

<https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2022.3.258602>
УДК 556.388:665.71

А.Л. БРИКС*, М.С. ОГНЯНИК

Інститут геологічних наук НАН України, Київ, Україна
E-mail: abricks2013@gmail.com

* Автор для кореспонденції

АСПЕКТИ ПОВОДЖЕННЯ ІЗ ЗАБРУДНЕНИМИ НАФТОПРОДУКТАМИ ДІЛЯНКАМИ ГЕОЛОГІЧНОГО СЕРЕДОВИЩА

В Україні неефективні методи нафтокористування протягом багатьох десятиліть залишили у спадок тисячі забруднених ділянок геологічного середовища. Локальне та регіональне накопичення вуглеводневих забруднювачів посилюється настільки, що це, змінюючи якість ґрунтово-рослинного шару, гірських порід, поверхневих та підземних вод, може загрожувати довкіллю в цілому та здоров'ю людини зокрема. Звичайні методи ремедіації, призначені для видалення розчинених у підземній воді забруднюючих речовин, виявляються недостатніми і навіть непридатними для досягнення прийнятого очищення геологічного середовища від втрачених нафтопродуктів. До теперішнього часу у світі розроблено багато спеціальних технологій і відповідного обладнання для очищення ґрунтів і підземних вод. Проте у цій статті йдеться не про ремедіаційні технології та обладнання, що використовуються. Не менш важливим видається визначення стратегії поводження із забрудненими нафтопродуктами ділянками геологічного середовища, тобто розробка довгострокового плану прийняття рішень для досягнення мети реабілітації осередків забруднення. Ця стратегія повинна спиратися на науково обґрунтоване розуміння фізико-хімічних властивостей нафтопродуктів, їх поведінки в геологічному середовищі, потенційних загроз, пов'язаних із поширенням забруднювачів, та доступних технічних рішень щодо їх видалення. Схему прийняття управлінських рішень, представлену у статті, можна розглядати як адаптацію до умов України.

У другій частині статті наводяться приклади подій, що відбувалися на деяких забруднених об'єктах України, де проводилися санаційні заходи. Навіть поверхнєве співставлення реальних результатів і типових вимог щодо очікуваних рівнів очищення довкілля дозволяє зробити висновок про існування недоліків в організації природовідновлювальних заходів.

Ключові слова: вуглеводневе забруднення; геологічне середовище; легкі нафтопродукти; поводження з осередками забруднення; заходи щодо відновлення (ремедіації) довкілля.

Цитування: Брикс А.Л., Огняник М.С. Аспекти поводження із забрудненими нафтопродуктами ділянками геологічного середовища. *Геологічний журнал*. 2022. № 3 (380). С. 18—33. <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2022.3.258602>

Citation: Bricks A.L., Ognianyk M.S. 2022. Aspects of management of sites of the geological environment contaminated with petroleum products. *Geologičnij žurnal*, 3 (380): 18-33. <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2022.3.258602>

© Видавець Інститут геологічних наук НАН України, 2022. Стаття опублікована за умовами відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

© Publisher Institute of Geological Sciences of the NAS of Ukraine, 2022. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

Вступ

У результаті аварійних розливів або систематичних витоків з надземних об'єктів нафтозабезпечення втрачені рідкі нафтопродукти — (НП-рідина) розтікаються поверхнею землі, частково випаровуються, а частково потрапляють у надра і стають специфічним забруднювачем геологічного середовища — ГС (Schwille, 1975; Mercer et al., 1990; Гольдберг и др., 2001; Adamski et al., 2005; Огняник и др., 2006 та ін.). Своєрідність цього забруднювача у тому, що: 1) НП є сумішшю вуглеводнів (ВВ), різний склад яких зумовлює різноманітність фізичних і хімічних властивостей суміші; 2) нафтові ВВ у ГС можуть перебувати у стані вільної рідини, випарів і розчину; 3) нафтопродуктова рідина, вода і повітря практично не змішуються і тому роздільно заповнюють поровий простір ґрунту, утворюючи в зоні аерації (ЗА) трифлюїдну систему «повітря—НП—вода», а в насиченій зоні — двофлюїдну систему «НП—вода», що впливає на рухливість флюїдів та їхню здатність до вилучення; 4) при контакті НП з водою незначна кількість вуглеводневих сполук переходить до водного розчину, але й цього може бути достатньо, щоб у водоносному горизонті утворився так званий «шлейф», де вміст забруднювача може перевищувати гранично допустиму концентрацію; 5) через низьку розчинність ВВ скупчення НП у ґрунті можуть бути вторинним джерелом забруднення ґрунтових вод упродовж багатьох десятиків або навіть сотень років; 6) вуглеводневі сполуки під впливом зовнішніх умов піддаються впливу процесів трансформації: розчиненню, випаровуванню, сорбуванню і (біо)деградації, що кінець-кінцем призводить до природного ослаблення (затухання) забруднення ГС (Carey et al., 2000; Johnson et al., 2006; CL: AIRE, 2014).

Актуальність. Забруднення ГС нафтопродуктами є однією з ключових екологічних проблем світового рівня. В Україні неефективні методи нафтокористування протягом багатьох десятиліть залишили у спадок тисячі забруднених ділянок ГС. Особливо негативно нафтопродуктове забруднення впливає на стан підземних вод — найбільш динамічного компоненту ГС та стратегічного важливого природного ресурсу. Всі дослідження, спрямовані на

вирішення проблеми локалізації та ліквідації осередків нафтопродуктового забруднення, є безперечно актуальними.

Постановка проблеми. Існує чимало ділянок, які в минулому вже зазнавали дію санаційних заходів і вважаються такими, що не становлять загрози. В дійсності, через недосконалість або навіть відсутність моніторингу довкілля і пов'язаний з цим брак об'єктивних даних про кількісний вміст НП, які залишилися в ГС, про стан перебування НП та їхню здатність пересуватися в поровому середовищі, про вплив природних факторів тощо будь-які «заспокоєні» оцінки екологічних ризиків не є переконливими. Більше того, відомі випадки поновлення міграційних процесів на начебто «очищених» ділянках і утворення загрозливих ситуацій через майже десяток років після гаданого вирішення проблеми захисту довкілля. Цього можна уникнути, якби в Україні була б запроваджена ефективна система поводження із нафтопродуктовим забрудненням ГС, подібно до тих систем, які використовують у світі. Крім цього, слід звернути увагу на низьку обізнаність вітчизняних фахівців екологічного спрямування щодо специфічної «поведінки» втрачених НП у ГС. Виправлення існуючих недоліків у постановці досліджень нафтопродуктового забруднення ГС і організації ремедіаційних заходів має вагоме практичне значення в сфері захисту довкілля і збереження природних ресурсів.

Мета роботи — огляд принципів науково обґрунтованого розуміння сутності поводження з нафтопродуктовим забрудненням ділянок ГС, виявлення недоліків у проведенні відновлювальних заходів в Україні на основі співставлення світових зразків і прикладів вирішення практичних задач в Україні.

