

РЕМЕДІАЦІЯ ГЕОЛОГІЧНОГО СЕРЕДОВИЩА, ЗАБРУДНЕНОГО НАФТОПРОДУКТАМИ (ОГЛЯД ТЕХНОЛОГІЙ ТА ПРИКЛАД ЗАСТОСУВАННЯ)

REMEDIATION OF THE SUBSURFACE CONTAMINATED WITH PETROLEUM PRODUCTS (TECHNOLOGY OVERVIEW AND CASE STUDY)

О. М. Шпак, Р. Б. Гаврилюк, Ю. О. Негода, О. І. Логвиненко
Olena M. Shpak, Ruslan B. Havryliuk, Yuriy O. Negoda, Olha I. Lohvynenko

Institute of Geological Sciences, NAS of Ukraine, 55-b O. Honchara Str., Kyiv, Ukraine, 01601
(shpak_lena@yahoo.com)

Забруднення геологічного середовища нафтопродуктами є екологічною проблемою світового рівня та одним із важливих напрямів геоecологічної діяльності в Україні. Щонайменше сотні осередків техногенного забруднення нафтопродуктами потребують проведення ремедіаційних заходів. Проте успішний досвід ремедіації масштабних осередків забруднення досі відсутній в Україні. В статті проаналізовані сучасні методи ремедіації геологічного середовища, забрудненого нафтопродуктами (екскавація, вилучення мобільних нафтопродуктів дренами та свердловинами, скімінг, вилучення випарів, біовентинг, біосларпінг, продування повітрям, відкачка та обробка забруднених підземних вод, біоремедіація, фіторемедіація), їх переваги та обмеження, можливості застосування залежно від гідрогеологічних умов ділянки і мети відновлення. Розглянутий приклад застосування ремедіаційних технологій на забрудненій нафтопродуктами території військової частини у м. Київ. За даними геоecологічного обстеження забрудненої ділянки встановлено збільшення інтенсивності забруднення, причиною якого можуть бути сучасні виливи нафтопродуктів та зниження рівня ґрунтових вод, що призводить до вивільнення додаткової кількості нафтопродуктів. Обладнано та протестовано сучасну систему очищення геологічного середовища від забруднення легкими нафтопродуктами, яка включає комплекс насосного обладнання для вилучення нафтопродуктів, системи розділення рідин та очищення підземних вод.

Ключові слова: геологічне середовище, забруднення, нафтопродукти, ремедіація.

Subsurface contamination with petroleum products is a global environmental problem and one of the most important lines of geo-ecological activity in Ukraine. At least hundreds of petroleum contaminated sites require remediation. However, Ukraine still lacks successful experience in the remediation of large-scale contaminated sites. This paper describes modern methods of subsurface remediation (excavation, mobile recovery of petroleum products through drains and wells, skimming, soil vapour extraction, bioventing, bioslurping, air sparging, groundwater pump and treat, bioremediation and phyto-remediation), their advantages and limitations, possibilities of application depending on hydrogeological conditions of a contaminated site and the purpose of remediation. The case study of the application of remediation technologies at the site of the military unit (Kyiv) contaminated with petroleum products is given. According to the geo-ecological survey of the contaminated area, an increase in the intensity of contamination is noted, which can be caused by the leakage of petroleum products and a decrease in the groundwater level, which leads to the release of an additional volume of petroleum products. A modern system of subsurface remediation of petroleum contamination, which includes a set of pumping equipment for the extraction of petroleum products, a system for liquid separation and groundwater treatment, has been constructed and tested.

Keywords: subsurface, contamination, petroleum products, remediation.

ВСТУП

Забруднення геологічного середовища нафтопродуктами (НП) є актуальною екологічною проблемою світового рівня. Починаючи з 70-х років минулого століття вченими-гідрогеологами та інженерами у багатьох країнах, насамперед у США, було розроблено ряд методів локалізації забруднень та віднов-

лення (ремедіації) забруднених ґрунтів і підземних вод. Підходи до ремедіації геологічного середовища, забрудненого НП, пройшли певну «революцію» завдяки численним комплексним дослідженням забруднених ділянок. Перші системи відкачки та обробки підземних вод, обладнані з метою видалення осередків розчинених вуглеводнів, вия-

Цитування: Шпак О. М., Гаврилюк Р. Б., Негода Ю. О., Логвиненко О. І. Ремедіація геологічного середовища, забрудненого нафтопродуктами (огляд технологій та приклад застосування). Збірник наукових праць Інституту геологічних наук НАН України. 2021. Том 14, вип. 2. С. 96–110. <https://doi.org/10.30836/igs.2522-9753.2021.250007>.

Citation: Shpak O. M., Havryliuk R. B., Negoda Y. O., Lohvynenko O. I., 2021. Remediation of the subsurface contaminated with petroleum products (technology overview and case study). Collection of scientific works of the Institute of Geological Sciences NAS of Ukraine. Vol. 14, iss. 2. Pp. 96–110. <https://doi.org/10.30836/igs.2522-9753.2021.250007>.

вилились неефективними при очищенні водоносних горизонтів до належного рівня. Проблеми, з якими зіштовхнулися спеціалісти, вперше були задокументовані у звітах Агентства з охорони навколишнього середовища США U.S. EPA (Manual..., 1992; Risk..., 1989) та були пов'язані переважно зі складнощами характеристики ділянок та виявленням НП у підземному середовищі.

Численні дослідження були сфокусовані на проблемах, що стосувалися особливостей поведінки НП у геологічному середовищі, від яких залежить необхідний час та можливість досягнення стандартів очищення (Manual..., 1992; National..., 1994). Виявлено, що факторами, які створюють найбільші перепони для відновлення забрудненого геологічного середовища, є властивості НП — їх незмішуваність з водою, здатність до сорбції та залежність рухливості НП-рідини від її насичення у поровому просторі; мінливість гідрогеологічних умов, гетерогенність геологічного середовища; та помилки у проєктуванні систем ремедіації (дебіти відкачки, розміщення ліквідаційних свердловин тощо). Спеціалісти прийшли до висновку, що існує багато складних забруднених ділянок, для відновлення яких використання традиційних методів може бути неефективним, а отже, є потреба у розвитку нових методів.

На сьогоднішній день недостатньо розроблені методи вилучення залишкових НП, які утримуються капілярними силами в забруднених ґрунтах зони аерації та можуть бути джерелом довготривалого забруднення підземних вод (Milioni, 2016). Поширюється застосування методів біоремедіації та фіторемедіації з метою відновлення забруднених НП ділянок (Bioremediation..., 2021; Pivetz, 2001). Підвищену увагу починають приділяти розробці стратегій застосування коригуючих заходів, заснованих на оцінці ризику (загрози поширення) забруднення (Community..., 2021).

На території України існують численні осередки забруднення геологічного середовища НП, які виступають стійким чинником погіршення екологічної ситуації протягом останніх десятиліть. Розповсюдження НП-забруднення супроводжується негативними змінами (забруднення підземних вод питного водопостачання, зміна мікробіологічного складу ґрунтів та неможливість їх подальшого використання для сільськогосподарського призначення, потрапляння НП у поверхневі водойми, що супроводжується загибеллю біоти тощо), які можуть бути суттєвими тривалий час. Проблема ремедіації забруднених НП територій

потребує подальшого вивчення та розробки як у нормативно-правовому та організаційно-економічному, так і в технологічному аспектах.

