище необхідно накопичення достатнього шару (потужності) нафтопродуктів, значення якого визначається за формулою [19]:

$$h_{min} = \frac{2\sigma_{нв} \cos \theta}{g_{гк} |\rho_{н} - \rho_{в}|} \quad (1)$$

де h_{min} - мінімальна потужність нафтопродукту, м;

$\sigma_{нв}$ – поверхневий натяг на контакт нафтопродукту та води, 21 дин/см;

θ – крайовий кут змочування, 15°;

g – прискорення вільного падіння, 9,8 м/с²;

$g_{гк}$ – радіус пір ґрунту, 0,05 мм;

$\rho_{н}$ – щільність нафтопродукту, 0,75 г/см³;

$\rho_{в}$ – щільність води, 1 г/см³.

За результатами розрахунків в нашому випадку мінімальна потужність нафтопродукту в лінзі (h_{min}) складає 0,3 м.

Розрахунок радіусу та площі розповсюдження лінзи СНП у зоні аерації. Виходячи з того, що при досягненні забрудненням ґрунтових водоносних горизонтів самостійна фаза СНП утворила плаваючі на поверхні підземних вод (вод зони аерації) скупчення – лінзу, яка має деяку площу, окрім потужності лінзи СНП слід розрахувати радіус ореолу забруднення.

Виходячи з вищенаведеного, керуючись підрахунками приблизних об'ємів витоку СНП, у дослідженні у першому наближенні, розраховані радіус лінзоподібного скупчення на поверхні ґрунтових вод, яке здатне мігрувати у підземній гідросфері у вигляді самостійної фази. Радіус лінзи забруднення СНП навколо порушених ємностей розраховується за формулою:

$$R = \sqrt{\frac{V}{h\pi}} \quad (2)$$

де: R – радіус лінзи полютантів, м; V - об'єм нафтопродуктів, що потрапив до зони аерації, м³; h - висота стовпа забруднювача у свердловині, м

При рішенні рівняння (1), мінімальна потужність лінзи нафтопродуктів склала 0,3 м (висота стовпа рідини). Але, при виконанні польових робіт (дослідно-фільтраційні відкачки методом желонування з зондувальних свердловин) зафіксовано, що висота стовпа у центральній частині площі нафтобази складала 0,5м, 0,47м, 0,33м, а за межами нафтобази - до 0,1м. Тому, для виконання поставленого завдання, розрахунки проводилися з урахуванням максимального (h_1 - 0,5 м), розрахункового середнього (h_2 - 0,3 м) та мінімального фактичного (h_3 - 0,1 м) стовпом рідини. Оскільки витік горючої рідини здійснювався з двох ємностей, розрахунок здійснено для окремих джерел витоку та апроксимовано у єдину площу ореолу забруднення. Розраховані радіуси розповсюдження лінзи полютанту за формулою (2) та їх сумарна площа наведено в таблиці 1.

Розраховані та апроксимовані сумарні площі розповсюдження ареалу нафтопродуктів у зоні аерації винесено з координатною прив'язкою на супутникове фото сервісу Google Earth (рис. 3).

Таблиця 1 / Table 1

Розраховані показники радіусів лінзи та площ забруднення /
Calculated values of lens radii and contamination areas

Висота стовпа рідини (h), м	Ємність № 5			Ємність № 7			Площа, S, м ²
	R ₁ , м	R ₂ , м	R ₃ , м	R ₁ , м	R ₂ , м	R ₃ , м	
h ₁ =0,5	11,3			22,6			2691
h ₂ =0,3		14,57			32,58		4169
h ₃ =0,1			25,24			56,5	10306