Основна частина

З огляду на те, що серед багатьох гідрогеологів і фахівців еколого-гідрогеологічного спрямування існують труднощі розуміння концептуальних понять і спеціальних термінів, пов'язаних з темою захисту ГС від нафтопродуктового забруднення, перш ніж приступити до розгляду основного матеріалу видається за доцільне зупинитися на властивостях НП як специфічних забруднювачів та їх поведінки в

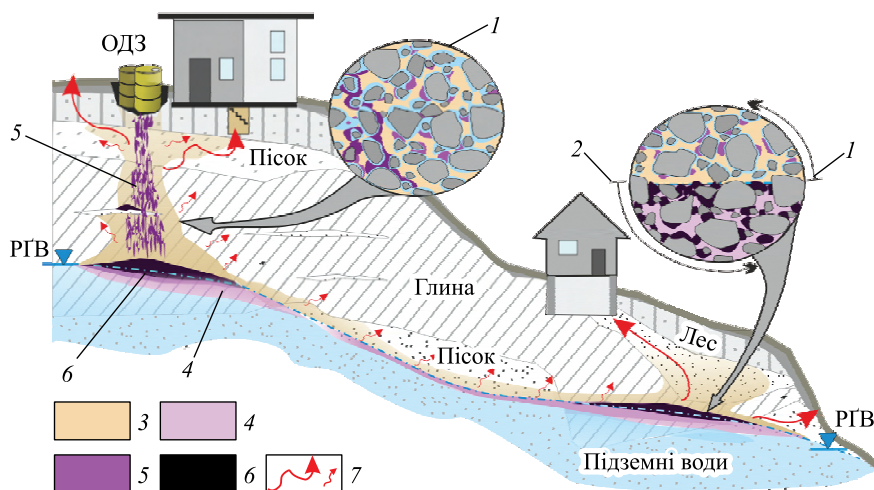


Рис. 1. Концептуальна схема розповсюдження втрачених ВВ у ГС (Брикс та ін., 2020): 1 — трифлюїдна система у ЗА; 2 — двофлюїдна система у зоні повного насичення; 3 — забруднена частина ЗА: випари ВВ, залишкові і гравітаційні НП; 4 — розчин ВВ у підземних водах; 5 — інфільтрація НП-рідини в ЗА; 6 — ЛНП у стані мобільної рідини; 7 — дифузія випарів ВВ

Fig. 1. Conceptual scheme of the distribution of lost hydrocarbons in the geological environment (Bricks et al., 2020): 1 — three-fluid system in the unsaturated zone; 2 — two-fluid system in the saturated zone; 3 — polluted site of the unsaturated zone: hydrocarbon vapors, residual and mobile LNAPLs; 4 — hydrocarbons solution in groundwater; 5 — infiltration of LNAPL in the unsaturated zone; 6 — mobile LNAPLs; 7 — hydrocarbon vapor diffusion

ГС. Без науково обґрунтованого розуміння поведінки НП у ГС неможливо провести достовірну оцінку осередку забруднення, а планування і реалізація заходів щодо відновлення забруднених ділянок не забезпечить позитивного результату.

Звертаючи увагу на хибні уявлення про розповсюдження легкого нафтопродуктового забруднення в ГС, які дотепер залишаються актуальними, насамперед слід вказати, що:

1. Легкі нафтопродукти (ЛНП) *не утворюють* в поровому середовищі окремих шар, який «плаває» на капілярній облямівці (англ.: *pancake model* (ITRC, 2005));

2. Легка нафтопродуктова рідина *не заповнює* все порове середовище, тобто *не існує* 100 % насичення забруднюючою рідиною, яку можна було б повністю вилучити гідравлічним способом (помпуванням); товщина шару ґрунту, насиченого ЛНП, як правило, відрізняється від висоти стовпчика ЛНП у свердловині;

3. Наявність стовпчика ЛНП у свердловині не є безсумнівним доказом рухливості легкої нафтопродуктової рідини у прилеглий до свердловини зоні; відсутність в свердловині легкої нафтопродуктової рідини, не підкріплена додатковими даними, не доводить відсутність вільної легкої нафтопродуктової рідини у відкладах біля свердловини.

Сучасну концепцію «поведінки» ЛНП у ГС у стислому форматі можна представити таким чином. Після надходження ЛНП у ґрунти ЗА

утворюється трифлюїдна система «повітря—ЛНП—вода» і під дією сили тяжіння відбувається вертикальна міграція легкої нафтопродуктової рідини крізь ненасичену зону ґрунтової товщі в напрямку до рівня ґрунтових вод (рис. 1).

Частина ЛНП, що захоплюється капілярними силами в порах ґрунту на шляху низхідного потоку, втрачає рухливість та перетворюється на переривчасті включення (Dracos, 1987; Mercer et al., 1990; Newell et al., 1995 та ін.), для позначення яких використовують поняття залишкової насиченості. Скупчення залишкових ЛНП часто розглядаються як вторинні джерела забруднення підземного повітря та ґрунтових вод і, в разі потреби, для ослаблення їхнього впливу застосовують спеціальні технології ремедіації. Якщо обсяг утраченого ЛНП перевищує загальну утримуючу ємність ґрунтів ЗА, низхідний потік ЛНП-рідини з часом досягає водонасиченої зони і, витискаючи воду з пор, утворює двофлюїдну систему «ЛНП—вода». Капілярна облямівка і верхня частина водоносного горизонту стають тією зоною, де ЛНП і ґрунтові води знаходяться у поровому середовищі при різних насиченостях. Цю зону спрощено називають «лінзою ЛНП». Насиченість легкої нафтопродуктової рідини в лінзі закономірно змінюється у залежності від положення щодо границі розділу повітря/ЛНП (рис. 2). Найбільші значення насиченості ЛНП, як правило, спостерігаються поблизу від гра-

Рис. 2. Теоретичний профіль зміни насиченості ЛНП у залежності від положення відносно рівня контакту повітря/ЛНП (модифікація схеми з (ITRC, 2005)): 1 — границя розділу ЛНП/повітря у свердловині; 2 — рівень границі розділу ЛНП/повітря у відкладах; 3 — рівень границі розділу ЛНП/вода у свердловині; 4 — рівень границі розділу ЛНП/вода у відкладах

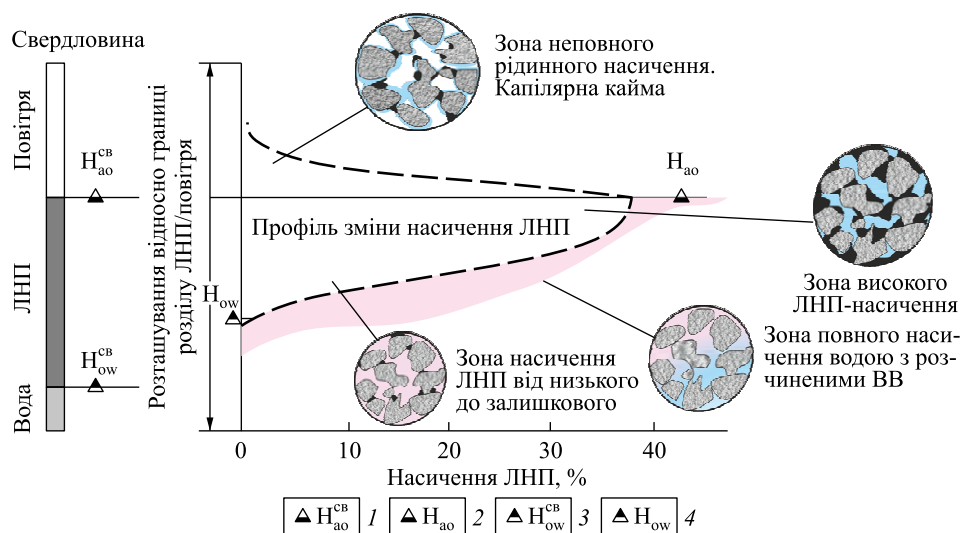


Fig. 2. Theoretical profile of changes in LNAPL saturation depending on the position of the air/ LNAPL contact level (modification of the scheme from (ITRC, 2005)): 1 — LNAPL/air interface in well; 2 — LNAPL/air interface in soil; 3 — LNAPL/water interface in well; 4 — LNAPL/water interface in soil

ниці повітря/ЛНП. Зазвичай максимальне насичення ЛНП у крупнозернистих пісках становить 10—56 %, а у дрібнозернистих — 5—10 % (ITRC, 2005).