Метою даної роботи є огляд існуючих методів ремедіації забруднених НП ділянок (екскавація, вилучення мобільних НП дренами та свердловинами, скіммінг, вилучення випарів, біовентинг, біосларпінг, продувка повітрям, відкачка та обробка забруднених підземних вод, біоремедіація, фіторемедіація), їх переваг та обмежень, можливостей застосування у різних гідрогеологічних умовах та еколого-економічної ефективності, що необхідно для розробки принципів обґрунтування вибору методів ремедіації забруднення геологічного середовища НП. Як приклад, виконано дослідження забруднення геологічного середовища НП та застосування сучасних технологій ремедіації на території військової частини у м. Київ.

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ

На основі аналізу та узагальнення світових літературних джерел та електронних посилань за період 1989–2021 рр. у статті охарактеризовані сучасні методи ремедіації геологічного середовища, забрудненого НП — екскавація, вилучення мобільних НП дренами та свердловинами, скіммінг, вилучення випарів, біовентинг, біосларпінг, продувка повітрям, відкачка та обробка забруднених підземних вод, біоремедіація та фіторемедіація.

Еколого-геологічні дослідження, що проводились на забрудненій НП території військової частини у м. Київ співробітниками Інституту геологічних наук (ІГН) НАН України та інших організацій в період 2001–2021 рр., включали обстеження забрудненої території, виявлення існуючих та потенційних джерел забруднення, проведення моніторингу стану забруднення підземних вод з замірами рівнів води та НП, відбір проб води та ґрунтів, налагодження та тестування системи ремедіації. За даними моніторингу побудовані карти гідроізогіпс та товщини шару мобільних НП у водоносному горизонті з використанням ГІС-технологій. Лабораторні дослідження з визначення вмісту НП у пробах води виконувались за допомогою аналізатора «Мікран» у лабораторії нафтохімічних досліджень геологічного середовища відділу охорони підземних вод ІГН НАН України.

МЕТОДИ РЕМЕДІАЦІЇ ГЕОЛОГІЧНОГО СЕРЕДОВИЩА, ЗАБРУДНЕНОГО НАФТОПРОДУКТАМИ
Вибір методів ремедіації є важливим для успішної реалізації проєкту ремедіації. Застосування

того чи іншого методу ремедіації або їх комбінації залежить від гідрогеологічних умов забрудненої ділянки, властивостей забруднювача та його розповсюдження в підземному середовищі, а також від мети ремедіації.

Якщо об'єм втрачених НП незначний і при цьому НП утримується у верхній частині зони аерації, для відновлення забруднених ґрунтів застосовують *екскавацію*. Переваги екскавації — відносно низька вартість, невелика тривалість та можливість повного очищення вилученого ґрунту. Цей метод підходить для широкого спектру НП-забруднювачів. До недоліків екскавації відносяться обмеження за глибиною застосування та за наявністю забудови і підземних комунікацій, а також необхідність полігонів або мобільних реакторів для складування та обробки забрудненого ґрунту. Слід враховувати, що випаровування летких компонентів може створювати пожежонебезпечні ситуації.

Для вилучення мобільних НП на забруднених ділянках використовують *траншеї, дрени та свердловини*. За даними (U.S. EPA..., 2005), можна вилучити до 50% всього об'єму НП, що потрапив у підземне середовище. В результаті залишається значний об'єм НП, що призводить до подальшого забруднення підземних вод. Однак є значні переваги в тому, щоб видалити мобільні НП, а саме: вилучення частини мобільних НП уповільнює швидкість міграції НП, зменшує ризики забруднення об'єктів-реципієнтів і надає час для детальних досліджень з метою оптимального вибору ремедіаційних заходів.

Системи *траншей/дрен* є найбільш гідравлічно ефективним способом для вилучення мобільних НП з водоносного горизонту переважно на глибині 5–7 м. Їх застосовують для слабкопроникних шарів і гетерогенних порід, де знадобилася б велика кількість свердловин для контролю потоку НП (Newell et al., 1995).

Використання *свердловин* для вилучення мобільних НП більш поширене, ніж застосування траншей/дрен. На ділянках із середнім та високим коефіцієнтом фільтрації порід ефективним є використання одночасної роздільної відкачки НП і води, а в породах з низьким коефіцієнтом фільтрації — вилучення суміші рідин (U.S. EPA..., 2005). В цілому, практичною метою відновлення водоносних горизонтів, складених піщаними породами, є вилучення мобільних НП з метою ліквідації осередку забруднення та контролю міграції, тоді як контроль та локалізація осередку забруднення

є більш досяжною метою ремедіації в суглинистих та глинистих породах (U.S. EPA..., 2005).

В системах *скіммінгу* використовують пристрої (скіммери) для селективного збору мобільних НП з поверхні ґрунтових вод. Незважаючи на низьку швидкість вилучення НП, скіммери широко використовують через простоту в установці та експлуатації. Здатність скіммерів забирати лише невеликі обсяги води може знизити витрати та експлуатаційні обмеження. Цей метод застосовують, коли товщина плаваючого шару НП занадто тонка, щоб забезпечити ефективне відновлення за допомогою насоса. За допомогою скіммерів можна вилучити мобільний НП товщиною менше 7 см (Engineering..., 1997).

Вилучення випарів — перспективна технологія для видалення летких компонентів з ненасиченої зони. Повітря пропускається крізь забруднену зону шляхом створення вакууму в свердловині. При цьому леткі вуглеводні захоплюються в потік повітря, що рухається у напрямку свердловини. Повітря, що містить вуглеводні, потім обробляється і видаляється в атмосферу. Ефективність системи вилучення випарів залежить від хімічного складу НП, витрат потоку випарів крізь ненасичену зону та шляху потоку випарів у зоні забруднення (Milioni, 2016).

Біовентинг полягає у використанні індукованого потоку повітря, щоб збільшити біодеградацію забруднювачів у зоні аерації. Цей метод успішно використовують за кордоном для видалення НП із забруднених ґрунтів. В праці (Бреус та ін., 2008) описані роботи з очищення ґрунту на ділянці площею 1,5 тис. м², забрудненій дизельним паливом на глибину 1,5–3,5 м (у ґрунт потрапило 50 тис. л палива). З метою прискорення природного біорозкладу НП була проведена киснева біовентилляція ґрунту. За 6 місяців вміст НП на глибині до 3 м зменшився на 10–30%. Подальша біовентилляція з додатковим введенням у ґрунт необхідних для мікроорганізмів поживних речовин призвела до зменшення вмісту палива ще на 30%.

Біосларпінг є комбінацією біовентингу та вакуумної відкачки з метою вилучення мобільних НП з ґрунтів і підземних вод та прискорення біодеградації забруднених ґрунтів (Milioni, 2016). Біосларпінг застосовують для відновлення ґрунтів і ґрунтових вод, забруднених паливними леткими та напівлеткими вуглеводнями на ділянках з глибиною залягання рівня ґрунтових вод (РГВ) до 9 м.

Продування повітрям застосовується для видалення летких компонентів з безнапірних водо-

носних горизонтів (Miloni, 2016). Цей метод має на меті відділити леткі вуглеводні від водної фази і НП на шляху потоку повітря та додати кисень у воду, щоб прискорити біодеградацію вуглеводнів. Обмеження методу — чутливість до вибіркового шляхів при гетерогенності середовища.