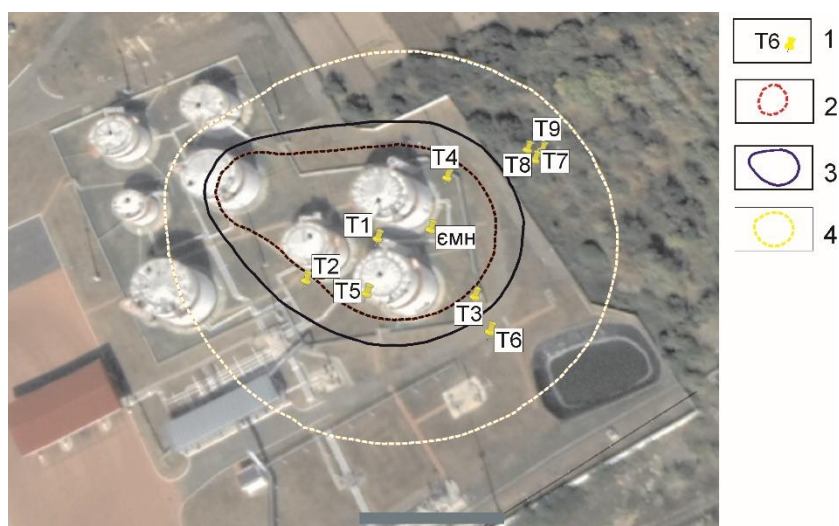


Рис. 3. Результат апроксимації розрахованої площі розповсюдження нафтопродуктів у зоні аерації з координатною прив'язкою до супутникового фото сервісу Google Earth.

Умовні позначки: 1 – свердловина польового спостереження, 2 – контур забруднення з $h_1=0,5$ м, 3 – контур забруднення з $h_2=0,3$ м, 4 – контур забруднення з $h_3=0,1$ м /

Fig. 3. The result of approximation of the calculated area of oil products spreading in the aeration zone with coordinate reference to the Google Earth satellite photo service

Рекомендації щодо очищення території від СНП.

Проведені дослідження сприяли визначенню науково-обґрунтованих способів ліквідації наслідків розливу СНП. Досить ефективним способом усунення забруднення є відкачування забрудненої рідини із свердловин (механічний збір [20]), які необхідно облаштувати в оконтуреній зоні ураженої території. Саме тому, було здійснене буріння 140 свердловин глибиною до 5,2 м, діаметром 0,11-0,168 м, загальним метражем 710 м, які дали можливість запобігти розповсюдженню політанту за рахунок відкачування нафтопродуктів. Більш того, такий спосіб дозволив повторне використання нафтопродуктів після додаткового очищення. Інший рекомендований підхід - створення геохімічного бар'єру або сорбентної екранізації. По своїй суті, такий екран виконує роль своєрідного фізичного та геохімічного бар'єру між джерелом аварійного скиду політанту та зоною аерації. Параметри (площа, потужність шару забрудненої рідини) на аварійно-небезпечній території визначені геоморфологічними особливостями конкретної місцевості.

Висновки.

Забруднення довкілля нафтопродуктами є одним з найбільш масштабних та небезпечних видів техногенного впливу на навколишнє середовище. Визначення параметрів ореолу забруднення та його інтенсивності здійснено на основі проведення комплексу інженерно-геологічних, гідрологічних та морфологічних досліджень з використанням сучасних програмних продуктів для математичного моделювання та платформи су-

путникових знімків Google Earth. В результаті оцінки створених у дослідженні математичних моделей поверхневого стоку, поверхні рівня ґрунтових вод, локального підземного градієнту потоку підземних вод й поверхні рідини – політантів, встановлено: що поверхневий стік здійснюється від цистерн № 5 (пошкоджена), № 6, № 7 (зруйнована), № 8 у основному напрямку з північного-західного на схід; напрямлення потоку лінзи забруднення (рідини з політантом) показує акумуляційну здатність в зоні депресії, яка виражена у вигляді пониження абсолютних відміток природної літологічної товщі з перепадом висот близько 0,4 м (простягання зони орієнтовано з півночі на південь, саме вона розглядається як зона максимального накопичення рідини з нафтопродуктів).