У контексті теми, що розглядається, найважливішою обставиною видається залежність рухливості (мобільності) флюїду від флюїдного насичення. Рухливість — це саме та характеристика, яка визначає і загрозу поширення ЛНП, і можливість вилучення забруднювача з відкладів або *відновлюваність* забрудненої ділянки (англ.: *Recoverability*). Ця залежність теоретично обґрунтована (Leverett, Lewis, 1941; Snell, 1962; Holzer, 1976; Baehr, Corapcioglu, 1987; Lenhard, Parker, 1987; Farr et al., 1990) і підтверджена лабораторними тестами (Lenhard, Parker, 1988; Corey, 1994; Огняник и др., 2004, 2006; Парамонова и др., 2016). Проте відомо, що будь-яка теоретична модель розробляється на базі певних спрощуючих припущень (щодо однорідності структури пористого середовища, рівноважного розподілу флюїдів, стаціонарності граничних умов, нехтування гістерезисними ефектами тощо). Отже, підтвердити компетенцію теоретичних розробок перевіркою в польових умовах, тобто на природному об'єкті, не було б зайвим, але через технічні складнощі і високі фінансові витрати натурні експерименти якщо і проводяться, то переважно з практичних міркувань, тобто з метою тестування спроектованих ліквідаційних систем.

Мета дослідження забрудненої ділянки полягає в тому, щоб на основі зібраної інформації про літологічну будову і гідрогеологічні умови ділянки, об'єкти-джерела надходження НП у ГС, розташування осередків забруднення та їх структуру, розташування об'єктів-реципієнтів, що можуть мати потребу в захисті, оцінити існуючі і потенціальні загрози (ризик) та обґрунтувати прийняття рішень щодо поводження з виявленими осередками забруднення.

Стратегія управління осередками забруднення

Під управлінням (поводженням) забрудненими ЛНП ділянками (осередками) ГС розуміємо широкий комплекс заходів, призначених для мінімізації ризику завдання шкоди здоров'ю людини та нанесення збитків господарським, соціально-культурним і екологічно значущим природним об'єктам, пов'язаним із специфічним розповсюдженням втрачених ЛНП у ГС (Брикс та ін., 2020). У стислому виразі *управління* означає оцінку забруднення ґрунтів і підземних вод та їх відновлення, що здійснюється у відповідності до нормативно-правової бази. Для надання практичної допомоги в реалізації управління осередками ЛНП-забруднення широко використовуються інструктивні документи і пояснювальні матеріали (ITRC, 2009; ITRC, 2018; МРСА, 2021). Ці дані об'єднані стратегією, яка спирається на науково обґрунтоване розуміння фізико-хімічної сутності ЛНП, їх-

ної поведінки в ГС (Mercer et al., 1990; Гольдберг и др., 2001; Adamski et al., 2005; CL: AIRE, 2014), потенційних ризиків/загроз, пов'язаних із розповсюдженням забруднювачів (ASTM, 2010; Texas..., 2013), і доступних технологічних рішень щодо їх вилучення (ITRC, 2009; CL: AIRE, 2014; Technical..., 2015).

Стратегія управління осередками забруднення заснована на концептуальних твердженнях:

1. Вірогідність існування осередку нафтопродуктового забруднення визнається, якщо відомий факт (аварійного) скиду ЛНП, або встановлені прояви забруднення довкілля («шлейфи» випарів і водних розчинів ВВ), або виявлена ЛНП-рідина в місцях природного чи штучного дренажу ґрунтових вод.

2. Рішення щодо проектування та тестування ремедіаційних заходів зазвичай приймаються після оцінки ризиків (загроз) забруднення, яка має спиратися на результати наукових досліджень об'єктів-джерел забруднення (ОДЗ), шляхів міграції та об'єктів-приймачів (реципієнтів), що зазнають негативного впливу забруднення.

3. Осередок ЛНП-забруднення має складну будову. Складові осередку (Гольдберг и др., 2001; CL: AIRE, 2014; Брикс, Гаврилюк, 2015) відрізняються вмістом і фізичним станом НП, здатністю до просторових і речовинних трансформацій. Отже, кожному складову осередку слід оцінювати окремо щодо загроз, які вона становить, і можливості відновлення ділянки ГС шляхом вилучення, локалізації, деградації забруднювача.

4. З огляду на різноманітність умов, що характеризують забруднену ділянку, план управління забрудненням, крім стандартних дій, має припускати доцільність рішень, адаптованих до потреб конкретної ділянки. В разі визнання недостатньої ефективності застосованих ремедіаційних заходів цілком припустимий і навіть бажаний своєчасний перегляд плану дій.

5. Після закінчення етапу застосування активних методів відновлення ГС часто використовують метод контрольованого природного затухання - КПЗ (англ.: *Monitored natural attenuation* — MNA) (Брикс та ін., 2020; CL: AIRE, 2014), який спирається на природні процеси руйнування або перетворення забруднюючих речовин у менш небезпечні форми. Та-

кий підхід збільшує рівень очищення ГС та знижує ризики, пов'язані з можливістю погіршення екологічної ситуації при зміні природних чи техногенних умов ділянки.

Загальна схема поводження з осередками забруднення ГС

Представлена на рис. 3 схема демонструє алгоритм прийняття рішень щодо послідовності дій, передбачених типовим планом управління забрудненими ділянками. Доцільно зупинитися на тих її елементах, які можна вважати найбільш наукоємними.

Всю схему можна умовно поділити на три блоки.

Перший блок об'єднує дії, спрямовані на оцінку впливу на довкілля (ОВД) будь-якого виду господарської діяльності, а в контексті теми — будь-якого об'єкта нафтопродуктового забезпечення. Згідно із Законом України «Про оцінку впливу на довкілля» ОВД це процедура, що передбачає підготовку суб'єктом господарювання науково обґрунтованого звіту, проведення його громадського обговорення та надання вповноваженим органом мотивованого висновку з оцінки впливу на довкілля. Такий висновок є дозвоільним документом, необхідним для планової діяльності, яка включає будівництво, реконструкцію або ліквідацію об'єктів та інші дії, що є втручанням у природне середовище.