Відкачка та обробка підземних вод використовується для вилучення розчинених у підземних водах вуглеводнів. У залежності від умов ділянки, щоб вилучити НП, защемлені в насиченій зоні, можуть знадобитись десятиліття, а можливо, й століття (Newell et al., 1995). Незважаючи на обмеження, цей метод може бути використаний як елемент програми відновлення забруднених НП ділянок. Система відкачки та обробки підземних вод застосовується для встановлення гідродинамічного контролю, щоб попередити міграцію забруднювача, і для відновлення забруднених підземних вод, коли джерело забруднення ліквідоване. Цей метод було обрано складовою ремедіації в США на декількох сотнях забруднених ділянок (U.S. EPA..., 2020).

Біоремедіація полягає у стимулюванні росту мікроорганізмів, які сприяють розкладу НП. Перевагами біоремедіації є використання природних процесів для відновлення забрудненого підземного середовища. Незважаючи на те, що бажані умови для розмноження мікробів важко створити в зоні забруднення (Newell et al., 1995), біодеградація розчинених вуглеводнів може бути використана як елемент керування на забруднених ділянках. Найбільша користь біоремедіації полягає у доочищенні ділянки після вилучення мобільних або залишкових НП.

In situ біоремедіація включає дослідження, які виконують безпосередньо на забрудненій ділянці без транспортування забрудненого ґрунту або води. Застосування *in situ* біоремедіації не потребує значної кількості обладнання, робочої сили та енергії порівняно з іншими методами; тому цей метод є дешевшим.

Прискорена in situ біоремедіація полягає у сприянні росту мікроорганізмів шляхом додавання поживних речовин або електронних донорів. Додавання сторонніх мікроорганізмів безпосередньо на забруднену ділянку називається *біоприростом* і застосовується, коли потрібних мікроорганізмів немає в природі або їх популяція недостатня (Bioremediation..., 2021).

Контроль природного послаблення забруднення базується на врахуванні впливу процесів природного затухання забруднення. Потрібні

ефективні програми моніторингу, щоб впевнитись, що концентрації забруднювача знижуються у часі та пляма скорочується у розмірі. Контроль природного послаблення забруднення проводять на ділянках, де джерело забруднення ліквідоване, часто після застосування більш активних методів. Цей метод є перспективним та являє собою практичну та економічну альтернативу традиційним методам з метою керування забрудненням підземних вод розчиненими вуглеводнями з низьким рівнем ризику (Community..., 2021).

Ex-situ біоремедіація полягає в обробці забрудненого ґрунту або води після їх екскавації або відкачки з місця забруднення. Хоча даний метод вимагає видалення ґрунту до початку обробки, він може бути швидшим, простішим з точки зору контролю і, як правило, дає можливість відновлювати ґрунти різного складу.

Фіторемедіація полягає у використанні рослин з метою часткового або повного відновлення забруднених НП ґрунтів та підземних вод. Цей метод є менш інвазивним та деструктивним і дозволяє заощадити кошти на 50–80% порівняно з традиційними технологіями (Pivetz, 2001., Van Erps, 2006). Для ремедіації забруднених НП ґрунтів успішно використовується люцерна та обліпіха (Власов, 2015; Шевчик, Романюк, 2017). Були проведені дослідження посівів ріпаку та райґрасу на забрудненій НП ділянці: через три місяці початкові концентрації НП знизились на 77–85% (Карпенко та ін, 2012). Найбільшою перешкодою застосуванню фіторемедіації є обмеження з глибиною кореневої системи рослин.

Розглянуті методи ремедіації геологічного середовища, забрудненого НП, мають свої переваги та обмеження, і для максимального видалення забруднення у більшості випадків потрібно використовувати послідовність процесів відновлення (Рашман, 2001; Newell et al., 1995). Детальне вивчення умов забрудненої ділянки і розуміння процесів, які впливають на перенесення і поведінку НП у підземному середовищі, дозволить оптимізувати відновлювальні заходи, максимально прогнозувати ефективність відновлення, мінімізувати його вартість і підвищити достовірність оцінки витрат.

Основні сучасні технології ремедіації геологічного середовища, забрудненого НП, геолого-гідрогеологічні умови їх застосування, переваги та недоліки, еколого-економічна ефективність та поширеність застосування наведені в таблиці.

Таблиця. Застосування методів ремедіації геологічного середовища, забрудненого НП

Table. The application of methods for remediation of the subsurface contaminated with petroleum products

Методи ремедіації	Гідрогеологічні умови застосування	Переваги	Недоліки	Еколого-економічна ефективність	Поширеність застосування
Екскавація ґрунту	Забруднення НП верхньої частини зони аерації у незначному об'ємі	Тривалість ремедіації відносно невелика, охоплює широкий спектр НП-забруднювачів	Обмеження за глибиною та наявністю забудови і підземних комунікацій. Випаровування летких НП створює пожежонебезпечні ситуації	Залежить від глибини забруднення: витрати на великій глибині можуть бути значними	Широко використовується у світовій практиці
Вилучення мобільних НП: а) траншеями / дренами	Для вилучення мобільних НП на РГВ на невеликій глибині (5–7 м)	Обмеження міграції НП Підходить для слабкопроникних шарів і гетерогенних порід	Тривалий час вилучення Необхідна обробка та утилізація забрудненої води	Найбільш гідравлічно ефективний спосіб для вилучення мобільних НП з водоносного горизонту	Широко використовується в Україні і за кордоном
б) свердловинами	Для вилучення мобільних НП з водоносного горизонту переважно з середнім та високим Кф порід	На ділянках із середнім та високим Кф порід ефективним є застосування одночасної роздільної відкачки НП і води, в породах з низьким Кф – вилучення суміші флюїдів	Через коливання РГВ частина НП стає затиснутою і слугує довготривалим джерелом забруднення	Ефективний при великих об'ємах забруднення НП. Дозволяє вилучити до 50% об'єму НП. Вартість технології: 250–1000 дол. за 1 т НП	Широко використовується в Україні і за кордоном. Перспективним є використання горизонтальних свердловин.
в) скіммінг	Для вилучення шару мобільних НП незначної потужності на РГВ	Вилучення мобільних НП потужністю до 7 см. Відбір незначного об'єму води	Низька швидкість вилучення НП	Система проста в установці та експлуатації	Широко використовується за кордоном, пілотні дослідження в Україні