За результатами проведених розрахунків висота стовпа лінзи забруднення склала $h_{роз} = 0,3$ м. При цьому показнику площа забруднення налічує 4169 м², об'єм забруднення – $1250,7$ м³ який відповідає заявленим збиткам (витоку). Але, враховуючи анізотропію фільтраційних властивостей літологічних різновидів у різних напрямках усередині зони аерації, присутність розчиненої води за рахунок дисперсії, наявність локальних акумуляційних депресій літологічної товщі варіанти з іншими показниками h (0,5 м та 0,1 м) також прийнятні. Розраховані та апроксимовані сумарні площі розповсюдження ареалу нафтопродуктів у зоні аерації винесено з координатною прив'язкою на супутникове фото сервісу Google Earth. Проведені дослідження дозволили надати практичні рекомендації щодо очищення території від СНП та

їх повторного використання після очищення, запобігти розповсюдженню поллютанту за рахунок відкачування нафтопродуктів зі змодельованої та фактично підтвердженої лінзи забруднення.

Список використаної літератури

1. Kabył, A. *Bibliometric Analysis of Accidental Oil Spills in Ice-Infested Waters* [Текст] / Almat Kabył, Ming Yang [et al.] // *Int. J. Environ. Res. Public Health*. – 2022. – Vol. 19, No. 22. – P. 15190. <https://doi.org/10.3390/ijerph192215190>
2. Bai, X. *Health Risk Assessment of Groundwater Contaminated by Oil Pollutants Based on Numerical Modeling* [Текст] / X. Bai, K. Song [et al.] // *Int. J. Environ. Res. Public Health*. – 2019. – Vol. 16, No. 18. – P. 3245. <https://doi.org/10.3390/ijerph16183245>
3. Raja, S. *Equilibrium models for predicting areas covered by accidentally spilled liquid fuels and an assessment of their efficacy* / S. Raja, T. Abbasi [et al.] // *Process Safety and Environmental Protection*. – 2019. Vol. 130. P. 153–162. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2019.08.009>
4. Гаврилюк Р.Б. Типізація умов формування осередків нафтохімічного забруднення на військових аеродромах України [Текст] / Р.Б. Гаврилюк, Ю.В. Загородній, О.І. Плюсина // Київ: ІГН НАН України, 36. наук. пр. Інституту геологічних наук НАН України. – 2009. – Вип. 2. – С. 245–251.
5. Огняник М.С. Розвиток моніторингових досліджень підземних вод, забруднених нафтопродуктами [Текст] / М.С. Огняник, А.Л. Брикс, Р.Б. Гаврилюк // *Геологічний журнал*. – №1 (358). – С. 37–46. <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2017.1.99650>
6. Брикс А.Л. Формирование зоны нефтехимического загрязнения вблизи дендропарка «Александрья» (г. Белая Церковь) [Текст] / А.Л. Брикс, Ю.А. Негода // *Геологічний журнал*. – №4 (325). – С. 106–112.
7. Велин А. С. Особенности миграции углеводородов в грунтах зоны аэрации и подземных водах в местах расположения крупных нефтехранилищ [Текст] / А.С. Велин // *Вестник ВГУ. Серия Геология*. – 2017. – № 1. – С. 142–147 <https://doi.org/10.17308/geology.2018.1/1464>
8. Бодачівська Л.Ю. Запобігання розповсюдженню та ліквідація вуглеводневих забруднень [Текст] / Л.Ю. Бодачівська // *Екологія довкілля та безпека життєдіяльності*. – 2008. – №5. – С. 55–58.
9. Bricks A. L. *Hazard of petrochemical pollution of ponds of the “Olexandria” arboretum (Bila Tserkva)* [Текст] / A.L. Bricks, R.B. Gavryliuk, Yu. O. Negoda // *Journ. Geol. Geograph. Geoecology*. – 2020. – 29 (2). – С. 243–251 <https://doi.org/10.15421/112022>
10. Абрамов Ю. О., Басманов О. С., Олійник В. В. Моделирование розтікання горючої рідини внаслідок аварії на залізничному транспорті [Текст] / Ю.О. Абрамов, О.С. Басманов, В.В. Олійник // *Проблеми надзвичайних ситуацій*. – 2021. – № 1(33). – С. 30–41.
11. Д'яченко Н.О. Оцінка аварійного розливу світлих нафтопродуктів [Текст] / Н.О. Д'яченко, О.М. Савлущинський [та інші.] // *Сталий розвиток: захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування. VII Міжнародний конгрес, 12–14 жовтня 2022, Україна, Львів: Збірник матеріалів*. – Київ: Яроченко Я.В. – 2022. – С. 82. <https://doi.org/10.51500/7826-07-0>
12. Улицький О.А. Методика застосування ортотрансформованих космічних знімків для оцінки стану навколишнього середовища [Текст] / О.А. Улицький, В.М. Єрмаков, В.М. Луньова, О.В. Буглак // *Космічна наука і технологія*. – 2019. – № 25 (4). – С. 48–56. <https://doi.org/10.15407/knit2019.04.048>
13. Krcho J. *Morphometric analysis and digital elevation models* [Текст] / J. Krcho. – Bratislava: VEDA. – 1990. – 427 p. [in Slovak]
14. Д'яченко Н.А. Особенности выявления зон деформационных аномалий земной поверхности и расшифровка их геологической природы в условиях подработки массива горных пород [Текст] / Н.А. Д'яченко, Е.А.Панова, [та інші.] // *36. наук. праць ДонНТУ: серія гірничо-геологічна*. – 2006. – Вип. 111. – С. 119–128.
15. Newell, C. *Light Nonaqueous Phase Liquids* / Charles J. Newell, Steven D. Acree [et al.] // *Environmental Research Laboratory Ada. Oklahoma*. – 2015. – 28 p. URL: <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-06/documents/lnapl.pdf>.
16. Огняник Н.С. Основы изучения загрязнения геологической среды легкими нефтепродуктами [Текст] / Н.С. Огняник, Н.К. Парамонова [та інші.]. – Київ: [А.П.Н.]. – 2006. – 278 с.
17. Гаврилюк Р.Б. Типізація умов формування осередків нафтохімічного забруднення на військових аеродромах України [Текст] / Р.Б. Гаврилюк, Ю.В. Загородній, О.І. Плюсина // *36. наук. праць ІГН НАН України*. – 2009. – Вип. 2. – С. 245–251.
18. Schwille, F. *Groundwater pollution by mineral oil products* [Текст] / F. Schwille // *Proceedings of the moscow Symposium*. – 1975. – No 103. – P. 226–240.
19. Mercer. J. *A Review of immiscible fluids in the subsurface: Properties, models, characterization and remediation* [Текст] / J. Mercer, R. Cohen // *Journal of Contaminant Hydrology*. – 1990. – V. 6. – Issue 2. – P. 107–163.
20. Назаренко С.К. Сучасні методи ліквідації аварійних розливів нафти на водних об'єктах суходолу [Текст] / С.К. Назаренко, Л.М. Архипова // *Науковий вісник ІФНТУНГ*. – 2016. – № 1(40). – С. 72–79.