Другий блок. За даними оцінки впливу на довкілля і визначення можливих екологічних небезпек має бути надана інформація (див. рис. 2 → ТЕО) про заплановані витрати та очікувані результати Проекту в частині відновлення забрудненої ділянки, тобто доведена практична доцільність його виконання, або обґрунтований висновок про можливість впровадження альтернативного підходу — контрольованого природного самоочищення (англ.: *Monitored Natural Attenuation*) (Carey et al., 2000; Rivett, Thornton, 2008; CL: AIRE, 2014). У процесі реалізації другого блоку здійснюється проектування і пілотне тестування заходів з метою вибору технологій ремедіації. При цьому у світі, принаймні там, де розпорядники спеціальних екологічних фондів достатньо прискіпливо ставляться до ефективності їхнього використання, широко застосовується принцип аналізу витрат і переваг (англ.: *Cost-*

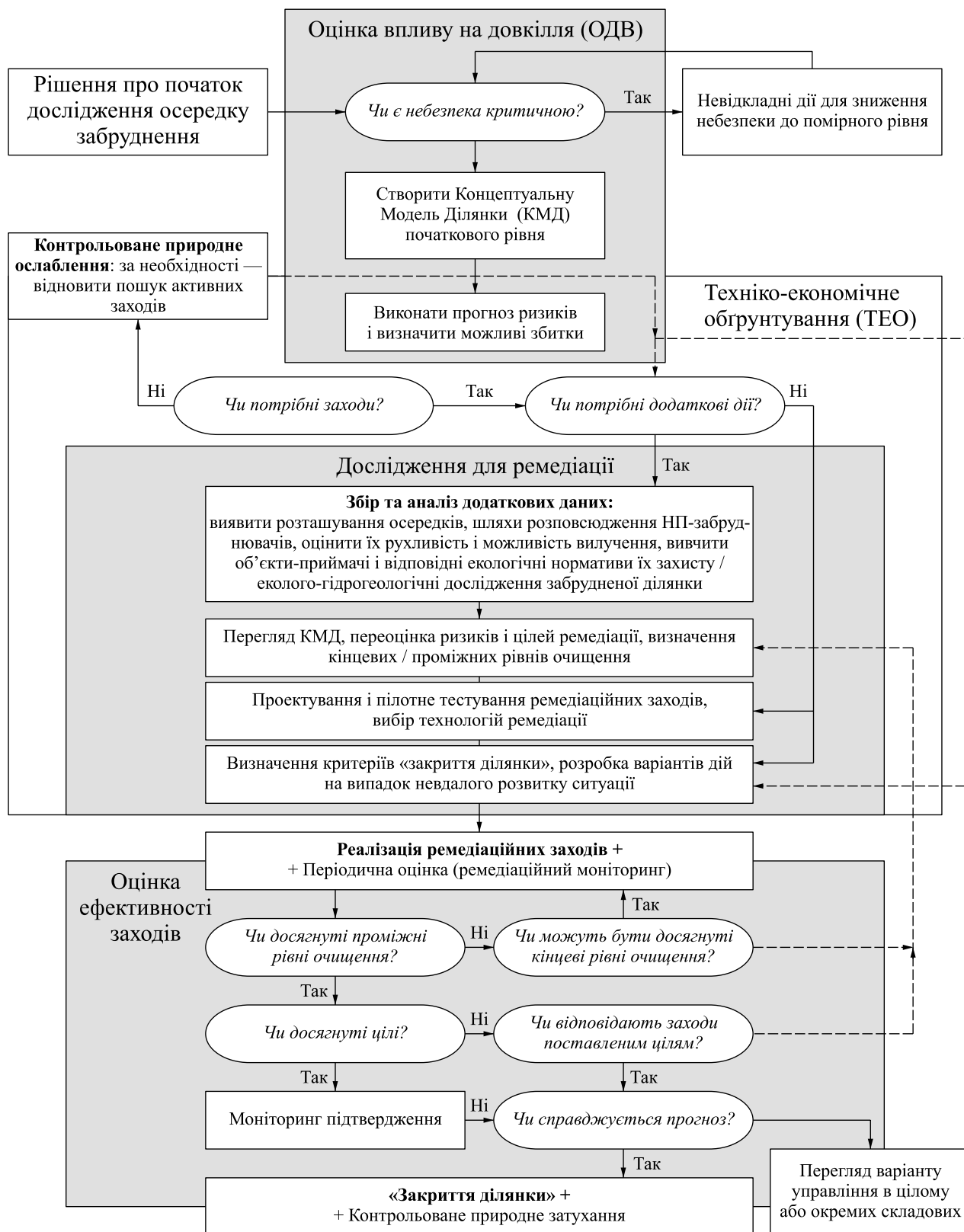


Рис. 3. Блок-схема прийняття рішень щодо поводження із ЛНП-забрудненням ГС (модифікація схеми з (U.S. EPA, 2005))

Fig. 3. Flow chart of decision-making on the management of LNAPL pollution of the geological environment (modification of the scheme from (U.S. EPA, 2005))

benefit analysis). На жаль, в Україні цей принцип поки що не актуальний.

В разі позитивного висновку про доцільність активних ремедіаційних заходів схема вказує на перехід до її другої найбільш наукомісткої частини — *досліджень для ремедіації*, яка передбачає уточнення або деталізацію осередків нафтопродуктового забруднення, загальну або окрему по кожному фрагменту осередка оцінку обсягу нафтопродуктового забруднювача, його рухливості, відновлюваності, шляхів розповсюдження тощо. Ці дані повинні забезпечити уточнення *концептуальної моделі ділянки* (КМД), а з її допомогою — переоцінку ризиків, уточнення кінцевої і проміжних цілей ремедіації, проектування ремедіаційних заходів тощо.

Третій блок схеми — це в основному *реалізація ремедіаційних заходів*. Наукові аспекти в цій частині проявляються в обґрунтуванні ремедіаційного моніторингу для оцінки ефективності заходів, а також обґрунтуванні заключного висновку про *закриття ділянки*.

Опис окремих блоків схеми прийняття рішень

Будь-який план заходів повинен мати початок, обумовлений певними вимогами чи обставинами, і завершення («закриття ділянки»), яке впливає з висновку про досягнення поставлених цілей.

Розташований у лівій верхній частині схеми прямокутник з написом «рішення про початок...» не завжди означає реальний початок дослідження забрудненої ділянки ГС, але це дійсно перший крок у зазначеному напрямку. Факт нафтопродуктового забруднення довкілля повинен бути підставою для подання органами екологічного контролю відповідальній стороні (суб'єкту володіння чи господарювання) відповідного припису щодо збору вихідної інформації, необхідної для оцінки впливу на довкілля. Цієї інформації має бути цілком достатньо для вирішення основного питання: чи є ситуація, яка склалася, критичною, тобто такою, що вимагає *невідкладних дій* (див. рис. 3).

Невідкладні дії в загальному випадку передбачають:

1. Визначення джерела забруднення (об'єкт, місце, обсяг та час скиду, характер скиду: систематичні витoki або аварійні розливи);

2. Визначення потенційних реципієнтів — природних або господарських об'єктів, які потребують невідкладного захисту від забруднення;

3. Зупинка триваючого витoku з ОДЗ;

4. Вилучення доступної маси забруднювача із ГС для недопущення або, принаймні, уповільнення подальшого розповсюдження забруднювача.

Відновлення забрудненої ділянки ГС може тривати роками. Визначення часових рамок реалізації ремедіаційних заходів залежить від прийнятих короткострокових, проміжних, довгострокових (кінцевих) цілей, які повинні бути зрозумілими, практичними і максимально конкретними. При визначенні цілей на будь-якому проміжному етапі слід враховувати кінцеву мету і передбачити можливість їх корегування у зв'язку із зміною обставин.