Продовж. таблиці

Методи ремедіації	Гідрогеологічні умови застосування	Переваги	Недоліки	Еколого-економічна ефективність	Поширеність застосування
Вилучення випарів НП	Для видалення летких компонентів НП з ненасиченої зони, в тому числі затиснутих НП	Дозволяє вилучити значний об'єм НП вище РГВ, в тому числі НП, утримувані капілярними силами	Підходить лише для добре проникних необводнених ґрунтів. Потік випару обмежує масоперенос НП	Дешевий та швидкий метод. Вартість технології: 20–80 дол. США за 1 м ³ забрудненого ґрунту або від 27 до 66 дол. за 1 т	Повністю перевірений на практиці та широко використовується за кордоном
а) біовентинг	З метою прискорення біодеградації НП в зоні аерації для відновлення ґрунтів, забруднених паливними НП	Прискорення біодеградації НП	Необхідні додаткові дослідження щодо додавання поживних речовин та кінетики біодеградації	Вартість технології: 13–160 дол. США за 1 м ³ забрудненого ґрунту	Успішно використовується за кордоном
Біосларпінг	Комбінація біовентингу та вакуумної відкачки мобільних НП з метою вилучення мобільних НП з ґрунтів та ґрунтових вод та біоремедіації забруднених ґрунтів	Ефективне вилучення мобільних НП в капілярній каймі та на РГВ, біодеградація залишкових НП та видалення через екстракцію випарів. Не потребує вилучення значних об'ємів води	Обмеження з глибиною РГВ (до 9 м). Залежність від проникності, вологості та температури ґрунту	Є найбільш економічно-ефективною технологією порівняно з традиційними методами вилучення НП	Успішно використовується за кордоном
Продувка повітрям	Для видалення летких компонентів НП нижче РГВ у безнапірних водоносних горизонтах	Посилення біодеградації НП	Чутливість до гетерогенності порід, формування вибіркового шляхів повітря. Можливе поширення міграції НП у підземних водах та випарів у зоні аерації. Радіус впливу свердловини важко оцінити	Ефективність методу зменшується за рахунок десорбції і дифузії НП. Вартість технології: 20–130 дол. США за 1 м ³ забрудненого ґрунту	Контрольовані дослідження відносно обмежені. Потрібен регулярний моніторинг, щоб визначити придатність і ефективність методу

Методи ремедіації	Гідрогеологічні умови застосування	Переваги	Недоліки	Еколого-економічна ефективність	Поширеність застосування
Відкачка та обробка забруднених підземних вод	Для водоносних горизонтів, забруднених розчиненими вуглеводнями, коли джерело забруднення ліквідоване або ізольоване, та з метою гідродинамічного контролю	Дозволяє вилучити розчинені вуглеводні з насиченої зони	Потребує очищення значних об'ємів води. Не дозволяє вилучити НП, защемлені нижче РГВ, що може викликати подальше забруднення водоносного горизонту	Потребує тривалого часу. Гетерогенність порід знижує ефективність вилучення НП	Широко використовується і може бути елементом загальної програми ремедіації на забруднених ділянках
Біоремедіація а) <i>in situ</i> біоремедіація	З метою ремедіації забруднених НП ґрунтів та підземних вод, після вилучення мобільних або залишкових НП Виконується на забрудненій ділянці без транспортування ґрунту або води	Використання природних процесів для очищення забруднених НП ділянок. Мікроби, що існують в природних умовах, не становлять загрози здоров'ю людей	Бажані умови для розмноження мікробів (наявність поживних речовин та електронних акцепторів, рН, вологість) важко створити в зоні забруднення НП	Найбільша ефективність у доочищенні ділянки після вилучення мобільних або залишкових НП Не потребує значної кількості обладнання, робочої сили та енергії. Вартість: 14–98 дол. за 1 т	Широко застосовується у світовій практиці і може бути використаний як елемент керування на багатьох забруднених НП ділянках

Закінчення таблиці

Методи ремедіації	Гідрогеологічні умови застосування	Переваги	Недоліки	Еколого-економічна ефективність	Поширеність застосування
<p>контроль природного послаблення забруднення</p> <p>б) ex-situ біоремедіація</p>	<p>На ділянках, де джерела забруднення більше не існує, після застосування більш активних методів з метою керування забрудненням водоносних горизонтів розчиненими НП з низьким рівнем ризику</p> <p>Обробка забрудненого ґрунту або води після їх видалення з місця забруднення</p>	<p>Відбувається з незначним втручанням або без втручання людини</p> <p>Дозволяє відновити ґрунти різного складу</p>	<p>Інтенсивність самоочищення залежить від природно-кліматичних умов</p> <p>Потребує спеціального обладнання та персоналу. Неможливо застосовувати на значних глибинах та у випадку близькості забудови</p>	<p>Практична та економічно ефективна альтернатива традиційним методам відкачки-обробки підземних вод</p> <p>Швидкий і простий з точки зору контролю, можливість відновити ґрунти різного складу</p>	<p>Перспективний метод, тестові дослідження в Україні</p>
Фіторемердіація	З метою ремедіації забруднених НП ґрунтів зони аерації на незначній глибині; з метою гідродинамічного контролю забруднення підземних вод	Малоінвазивний та деструктивний метод. Сприяє біорізноманіттю, поліпшенню якості повітря та води, відновленню екосистем. Рослинність адсорбує вуглекислий газ, зменшує ерозію, спричинену вітром або водою	Коренева система рослин акумулює забруднювачі на незначній глибині. Можливе накопичення забруднювачів у тканинах рослин та підвищення концентрацій летких компонентів у повітрі. При використанні невластивих для ділянки рослин, наслідки їх введення в екосистему невідомі	Заощадження коштів на 50–80% порівняно з традиційними технологіями. Витрати: 17–30 дол. за 1 т ґрунту. Ефективний при невисоких концентраціях НП. Потребує тривалого часу	Широко застосовується у світовій практиці, проводились тестові дослідження та польові випробування в Україні

В подальшому для територій, забруднених НП, доцільно провести ранжування з виділенням першочергових об'єктів, що становлять найбільшу загрозу для довкілля, з метою невідкладного проведення ремедіаційних заходів та вибору ефективних технологій.

ЗАСТОСУВАННЯ РЕМЕДІАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ НА ЗАБРУДНЕНІЙ НП ТЕРИТОРІЇ ВІЙСЬКОВОЇ ЧАСТИНИ

На території військової частини (Святошинський район, м. Київ) основні втрати НП зі складів паливо-мастильних матеріалів (ПММ) відбувались у 60–90-х роках ХХ ст. З 2001 по 2004 р. на ділянці забруднення ТОВ НВЦ «Інгеоком» проведено комплекс робіт, метою яких було дослідження забруднення геологічного середовища НП і створення та апробація системи ліквідації наслідків забруднення. Виявлено забруднення НП ґрунтів зони аерації, представлених нижньо-, середньо- та верхньочетвертинними алювіальними, озерними, водно-льодовиковими та місцями еолово-делювіальними супісками та суглинками. Осередок забруднення являв собою лінзу мобільних НП у ґрунтовому водоносному горизонті товщиною до 1,5 м, за формою витягнуту від трубопроводу та підземних резервуарів складу ПММ на південний захід, з шириною 100–120 м і довжиною до 200–250 м. Очевидною була пряма загроза здоров'ю людей при використанні води або контакті із забрудненими ґрунтами і повітрям, також існувала загроза вибуху або пожежі в результаті накопичення летких вуглеводневих сполук. На території досліджень були обладнані 18 ліквідаційних свердловин, але ремедіаційні заходи не проводили у зв'язку з припиненням фінансування.

У 2008 р. ТОВ «ЕкоГідроГео» проведені еколого-геологічні вишукування, метою яких було уточнення стану НП-забруднення. За результатами досліджень, площа та об'єм лінзи НП на поверхні ґрунтових вод становили відповідно 1,5–2 га і близько 15–20 тис. м³, площа забруднення ґрунтів залишковими НП займала майже половину території складу і сягала близько 5 га.

Протягом 2013–2017 рр. у рамках Програми НАТО «Наука заради миру та безпеки» було реалізовано міжнародний проєкт G 4585 «Ремедіація нафтопродуктових забруднень територій військових частин в Україні», направлений на вирішення проблеми забруднення геологічного середовища НП на територіях військових об'єктів. У рамках

проєкту проведено обстеження території резервного парку, виконано заміри глибин залягання РГВ та НП, визначено технічні параметри свердловин (Наукові..., 2020). Варто зазначити, що відсутність геодезичної прив'язки свердловин не дозволила побудувати карти гідроізогіпс із позначенням напрямків руху лінз мобільних НП і шлейфів розчинених вуглеводнів.