Внесок авторів: всі автори зробили рівний внесок у цю роботу

Studies of oil product pollution in the aeration zone by mathematical modelling

Oleg Ulytsky¹

DSc (Geology), Professor, Director of Educational Scientific Institute «Ecosecurity and Management»,

¹ State Ecology Academy of Postgraduate Education and Management,

35 Metropolitan Vasyl Lypkivskiy St., corps 2, Kyiv, 03035, Ukraine;

Natalia Diachenko¹

PhD (Geology), Senior Research, Associate Professor

of the Department of Environmental Safety;

Armen Sokolov¹

MSc student;

Olga Serdiukova²

Senior Lecturer, Department of Fundamental and Applied Geology,

² V.N. Karazin Kharkiv National University, 4 Svobody Sq., Kharkiv, 61022, Ukraine

ABSTRACT

Formulation of the problem. The article presents the results of a study to assess the pollution of the aeration zone due to the leakage of oil products as a result of the destruction of the «Amik» oil depot during the military operations in the town of Borodyanka. The destruction of the tanks resulted in an immediate leakage of light oil products onto the soil of the surrounding area. The result was a technogenic environmental situation that required immediate determination of the mechanisms of accidental penetration of pollutants into the soil and groundwater, determination of the area of contamination and scientifically sound methods of soil remediation of oil products. The article highlights the issues of organising mathematical modeling of various data for solving applied problems using Google Earth data.