Якщо метою коригуючих дій є захист об'єктів-реципієнтів, питання про продовження чи закінчення активних відновлювальних дій вирішується через оцінку достатнього зменшення загроз після вилучення ЛНП у *максимально можливій мірі* («*maximum extent practicable*» — принцип дії, сформульований у Code of Federal Regulations (ITRC, 2009)). Непрямими ознаками достатнього зменшення загроз зазвичай вважають стабілізацію осередку ЛНП, постійне зменшення товщини шару ЛНП і концентрації розчинених ВВ за даними моніторингових свердловин, а також у місцях дренавання забруднених ґрунтових вод. Переконливим аргументом на користь висновку про закриття ділянки може бути асимптотичний характер графіку вилучення ЛНП. Якщо загрози конкретним об'єктам-реципієнтам несуттєві, а приводом для ремедіації є лише наявність в ГС ЛНП-рідини, рішення про продовження чи закінчення активних дій може бути прийняте з прагматичних міркувань, тобто з метою часткової компенсації витрат на екологічно-гідрогеологічні вишукування шляхом утилізації видобутого продукту.

Все наведене вище можна вважати стислим відтворенням положень існуючих настанов. Реальні події на забруднених ділянках (принаймні в Україні) в багатьох випадках не відповідають інструктивним вказівкам і методичним рекомендаціям (у всякому рази ми не володіємо інформацією про жодну забруднену ділянку на території України, успішно віднов-

лену в повній відповідності до вимог зобов'язуючих документів). В таблиці наведена інформація, відома авторам у зв'язку з їхньою причетністю до згаданих заходів.

У більшості наведених прикладів від перших ознак забруднення до реального початку досліджень, а тим більше активних ремедіаційних заходів проходить кілька років. Дієвим фактором активізації заходів може бути заострення екологічної ситуації.

Наприклад, історія забруднення урочища Сухий Яр (м. Умань) починається у 80-ті роки минулого століття, проте лише у 1988 р., коли в місцях природного дренажу ґрунтових вод на схилі яру почалося витікання авіаційного гасу (рис. 4), ситуацію під свій контроль взяла Уманська санітарно-епідеміологічна станція (Гаврилюк, Загородній, 2011).

У верхів'ї урочища силами військової частини була збудована перехоплююча ЛПН-рідину траншея. Роботи проводились в 1988—1989 рр., тобто поки спостерігався витік гасу. Після припинення витоку гасу на схилі яру місцеве населення відновило використання води зі струмка для господарських потреб. Скарг на якість води до осені 2007 р. не надходило. Тож всупереч рекомендованій схемою (див. рис. 2) діям, незважаючи на повну відсутність характеристики осередку забруднення, було зроблено заспокійливий висновок про його «природне виснаження».

Восени 2007 р. у верхів'ї урочища знову з'явилися «джерела» авіаційного гасу і в результаті відбулося забруднення поверхневих вод. В Осташівському ставку, куди впадає струмок, вимерли риби та жаби. Біля урочища відчувався специфічний вуглеводневий запах. Гасом просякли ґрунти, опале листя та гілля вздовж русла струмка. Місцеве населення почало скаржитись на якість води у колодязях, що знаходяться неподалік від урочища. У лютому 2008 р. факт повторного забруднення урочища Сухий Яр і виникнення загрозливої екологічної ситуації було підтверджено обстеженнями Уманської санітарно-епідеміологічної станції та Державної екологічної інспекції в Черкаській області. Це стало обґрунтуванням для проведення еколого-гідрогеологічних вишукувань у рамках Державної програми розвитку Збройних Сил України на 2006—2011 рр. та Програми реабілітації територій, забрудне-

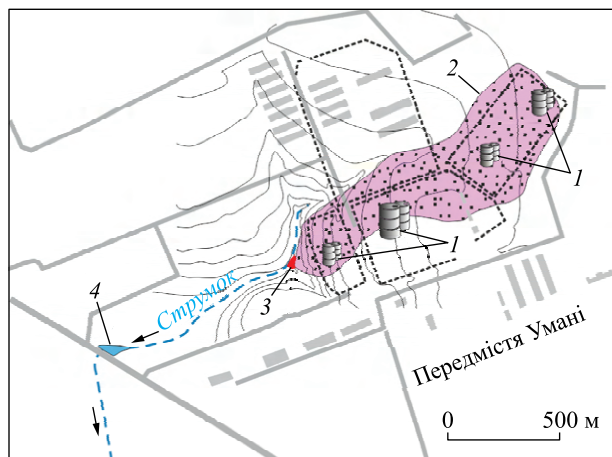


Рис. 4. Оглядова схема забрудненої ділянки біля м. Умань: 1 — об'єкти-джерела забруднення; 2 — горизонтальна проекція ділянки ГС, забрудненої ЛНП; 3 — місце дренажування ЛНП-рідини у верхів'ї Сухого Яру; 4 — ставок — об'єкт-реципієнт

Fig. 4. Overview scheme of the contaminated site near the city of Uman: 1 — objects-sources of pollution; 2 — horizontal projection of a section of the geological environment contaminated with light petroleum products; 3 — drainage place of LNAPL in the upper of Sukhoi Yar; 4 — pond — object-recipient

них унаслідок військової діяльності, на 2002—2015 рр. Замовником робіт була військова частина, виконавцями — Інститут геологічних наук (ІГН) НАН України і ПП «Валдай Плюс» (м. Вінниця). Мета робіт — оцінка впливу на довкілля і розробка робочого проекту локалізації та ліквідації нафтохімічного забруднення на території, прилеглої до складів пально-мастильних матеріалів (ПММ). Слід зауважити, що у технічному завданні передбачалося проектування горизонтального дренажу довжиною 12 м, мережі експлуатаційних свердловин і системи очисних споруд, вказана кількість і глибина моніторингових свердловин тощо. Проте навіть не згадується про необхідність визначення кінцевих і проміжних рівнів очищення ГС і критеріїв *закриття ділянки*, а також *моніторингу* (процесів) *природного затухання* (ослаблення) нафтопродуктового забруднення (див. рис. 3).

Подальший перебіг подій можна вважати типовим. Після здачі/прийняття результатів передпроектних досліджень і розробленого на їх основі Проекту ліквідації нафтохімічного забруднення території розпочався етап реалізації ремедіаційних заходів, звісно, без додат-

Приклади поводження із НП-забрудненням в Україні
Examples of management of NAPL-pollution in Ukraine

Коли і при яких обставинах виявлене НП-забруднення	Дійсні або можливі реципієнти
Склад ПММ військового аеродрому (м. Луцьк)	
1983 р. звернення мешканців до санепідемстанції щодо погіршення якості води в побутових колодязях	1) ґрунтові води та побутові колодязі; 2) р. Стир (<i>можливо ?</i>)
Склади ПММ військового аеродрому (м. Полтава)	
В кінці 1980-х рр. скарги населення щодо забруднення струмків і ставків	1) ґрунтові води; 2) поверхневі води: струмки, ставки
Склад ПММ ДП «Міжнародний аеропорт «Бориспіль»	
1998—1999 рр. при буріння свердловин для реконструкції складу виявлено шар вільного ЛНП	1) ґрунтові води за межами майданчика; 2) поверхневі води (<i>можливо ?</i>)
Білоцерківський авіаремонтний завод (БАРЗ)	
В 1990 р. витікання ЛНП за межами заводу в урочищі «Потерчата» (Державний дендропарк НАН України «Олександрія»)	1) каскад штучних ставків на території дендропарку; 2) р. Рось
Склади ПММ військового аеродрому (м. Умань)	
Перші ознаки забруднення на початку 1980-х рр. У 2007 р. відновлення дренажу ЛНП в урочищі Сухий Яр	1) струмок в яру за межами майданчика, ставки; 2) побутові колодязі
Склади ПММ військового аеродрому (м. Миколаїв)	
Жодних ознак забруднення до 2003 р. Лінза ЛНП виявлена в результаті ЕГТВ за програмою ліквідації САК	Поширення НП-забруднення за межі аеродрому не виявлено; можливе перетікання у нижній горизонт
Склади ПММ в/ч (м. Київ)	
У 1999—2001 рр. у результаті пошуково-розвідувальних робіт виявлено осередки ЛНП-забруднення	Можливе поширення ЛНП-забруднення за межі в/ч