У 2021 р. співробітниками ІГН НАН України проведено повторне обстеження забрудненої території військової частини, топографічна зйомка та геодезична прив'язка свердловин. За даними моніторингу побудовані карти гідроізогіпс та товщини шару мобільних НП (рис. 1), розрахований об'єм втрачених НП у підземному середовищі. Аналізуючи отриману інформацію, можна зробити висновок про поступове зміщення лінзи НП з потоком ґрунтових вод. За час спостережень межі забруднення практично не змінилися, але відбулись зміни в площі розповсюдження товщин НП: площі з товщиною НП 0,7 м і вище збільшились; певної закономірності в зміні площ товщин НП 0,2–0,4 та 0,4–0,7 м не спостерігається (рис. 2). Причиною збільшення товщини шару НП можуть бути як додаткові розливи НП у районі рампи, де відбувається перекачування палива, так і зниження РГВ, що призводить до вивільнення додаткової кількості НП, утримуваних у поровому просторі. На основі отриманих даних планується створити концептуальну модель забрудненої території, необхідну для розробки науково обґрунтованої стратегії ремедіаційних заходів.

На території досліджень встановлено систему ремедіації забрудненого НП геологічного середовища, яка забезпечує можливість вилучення мобільних НП та забруднених підземних вод шляхом відкачки свердловинами із наступним розділенням рідин, багатоступеневим очищенням вилучених підземних вод та їх поверненням у підземне середовище. Відкачка НП та забруднених підземних вод із вертикальних свердловин може здійснюватися як селективно — із використанням пневматичних скіммерів та заглиблювальних насосів, так і разом — з їх подальшим розділенням у сепараторі (рис. 3). В першому випадку передбачається створення депресійних воронок поверхні ґрунтових вод за допомогою заглиблювальних насосів та відкачка пневматичними скіммерами мобільних НП, які мають надходити до утворених воронок (рис. 3).

Налагоджено та протестовано систему ремедіації. Скіммери SPP-3 Combo та занурювані насоси

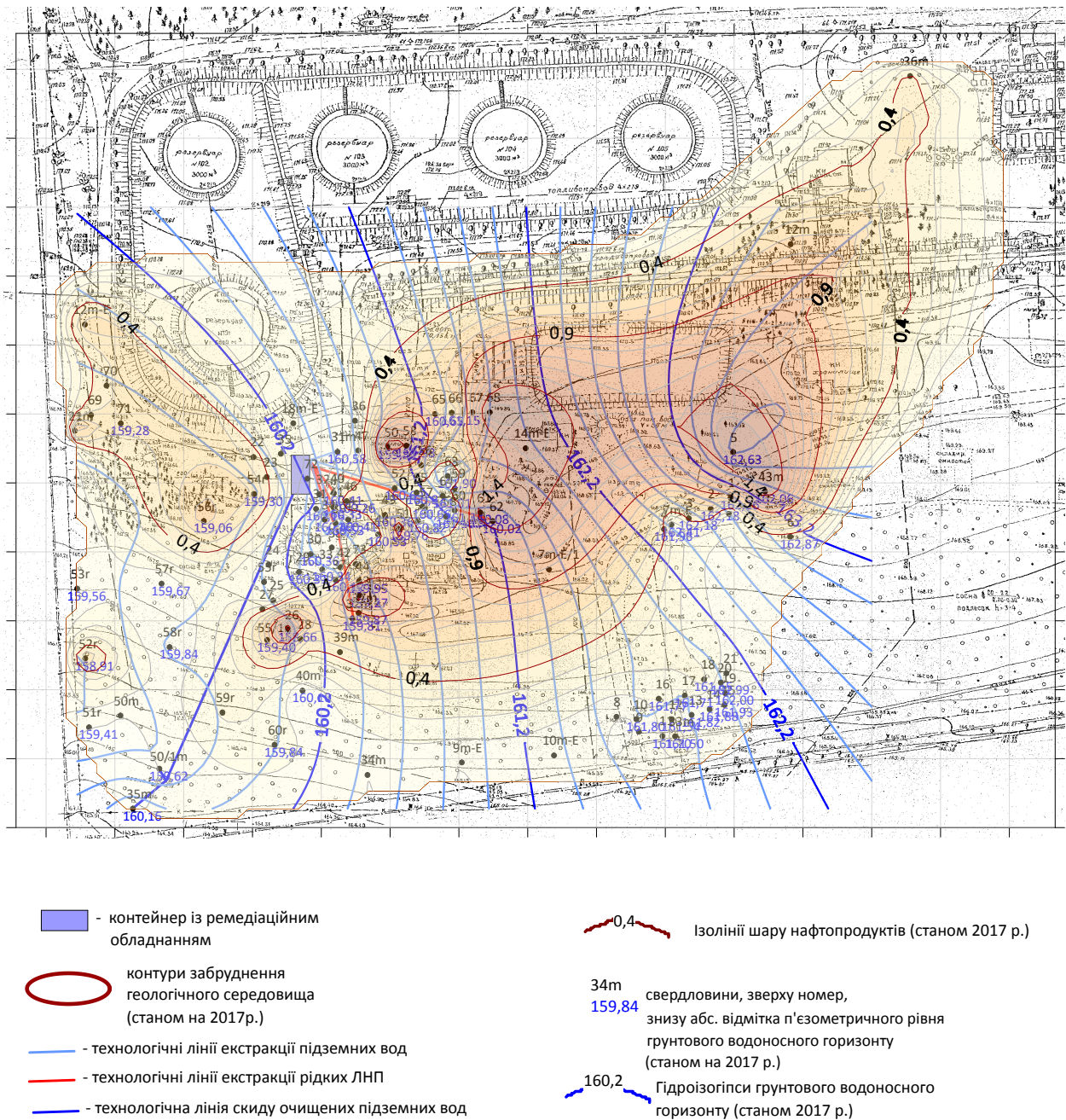


Рис. 1. Схема поширення забруднення геологічного середовища НП на території військової частини.

Fig. 1. The scheme of subsurface contamination spreading on the territory of the military unit.

марки Grundfos були підключені індивідуальними лініями та встановлені в свердловинах з можливістю зміни місця їх встановлення (рис. 4). Лінії скіммерів та занурюваних насосів під'єднані відповідно до ємності накопичення НП та сепаратора, розміщеного в ізолюваному контейнері. Від контейнера обладнані дві паралельні лінії фільтрів, кожна з яких складається з двох піщаних та трьох вугільних фільтрів. Після проходження

фільтрів очищена вода трубопроводом подається до інфільтраційних свердловин, які знаходяться у незабрудненій зоні.