Materials and methods. In order to assess the contamination area and determine the mechanism of accidental penetration of oil products into the soil and groundwater, the existing models of pollutant penetration in case of accidental oil spill were analysed and mathematical spatial models of geomorphological, hydrogeological, engineering-geological and experimental filtration data were created using interpolation, mathematical approximation and gradient analysis. The latter made it possible to identify the directions of surface and groundwater flow both in the local area of the oil depot and in adjacent areas. Using the investigation and filtration parameters obtained during the field work, hydraulic gradients and soil filtration coefficients were calculated, and a spatial mathematical model of the local subterranean gradient of groundwater flow was created.

Results. It was shown that the direction of the underground flow is controlled by a zone of local depression, which is expressed by a decrease in the absolute height of the natural lithological layer with a height difference of about 0.4 m or the maximum values of the height of the contamination lens. The direction of extension of this zone has been determined to be from north to south. This zone can be considered the zone of maximum accumulation of liquid with oil products.

Based on the survey results, the thickness of the contamination lens was calculated to be 0.3 m on average. Using this indicator, the area of contamination is 4169 m², the volume of contamination is 1250.7 m³, which corresponds to the claimed damage. However, taking into account the anisotropy of the filtration properties of the lithological types in different directions within the aeration zone, the presence of dissolved water due to dispersion and the presence of local accumulation depressions in the lithological strata, options with other indicators (0.5 m / 0.1 m) are also acceptable. The calculation of the contamination areas was carried out taking into account the power variations. The approximate total areas of oil product distribution in the aeration zone were plotted with reference to Google Earth imagery.

Conclusions. The research enabled practical recommendations to be made for cleaning up the area of oil products and preventing the spread of the pollutant by pumping oil products out of the modelled and actually confirmed pollution lens. In accordance with the recommendations, 140 wells were drilled to a depth of 5.2 m, with a diameter of 0.11-0.168 m and a total length of 710 m, which made it possible to prevent the spread of the contaminant by pumping out the oil products and reusing them after clean-up.

Keywords: oil products, pollution lens, aeration zone, mathematical model, pilot filtration, surface runoff, probe wells, flow gradient, emergency, GIS project.

References

- 1 Kabyl, A., Yang, M., Shah, D., Ahmad, A. (2022). *Bibliometric Analysis of Accidental Oil Spills in Ice-Infested Waters*. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 19 (22), 15190; DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph192215190>
- 2 Bai, X., Song, K., Liu, J., Khalifa, A., Mou, C. (2019). *Health Risk Assessment of Groundwater Contaminated by Oil Pollutants Based on Numerical Modeling*. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 16, 3245; DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph16183245>
- 3 Raja, S., Abbasi, T., Tausef, S., Abbasi, S. (2019). *Equilibrium models for predicting areas covered by accidentally spilled liquid fuels and an assessment of their efficacy*. *Process Safety and Environmental Protection*, Vol. 130, P. 153–162. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2019.08.009>