Застосовані у таблиці скорочення: ІГН — Інститут геологічних наук НАН України (м. Київ); «ВВП» — Інститут режна геологорозвідувальна експедиція (с. Фурси Київської області); «В+» — ПП «НВФ Валдай Плюс» (м. Вінниця); (м. Київ); «КС» — данська фірма «Krüger Consult»; BRGM — Геологічна служба Франції; «SI» — французька ком авіакомплекс; ЕГТВ — еколого-гідрогеологічні вишукування; РП — робочий проект; СФ — на умовах самофі через «вичерпання запасів» ЛНП (нерентабельність видобування); РГВ — рівень ґрунтових вод.

Коли і ким виконані дослідження і ліквідаційні заходи	Досягнуті результати
Склад ПММ військового аеродрому (м. Луцьк)	
1991—1992 рр.: ЕГТВ →3 «РГЕ» 1994—1995 рр.: ЕГТВ →4 «ВВП» 1996—1997 рр.: РП ліквідаційних заходів → «КС» // Ⓔ ⁰ 2000—2002 рр.: Проект системи моніторингу → ІГН, «ВВП», «В+» // Ⓔ ⁰	Ліквідаційні заходи не проводилися Сучасний стан невідомий
Склади ПММ військового аеродрому (м. Полтава)	
1998—2001 рр.: ЕГТВ, РП → «ЗК» 2001 р.: Ліквідаційні заходи в тестовому режимі з використанням вакуумної установки «Terra Vac» → «ЗК» // Ⓔ ⁰ 2003—2005 рр.: ЕГТВ за програмою ліквідації САК → ІГН	Сучасний стан невідомий
Склад ПММ ДП «Міжнародний аеропорт «Бориспіль»	
1999—2000 рр.: РП та спорудження системи ліквідації ЛНП-забруднення: → «ІНГ» 2000—2018 рр.: Ліквідаційні заходи з метою утримання плями в межах майданчика складу → «ІНГ» // Ⓔ ⁰ 2011—2018 рр.: моніторинг → ІГН	У 2018 р. виявлено просування фронту забруднення за межі майданчика Сучасний стан невідомий
Білоцерківський авіаремонтний завод (БАРЗ)	
1999—2001 рр.: ЕГТВ на території БАРЗ і дендропарку → ПБЕ 2007—2008 рр.: ЕГТВ, РП ліквідаційних заходів: → ІГН, «ЗК», «ЕГГ», «ІНГ» Ліквідаційні заходи СФ → «ЗК» // Ⓔ У наш час пасивне збирання ЛНП-рідини у занедбаних свердловинах	Продовжується забруднення ставків на території дендропарку
Склади ПММ військового аеродрому (м. Умань)	
У 1988 р. невідкладні дії силами в/ч ЕГТВ: 2008—2009 рр. РП ліквідаційних заходів → ІГН, «В+» Ліквідаційні заходи СФ → «В+» // Ⓔ	Відкачка припинена через «нерентабельність» видобування ЛНП Сучасний стан невідомий
Склади ПММ військового аеродрому (м. Миколаїв)	
2001—2002 рр. ЕГТВ за програмою ліквідації САК 2002—2005 рр. моніторинг → ІГН 2004—2005 рр. передпроектні дослідження РП → ІГН Ліквідаційні роботи СФ 2004—2007 рр. → «В+» // Ⓔ ⁰ , 2008 р. → СМУ-24 // Ⓔ	Відкачка припинена у 2008 р. через «нерентабельність» видобування ЛНП Сучасний стан невідомий
Склади ПММ в/ч (м. Київ)	
ЕГТВ, РП спорудження системи ліквідації: 2001—2004 рр. → «ІНГ» // Ⓔ ⁰ ЕГТВ: 2008 р. → «ЕГГ» Проект G4585: встановлення та апробація системи очищення: 2013—2017 р. → ІГН, МО України, BRGM, «SI»	Після облаштування системи ремедіації у 2017 р. дослідження призупинено // Ⓔ ⁰

«ВолиньВодПроект» (м. Луцьк); «РГЕ» — Рівненська геологорозвідувальна експедиція (м. Рівне); ПБЕ — Правобережжя «ЗК» — ЗАТ «Земельна компанія» (м. Київ); «ЕГГ» — ТОВ «ЕкоГідроГео» (м. Київ); «ІНГ» — ТОВ «НВЦ Інгеоком» панія «Silex International»; ПММ — паливно-мастильні матеріали: в/ч — військова частина; САК — стратегічні нафтопродукти; // Ⓔ⁰ — припинення заходів через відсутність бюджетного фінансування; // Ⓔ — припинення заходів

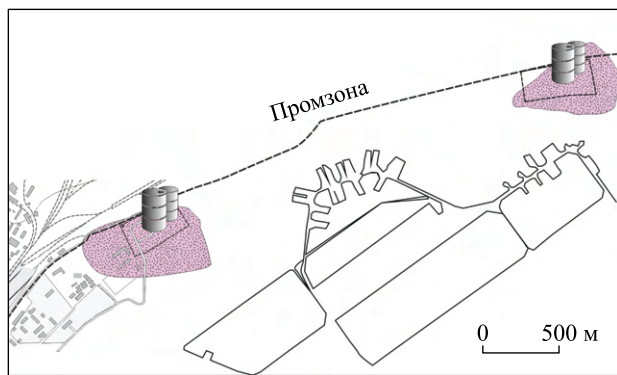


Рис. 5. Оглядова схема забрудненої ділянки біля м. Миколаїв

Fig. 5. Overview scheme of the contaminated site near the city of Mykolaiv

кового (державного) фінансування, тобто «за рахунок суб'єктів підприємницької діяльності» (Розпорядження..., 1994). Саме через це «підприємці», як правило, не вважають себе зобов'язаними ретельно узгоджувати свої технологічні та організаційні рішення з контролюючими органами і консультуючими організаціями, а «контролери», в свою чергу, дещо формально ставляться до звітів про виконані роботи. Тож, на об'єкті, що розглядається, протягом року, застосовуючи активне помпування легкої нафтопродуктової рідини експлуатаційними свердловинами і пасивне збирання забруднюючої рідини дренажною траншеєю, ПП «Валдай Плюс» виконувало поставлену задачу. Через відсутність моніторингу неможливо визначити досягнутий рівень очищення ГС, так само неможливо з'ясувати причину різкого зниження ефективності вилучення ЛНП, яке неочікувано перервало ремедіаційні дії. Можна сподіватися, що причиною цього стало виснаження запасів рідкої фази, але не слід виключати вищезгаданий вплив мінливості гідрогеологічних умов. Так чи інакше, «закриття ділянки», тобто завершення ремедіаційних заходів відбулося не внаслідок досягнення зазначеної мети, а через застосування технологій, які стали нерентабельними у підприємницькому сенсі. Сучасна ситуація на цьому об'єкті не відома.