Проведено тестову відкачку та аналіз проб забрудненої води на різних стадіях очищення. Після проходження триступеневого очищення з використанням піщаних та вугільних фільтрів вміст НП у воді становив $< 0,01 \text{ мг/дм}^3$, що менше встановлених гранично-допустимих концентрацій

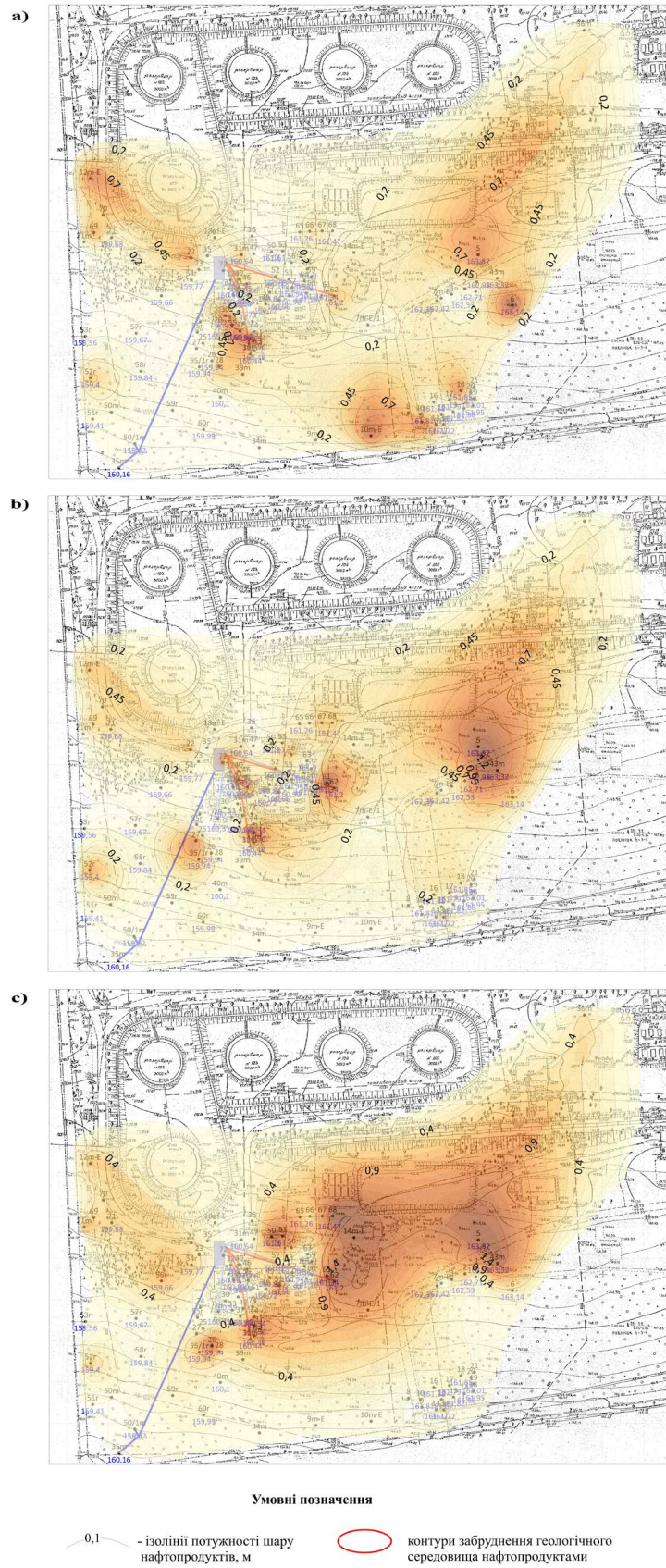


Рис. 2. Ізолінії товщин шару мобільних НП у ґрунтовому водоносному горизонті станом на: а) 2015 р., б) 2016 р., в) 2017 р.

Fig. 2. Isolines of thickness of a mobile petroleum product layer in groundwater as of: a) 2015, b) 2016, c) 2017.

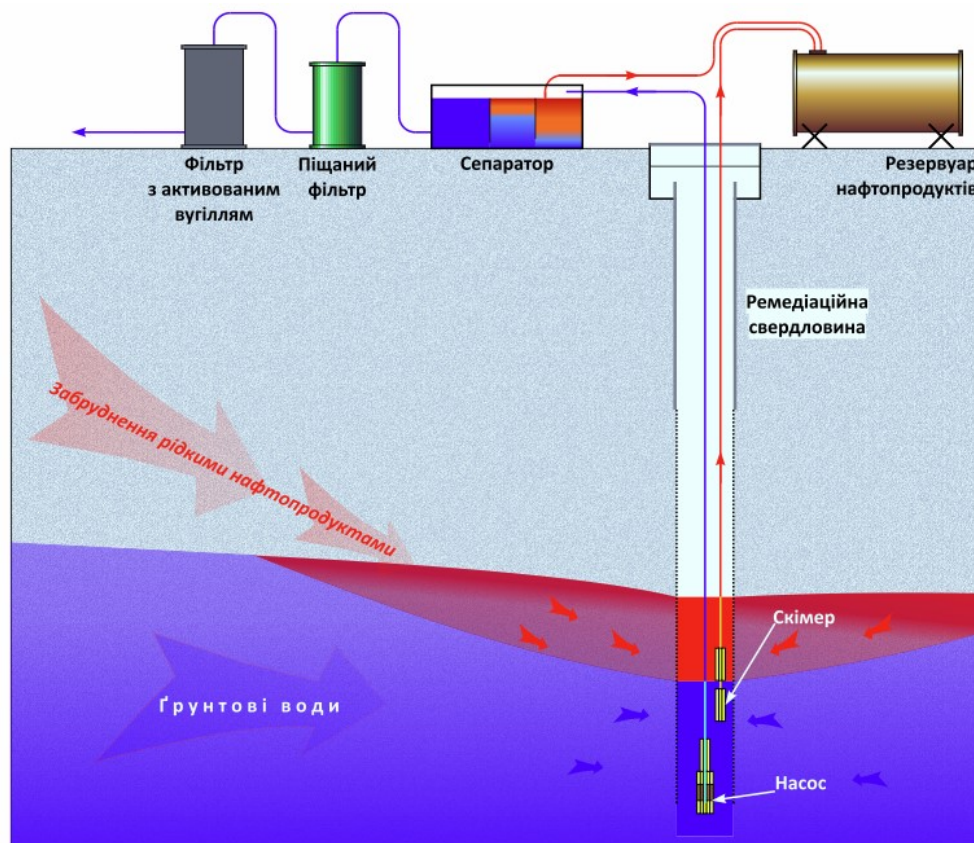


Рис. 3. Схема вилучення НП та забруднених підземних вод із геологічного середовища (Наукові..., 2020).

Fig. 3. The scheme of extraction of petroleum products and contaminated groundwater from the subsurface (Scientific..., 2020).

НП у підземних водах та свідчить про ефективність застосування системи ремедіації.

Відсутність подальшого фінансування не дозволила приступити до реалізації практичної фази робіт по локалізації та ліквідації існуючих нафтохімічних забруднень геологічного середовища на території військової частини. На даний час проводяться роботи з підтримки системи ремедіації в робочому стані та моніторинг осередку забруднення.

Обладнана система ремедіації може бути використана для навчальних тренінгів та в якості науково-методичного полігону для апробації та впровадження новітніх технологій ліквідації забруднення, що є актуальним з огляду на численні осередки нафтохімічного забруднення в Україні.

ВИСНОВКИ

Розглянуті методи ремедіації геологічного середовища, забрудненого НП, мають свої переваги та обмеження, їх застосування залежить

від гідрогеологічних умов забрудненої ділянки, властивостей забруднювача та його розповсюдження в підземному середовищі, а також від мети ремедіації. Для максимального видалення забруднення в більшості випадків потрібно використовувати послідовність процесів відновлення. Для територій, забруднених НП, доцільно провести ранжування з метою виділення першочергових об'єктів, що становлять найбільшу загрозу для довкілля, з метою невідкладного проведення ремедіаційних заходів та вибору ефективних технологій.