- 4 Gavrilyuk R.B., Zagorodnyi Y.V., Plyusnina O.I. (2009). Conditions typification of petroleum contamination spreading at military airfields in Ukrainian. *Journal of scientific papers of the Institute of Geological Sciences of the National Academy of Sciences of Ukrainian*, 2, 245-251 [in Ukrainian].
- 5 Ognianik, N.S., Bricks, A.L., Havryliuk, R.B. (2017) Development of the monitoring recherche of groundwater contaminated by petroleum products. *Geological Journal*, 1 (358), 37-46. DOI: <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2017.1.99650> [in Ukrainian]
- 6 Bricks, A.L., Negoda, Yu.A. (2008). Oil contamination zone forming near the territory of dendrological park «Alexandria». *Geological Journal*, 4 (325), 106-112 [in Ukrainian].
- 7 Velin, A. S. (2017). Peculiarities of migration of hydrocarbons in the soils of the aeration area in the locations of large oil reservoirs. *Proceedings of VSU. Series: Geology*, 1, 142-147 DOI: <https://doi.org/10.17308/geology.2018.1/1464>
- 8 Bodachivska L.Y. (2008). Prevention of the spread and elimination of hydrocarbon pollution. *Environmental ecology and life safety*, 5, 55-58 [in Ukrainian].
- 9 Bricks, A. L., Gavryliuk, R. B., Negoda, Yu. O. Hazard of petrochemical pollution of ponds of the «Olexandria» arbo-retum (Bila Tserkva). (2020). *Journ. Geol. Geograph. Geoecology*, 29 (2), 243–251. DOI: <https://doi.org/10.15421/112022>
- 10 Abramov Y. O., Basmanov O. E., Oliynyk V. V. (2021). Modeling of the spreading of combustible liquid as a result of an accident on railway transport. *Problems of emergency situations*, 1(33), 30-41 [in Ukrainian].
- 11 Diachenko, N.O., Savluchynskyi, O.M., Ulytsky, O.A. (2022). Evaluation of an emergency spill of light petroleum products. *Sustainable development: environmental protection. Energy saving. Balanced nature management. Collection of materials of the VII International Congress (12-14 october 2022)*. Kyiv: E. Y. V. Yarochenko, Collection of abstracts. P. 82. DOI: <https://doi.org/10.51500/7826-07-0> [in Ukrainian].
- 12 Ulytsky, O., Yermakov, V., Lunova, O., Buglak, O. (2019). Technique for orthotransformed satellite imagery application in environmental assessment. *Space Science and Technology*, 25 (4). 48-56. DOI: <https://doi.org/10.15407/knit2019.04.048> [in Ukrainian].
- 13 Krcho, J. (1990). *Morphometric analysis and digital elevation models*. Bratislava: VEDA [in Slovak], 427.
- 14 Diachenko, N.A., Panova, E.A., Privalov, V.A. (2006). Features of detection of zones of deformation anomalies of the earth's surface and decoding of their geological nature in the conditions of rock masses mining. *Collection of scientific works of Donetsk National Technical University: Mining and Geological Series*, 111, 119-128.
- 15 Charles J. Newell, Steven D. Acree, Randall R. Ross, and Scott G. Huling. (2015). *Light Nonaqueous Phase Liquids*. *Environmental Research Laboratory Ada, Oklahoma*, 28. URL: <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-06/documents/lnapl.pdf>
- 16 Ognyanik N.S., Paramonova N.K., Brix A.L. et al. (2006). *Fundamentals of the study of pollution of the geologic environment by light oil products*. Kiev: [A.P.N.], 278 [in Ukrainian].
- 17 Gavryliuk, R.B. Zagorodnyi, Yu.V., Plyusnina, O.I. (2009). Typification of conditions for the formation of petrochemical pollution centers at military airfields of Ukrainian *Collection of scientific works of the Institute of Geological Sciences of the National Academy of Sciences of Ukrainian*, 2, 245-251 [in Ukrainian].
- 18 Schwille, F. (1975). Groundwater pollution by mineral oil products. *Roceedings of the moscow Symposium*, 103, 226–240.
- 19 Mercer, J. Cohen, R. (1990). *A Review of immiscible fluids in the subsurface: Properties, models, characterization and remediation*. *Journal of Contaminant Hydrology*, 6, 2, 107–163.
- 20 Nazarenko, S.K., Arkhipova, L.M. (2016). *Modern methods of liquidation of emergency oil spills on water bodies of land*. *Scientific Bulletin of Ivano-Frankivsk National Technical University of OG*, 2016, 1(40), 72-79 [in Ukrainian].

Authors Contribution: All authors have contributed equally to this work

Received 21 September 2023
Accepted 29 October 2023