Схожий перебіг подій спостерігається на інших об'єктах. Так, за даними додаткового обстеження території колишнього військового аеродрому в м. Прилуки в грудні 2010 р. з'ясовано, що, незважаючи на проведені ремедіа-

ційні заходи, суттєвого покращення еколого-гідрогеологічного стану не відбулося. Існує ймовірність надходження розчинених ВВ до ґрунтового водоносного горизонту та підвищується ризик забруднення експлуатаційних водоносних горизонтів. Скоріш за все, цей негативний результат обумовлений спрямуванням робіт виключно на вилучення мобільних ЛНП у найкоротший термін без урахування впливу гідрогеологічних умов ділянки, що постійно змінюються.

Звичайно, можливі деякі відмінності. На ділянці військового аеродрому біля м. Полтава при виконанні передпроектних вишукувань суттєві скупчення ЛНП-рідини, реалізація яких могла б компенсувати витрати на ремедіацію, не були виявлені. Для очищення забруднених ґрунтів, що вважаються «вторинним джерелом забруднення» ґрунтових вод, ЗАТ «Земельна компанія» розробила робочий проект, який передбачав використання спеціального обладнання, призначеного для посиленого промивання забруднених ґрунтів *in situ*, але через відмову у державному фінансуванні була змушена припинити роботи і законсервувати спеціально придбану за власний кошт імпортовану установку.

Як правило, еколого-гідрогеологічні вишукування територій розпочинають, коли їх забрудненість видається очевидною, а потенційні ризики цілком реальними. Аеродром біля м. Миколаїв можна вважати винятком з правил (рис. 5).

Пошукові дослідження тут були проведені не через виявлені ознаки НП-забруднення і не через скарги населення, як це відбувалося в інших місцях, а в рамках запланованого еколого-гідрогеологічного обстеження чергового об'єкта за Програмою ліквідації стратегічних авіакомплексів в Україні. На базі пошукових свердловин була створена мережа пунктів спостереження за рівнями ґрунтових вод і ЛНП. Оскільки безпосередніх загроз довкіллю виявлені осередки забруднення не становили та у здійсненні невідкладних заходів не було потреби, з'явилася досить рідкісна можливість виконати тривалі моніторингові дослідження в квазіприродних умовах. Результати цих досліджень представлені у працях (Брикс, 2010; Брикс, Гаврилюк, 2011; Огняник и др., 2013).

У 2004—2005 рр. на ділянках розташування лінз мобільних ЛНП у районі складів ПММ були проведені передпроектні вишукування та дослідно-ліквідаційні роботи. За їх результатами ЗАТ «Гідроєкофактор» разом з ІГН НАН України і ЦПІ МО України розробив робочий проект «Приведення території складів ПММ-1 і ПММ-2 аеродрому до екологічно безпечного стану», який пройшов державну екологічну експертизу.

Переможцем тендеру на реалізацію зазначеного проекту було визнано ПрАТ «СМУ-24», непрофільну організацію, яка через відсутність досвіду виконання природовідновлювальних робіт і до того ж не обтяжена необхідністю узгоджувати свої дії з розробниками робочого проекту, обмежилася звичайним помпупанням ЛНП-рідини зі свердловин, ігноруючи інші передбачені проектом заходи. За короткий час запаси легкодоступної ЛНП-рідини вичерпалися і на цьому активна частина ремедіаційних заходів завершилася. Через відсутність постпроектного моніторингу осередків забруднення визначити досягнутий рівень очищення ГС неможливо. Сучасний еколого-гідрогеологічний стан цієї ділянки, так само як і багатьох інших начебто «відновлених» ділянок ГС, не відомий.

Висновки

Нафтові ВВ, які повсюдно втрачаються при їхній переробці, транспортуванні та зберіганні, потрапляють в надра і стають *специфічними* забруднювачами ГС. Ця специфічність, обумовлена суттєвим розходженням фізичних і хімічних властивостей НП і води, проявляється в тому, що, по-перше, рух НП-забруднювача у поровому середовищі відбувається у системі взаємодіючих флюїдів, що не змішуються; по-друге, «поведінка» НП-забруднювача у поровому середовищі ускладнюється фазовими перетвореннями та впливом зовнішніх умов, що змінюються. Зрозуміло, що концептуальні моделі забруднених ділянок ГС, які описують процеси перенесення нафтових ВВ від ОДЗ крізь ґрунтову матрицю до об'єктів-приймачів, що потребують захисту, набагато складніше звичайних (традиційних) схем забруднення підземної гідросфери. Звідси впливає необхідність застосування спеціальних підходів до

вибору і реалізації дослідницьких та коригуючих заходів.

Вірне розуміння просторово-часової «поведінки» ЛНП у ГС базується на теоретичних розробках середини минулого століття у сфері інтересів нафтовидобування та їхньої адаптації до вирішення екологічних проблем переважно у 1970—1990-х роках, коли спостерігалося посилення проявів забруднення ГС втраченими НП. Практичний досвід, накопичений у світі при реалізації природовідновлювальних проектів, знайшов відображення у численних методичних посібниках та інших довідкових та інструктивних документах.

Враховуючи надзвичайну різноманітність природних та антропогенних умов, за яких у ГС утворюються і трансформуються скупчення втрачених НП, слід вважати, що створення універсальної, призначеної для обов'язкової реалізації схеми поводження із ЛНП-забрудненням неможливе. Проте принципові елементи такої схеми мають бути основою проекту відновлення будь-якої забрудненої ділянки ГС.

Не тільки безпосередні виконавці, але й усі сторони, залучені до виконання проекту, повинні розуміти, що проблема відновлення ГС, як правило, не вирішується проведенням обмеженого обсягу невідкладних заходів або вилученням найбільш рухливої частини ЛНП-рідини. В більшості випадків очищення забруднених ділянок до рівня повної відсутності загроз довіллю потребує тривалого часу. І весь цей час — від початку збирання вихідної інформації до «закриття ділянки» — триває актуалізація концептуальної моделі ділянки. Розробка та удосконалення концептуальної моделі ділянки — це ітераційний процес, який на основі нових даних постійно змінює уявлення про об'єкт дослідження. Важливо розуміти, що нова інформація може як уточнити попередню версію, так й змусити переоцінити результати вже виконаної роботи. Звідси впливає висновок не тільки про важливу роль державного та інституційного контролю за досягненням кінцевої мети проекту, але й про необхідність посилення науково забезпеченого контролю виконання проміжних цілей. Ці проміжні цілі повинні мати індикатори їх досягнення, щоб їх можна було легко виміряти та оперативно ввести відповідні зміни у подальші коригуючі дії.

Дослідження виконано в рамках теми «Геологічні дослідження для пом'якшення та адаптації до зміни клімату в Україні» (2022—2023, ДР № 0122U002540) за цільовою програмою «Підтримка пріоритетних для держави наукових досліджень і науково-технічних (експериментальних) розробок Відділення наук про Землю НАН України на 2022—2023 рр.».