Виконано дослідження забруднення геологічного середовища НП на території військової частини (м. Київ). Здійснено еколого-геологічне обстеження забрудненої НП території військової частини. За даними моніторингу встановлено збільшення інтенсивності забруднення геологічного середовища НП, причиною якого можуть бути виливи НП та зниження РГВ, що призводить до вивільнення додаткової кількості НП. На основі

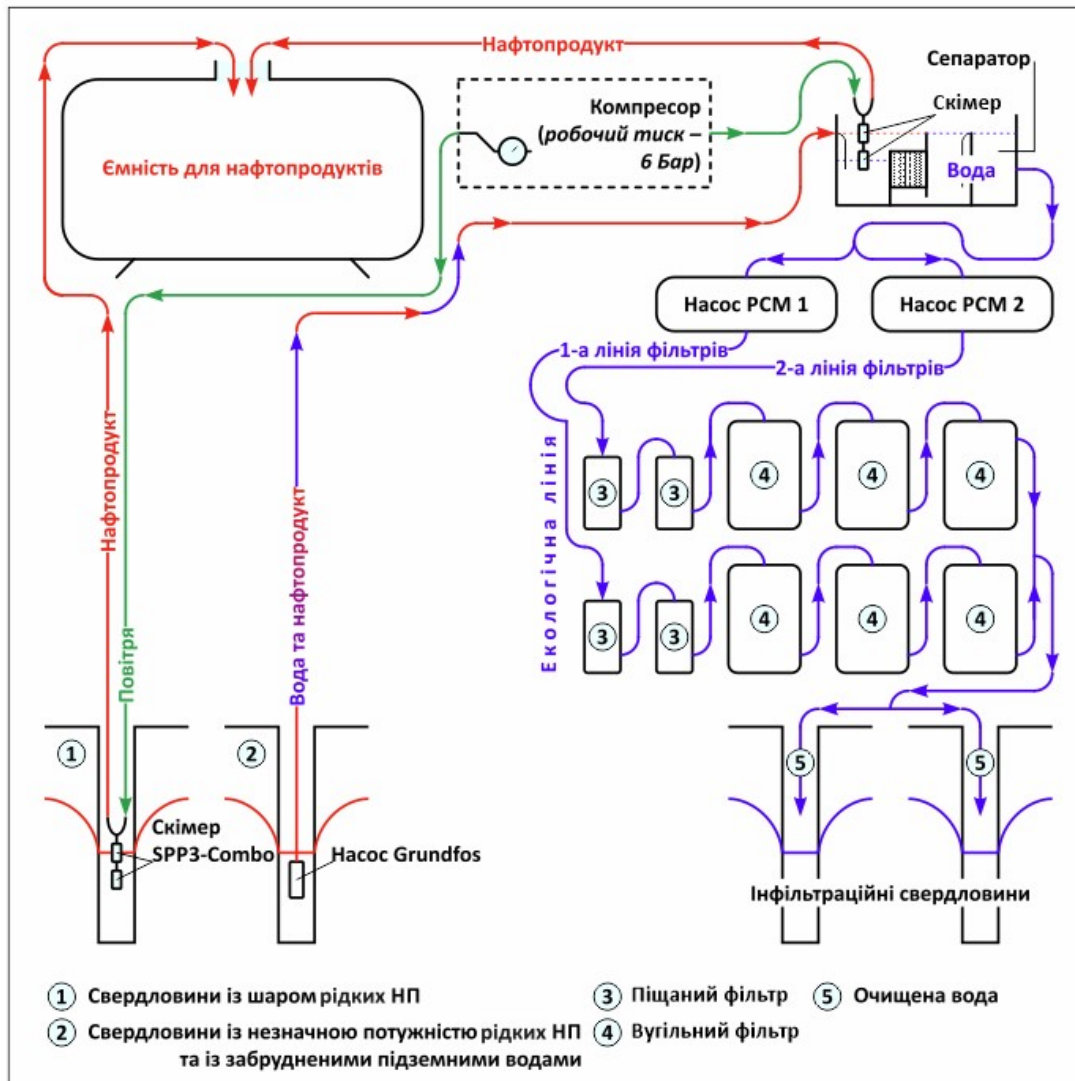


Рис. 4. Технологічна схема очищення вилучених підземних вод (Наукові..., 2020).

Fig. 4. The technological scheme of extracted groundwater treatment (Scientific..., 2020).

отриманої інформації передбачається створення концептуальної моделі забрудненої території, що необхідна для розробки науково обґрунтованої стратегії ремедіаційних заходів.

Обладнана сучасна високотехнологічна система очищення геологічного середовища від нафтохімічного забруднення унікальна для України. Система ремедіації дає можливість селективно вилучати із геологічного середовища рідкі НП і забруднені підземні води, забезпечує триступеневе очищення підземних вод. Проведена тестова

відкачка та аналіз проб підземних вод на різних стадіях очищення засвідчують ефективність застосування системи ремедіації. Ремедіаційна система може бути використана для проведення навчальних тренінгів та в якості науково-методичного полігону для апробації та впровадження новітніх технологій ліквідації забруднення.

В роботі висвітлені результати досліджень, профінансованих за бюджетною програмою «Підтримка розвитку пріоритетних напрямків наукових досліджень» (КПКВК 6541230).

REFERENCES

- Breus I. P., Neklyudov S. A., Huziahmetov R. H., Breus V. A., Hohlova L. I., Kartel N. T., 2008. Monitoring and restoration of soils contaminated with petroleum hydrocarbons (review). Part 2. Modern approaches and technologies for remediation of soils contaminated with petroleum and fuel hydrocarbons. Oil and gas technologies, No 1. Pp. 30–38. (In Russian).
- Vlasov E., 2015. How to clean soils from petroleum contamination. Enterprise ecology, No 10. Pp. 20–32. (In Ukrainian).
- Karpenko O. V., Vildanova-Martshishin R. I., Karpenko O. Ya., Chepiga T. I., Novikov V. P., 2012. Purification of soils contaminated with petroleum hydrocarbons using complex methods. State, problems and prospects of the oil and gas industry of Ukraine: International scientific-practical conference, September 7–9, 2012, Boryslav: collection of abstracts. Lviv: Lviv Polytechnic Publishing House. P. 83. (In Ukrainian).
- Scientific bases of elimination of subsurface contamination with light petroleum products, 2020. Research report, State Registration No 0115U005445. 224 p. (In Ukrainian).
- Rashman R., 2001. An approach to soil and groundwater remediation in the Czech Republic. 2nd conference of Geolink users and partners, May 29–31, 2001, Moscow. Pp. 31–35. (In Russian).
- Shevchik L. Z., Romanyuk O. I., 2017. Analysis of biological methods of recovery of oil-contaminated soils. Scientific Journal “Science Rise: Biological Science”, No 1(4). Pp. 31–39. (In Ukrainian)
- Bioremediation. Aerobic Bioremediation (Direct). Contaminated site clean-up information. 2021. [https://clu-in.org/techfocus/default.focus/sec/bioremediation/cat/Aerobic_Bioremediation_\(Direct\)/](https://clu-in.org/techfocus/default.focus/sec/bioremediation/cat/Aerobic_Bioremediation_(Direct)/)
- Community Guide to Monitored Natural Attenuation, 2021. <https://semspub.epa.gov/work/HQ/401611.pdf>
- Engineering evaluation and cost analysis for bioslurper initiative, 1997. Air Force Center for Environmental Excellence. 100 p.
- Manual: Guidelines for Water Reuse, 1992. U. S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C., EPA/625/R-92/004 (NTIS 93–222180).
- Milioni A., 2016. Remediation of Hydrocarbon Contaminated Soils. 19 p. <http://www.oil-gasportal.com/remediation-of-hydrocarbon-contaminated-soils>
- National Research Council. 1994. *Alternatives for Ground Water Cleanup*. Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/2311>.
- Newell C. J., Acree S. D., Ross R. R., Huling S. G., 1995. Light nonaqueous phase liquids. EPA Ground Water Issue. EPA 540-S-95–500. 28 p.
- Pivetz B. E., 2001. Phytoremediation of Contaminated Soil and Ground Water at Hazardous Waste Sites. EPA Ground Water Issue. EPA/540/S-01/500. 36 p.
- Бреус И. П., Неклюдов С. А., Хузиахметов Р. Х., Бреус В. А., Хохлова Л. И., Картель Н. Т. Мониторинг и восстановление почв, загрязненных нефтяными углеводородами (обзор). Часть 2. Современные подходы и технологии восстановления почв, загрязненных нефтяными и топливными углеводородами. Технологии нефти и газа, № 1, 2008. С. 30–38.
- Власов Е. Як очистити ґрунт від забруднення нафтою. Екологія підприємства, № 10, 2015. С. 20–32.
- Карпенко О. В., Вільданова-Марцишин Р. І, Карпенко О. Я., Чепига Т. І., Новіков В. П. Очищення ґрунтів, забруднених нафтовими вуглеводнями, із застосуванням комплексних методів. Стан, проблеми та перспективи нафтогазової промисловості України: міжнародна науково–практична конференція, 7–9 вересня 2012 року, Борислав: збірник тез доповідей. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2012. С. 83.
- Наукові основи ліквідації забруднення геологічного середовища легкими нафтопродуктами. Звіт про науково-дослідну роботу, № Держреєстрації 0115U005445, 2020. 224 с.
- Рашман Р. Подход к санации почвы и подземных вод в Чешской республике. II конференция пользователей и партнеров «Геолинка», 29–31 мая 2001 г., Москва. 2001. С. 31–35.
- Шевчик Л. З., Романюк О. І. Аналіз біологічних способів відновлення нафтозабруднених ґрунтів. Scientific Journal “Science Rise: Biological Science”, № 1(4), 2017. С. 31–39.
- Bioremediation. Aerobic Bioremediation (Direct). Contaminated site clean-up information. 2021. [https://clu-in.org/techfocus/default.focus/sec/bioremediation/cat/Aerobic_Bioremediation_\(Direct\)/](https://clu-in.org/techfocus/default.focus/sec/bioremediation/cat/Aerobic_Bioremediation_(Direct)/)
- Community Guide to Monitored Natural Attenuation, 2021. <https://semspub.epa.gov/work/HQ/401611.pdf>
- Engineering evaluation and cost analysis for bioslurper initiative. Air Force Center for Environmental Excellence, 1997. 100 p.
- Manual: Guidelines for Water Reuse. U. S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C., EPA/625/R-92/004 (NTIS 93–222180), 1992.
- Milioni A. Remediation of Hydrocarbon Contaminated Soils. 2016. 19 p. <http://www.oil-gasportal.com/remediation-of-hydrocarbon-contaminated-soils>
- National Research Council. *Alternatives for Ground Water Cleanup*. Washington, DC: The National Academies Press, 1994. <https://doi.org/10.17226/2311>.
- Newell C. J., Acree S. D., Ross R. R., Huling S. G. Light nonaqueous phase liquids. EPA Ground Water Issue. EPA 540-S-95–500, 1995. 28 p.
- Pivetz B. E. Phytoremediation of Contaminated Soil and Ground Water at Hazardous Waste Sites. EPA Ground Water Issue. EPA/540/S-01/500, 2001. 36 p.

Risk Assessment Guidance for Superfund: Volume I – Human Health Evaluation Manual (Part A), 1989. EPA/540/1–89/002. Office of Emergency and Remedial Response, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C. 291 p.

U.S.EPA, 2005. Cost and performance report for LNAPL characterization and remediation. EPA 542-R-05–016, Office of Solid Waste and Emergency Response (5102G). 47 p.

U.S.EPA, 2020. Superfund remedy report. 16th Edition. EPA 542-R-20–001, Office of Land and Emergency Management. 85 p.

Van Epps A., 2006. Phytoremediation of Petroleum Hydrocarbons. U.S. Environmental Protection Agency. 171 p.

Risk Assessment Guidance for Superfund: Volume I – Human Health Evaluation Manual (Part A). EPA/540/1–89/002. Office of Emergency and Remedial Response, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C., 1989. 291 p.

U.S.EPA. Cost and performance report for LNAPL characterization and remediation. EPA 542-R-05–016, Office of Solid Waste and Emergency Response (5102G), 2005. 47 p.

U.S.EPA. Superfund remedy report. 16th Edition. EPA 542-R-20–001, Office of Land and Emergency Management, 2020. 85 p.

Van Epps A. Phytoremediation of Petroleum Hydrocarbons. U.S. Environmental Protection Agency. 2006. 171 p.

Manuscript received October 18, 2021;
revision accepted December 7, 2021.

Інститут геологічних наук НАН України,
Київ, Україна

РЕМЕДИАЦИЯ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ, ЗАГРЯЗНЕННОЙ НЕФТЕПРОДУКТАМИ (ОБЗОР ТЕХНОЛОГИЙ И ПРИМЕР ИСПОЛЬЗОВАНИЯ)

Е. Н. Шпак, Р. Б. Гаврилюк, Ю. А. Негода, О. И. Логвиненко

Загрязнение геологической среды нефтепродуктами является экологической проблемой мирового масштаба и одним из важнейших направлений геоэкологической деятельности в Украине. По меньшей мере сотни очагов техногенного загрязнения нефтепродуктами требуют проведения ремедиационных мероприятий. Однако успешный опыт ремедиации масштабных очагов загрязнения отсутствует в Украине. Проанализированы современные методы ремедиации геологической среды, загрязненной нефтепродуктами (экскавация, извлечение мобильных нефтепродуктов дренами и скважинами, скимминг, извлечение испарений, биоventing, биосларпинг, продувка воздухом, откачка и обработка загрязненных подземных вод, биоремедиация, фиторемедиация), их преимущества и ограничения, возможности применения в зависимости от гидрогеологических условий загрязненного участка и цели восстановления. Рассмотрен пример применения ремедиационных технологий на загрязненной нефтепродуктами территории военной части (г. Киев). По данным геоэкологического обследования загрязненного участка выявлено увеличение интенсивности загрязнения, причинами которого могут быть разливы нефтепродуктов и снижение уровня грунтовых вод, что приводит к высвобождению дополнительного количества нефтепродуктов. Установлена и протестирована современная система ремедиации геологической среды от загрязнения нефтепродуктами, включающая комплекс насосного оборудования для извлечения нефтепродуктов, системы разделения жидкостей и очистки подземных вод.

Ключевые слова: геологическая среда, загрязнение, нефтепродукты, ремедиация.