Автори щиро вдячні співробітникам відділу охорони підземних вод ІГН НАН України за надані результати польових робіт, а також керівникам ТОВ «ЕкоГідроГео» І.В. Кір'якову та «ВЦ Інгеоком» Г.В. Максимову за цінну інформацію. Окрему вдячність висловлюємо анонімому рецензенту, чиї зауваження і поради допомогли суттєво покращити якість тексту статті.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Брикс А.Л. Особенности исследования геологической среды юга Украины, загрязненной легкими нефтепродуктами. *Геол. журн.* 2010. № 4 (333). С. 105—110. <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/57676>
- Брикс А.Л., Гаврилюк Р.Б. Особенности распространения растворенных в грунтовых водах нефтяных углеводородов на участке аэродрома г. Николаев (Украина). *Геол. журн.* 2011. № 1 (334). С. 120—127. <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/57692>
- Брикс А.Л., Гаврилюк Р.Б. Трансформація скупчень легких нафтопродуктів, забруднюючих геологічне середовище. *Вісн. Харків. нац. ун-ту імені В.Н. Каразіна*. 2015. Вип. 42, № 1157. С. 116—123.
- Брикс А.Л., Огняник М.С., Чомко Д.М. Экология геологического сре́довища. Забруднення нафтопродуктами. Основні терміни та поняття. Київ: ВПЦ «Київський університет», 2020. 126 с.
- Гаврилюк Р.Б., Загородній Ю.В. Умови забруднення геологічного середовища авіаційним гасом в районі колишнього військового аеродрому м. Умань. *Зб. наук. пр. Ін-ту геохімії навколишнього середовища*. 2011. Вип. 19. С. 159—164.
- Гольдберг В.М., Зверев В.П., Арбузов А.И., Казёнов С.М., Ковалевский Ю.В., Путилина В.С. Техногенное загрязнение природных вод углеводородами и его экологические последствия. Москва: Наука, 2001. 125 с.
- Огняник Н.С., Парамонова Н.К., Брикс А.Л., Гаврилюк Р.Б. Эколого-гидрогеологический мониторинг территорий загрязнения геологической среды легкими нефтепродуктами. Киев: LAT & K, 2013. 254 с.
- Огняник Н.С., Парамонова Н.К., Голуб Г.И., Запольский И.Н., Гамшеева И.С. Определение параметров для двухфлюидной системы «нефтепродукт—вода» в пористой среде со смешанной смоченностью. Киев: О-во «Знание» Украины, 2004. 36 с.
- Огняник Н.С., Парамонова Н.К., Брикс А.Л., Пашковский И.С., Коннов Д.В. Основы изучения загрязнения геологической среды легкими нефтепродуктами. Киев: [А. П. Н.], 2006. 278 с.
- Парамонова Н.К., Голуб Г.И., Запольский И.Н., Логвиненко О.И., Негода Ю.А. Влияние колебания уровня грунтовых вод на формирование остаточных и зацементированных легких нефтепродуктов. *Геол. журн.* 2016. № 1 (354). С. 55—59.
- Розпорядження КМ України від 10 серпня 1994 р. № 595-р. «Про прискорення виконання заходів щодо поліпшення екологічного стану навколишнього природного середовища». <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/595-94-%D1%80#Text>
- Adamski M., Kremesec V., Kolhatkar R., Pearson C., Rowan B. LNAPL in fine-grained soils: conceptualization of saturation, distribution, recovery, and their modeling. *Groundwater Monit. R.* 2005. Vol. 25 (1). P. 100-112.
- ASTM. 2010. Standard Guide for Risk Based Corrective Action Applied at Petroleum Release Sites. ASTM E1739-95 (Reapproved 2010). ASTM International, West Conshohocken, PA. (<http://www.astm.org/Standards/E2081.htm> (accessed 20 June 2022))
- Baehr A.L., Corapcioglu M.Y. A compositional multiphase model for groundwater contamination by petroleum products. *Water Resour. Res.* 1987. Vol. 23 (1). P. 191-200. <https://doi.org/10.1029/WR023i001p0201>
- CL: AIRE. An illustrated handbook of LNAPL transport and fate in the subsurface. Retrieved from CL: AIRE: London, 2014. <http://www.claire.co.uk/projects-and-initiatives/surf-uk/20-framework-and>
- Carey M.A., Finnamore J.R., Morrey M.J. and Marsland P.A. Guidance on the assessment and monitoring of natural attenuation of contaminants in groundwater. Environment Agency R&D Publication 95 prepared by EA, 2000. <http://www.eugris.info/displayresource.aspx?r=3856&Cat=document>
- Corey A.T. Mechanics of immiscible fluids in porous media. *Water Resources Publications*, 1994. 252 p.
- Dracos Th. Immiscible Transport of Hydrocarbons infiltrating in unconfined Aquifers. In: *Oil in Freshwater: Chemistry, Biology, Countermeasure Technology*. Pergamon Press, New York, 1987. P. 161-175.
- Farr A.M., Houghtilan R.J., McWhorter D.B. Volume Estimation of Light Nonaqueous Phase Liquids in Porous Media. *Ground Water*. 1990. Vol. 28, No. 1. P. 48-56.
- Holzer T.L. Application of groundwater flow theory to a subsurface oil spill. *J. Ground Water*. 1976. Vol. 14 (3), P. 138-145.
- ITRC, 2005. The Basics: Understanding the Behavior of LNAPLs in the Subsurface. https://clu-in.org/conf/tio/lnaplsbasics_121205/prez/LNAPL-Slides-10-26-05bpdf.pdf

- ITRC. 2009. Evaluating LNAPL Remedial Technologies for Achieving Project Goals. LNAPL-2. Washington, D.C.: Interstate Technology & Regulatory Council, LNAPLs Team. [https://www.scirp.org/\(S\(lz5mqp453edsnp55rrgjt55.\)\)/reference/referencespapers.aspx?referenceid=1688412](https://www.scirp.org/(S(lz5mqp453edsnp55rrgjt55.))/reference/referencespapers.aspx?referenceid=1688412)
- ITRC. 2018. LNAPL Site Management: LCSM Evolution, Decision Process, and Remedial Technologies (LNAPL-3). <https://lnapl-3.itrcweb.org>
- Johnson P.C., Lundegard P., Liu. Z. Source zone natural attenuation at petroleum hydrocarbon spill sites: I. Site-Specific Assessment Approach. *Groundwater Monit. Remed.* 2006. Vol. 26 (4). P. 82-92.
- Lenhard R.J., Parker J.C. A model for hysteretic constitutive relations governing multiphase flow. *Water Resour. Res.* 1987. Vol. 23 (12). P. 2197-2206.
- Lenhard R.J., Parker J.C. Experimental validation of the theory of extending two-phase saturation-pressure relations to three-fluid phase systems for monotonic drainage paths. *Water Resour. Res.* 1988. Vol. 24 (3). P. 373-380.
- Leverett M.C., Lewis W.B. Steady flow of gas—oil—water mixtures through unconsolidated sands. *Trans. Am. Inst. Min. Metall. Pet. Eng.* 1941. Vol. 142. P. 107-116.
- Mercer J.W., Cohen R.M. A review of immiscible fluids in the subsurface: properties, models, characterization and remediation. *J. Contam. Hydrol.* 1990. Vol. 6 (2). P. 107-163. [https://doi.org/10.1016/0169-7722\(90\)90043-G](https://doi.org/10.1016/0169-7722(90)90043-G)
- MPCA. 2021. Light non-aqueous phase liquid management strategy, Guidance Document 2-02, *Minnesota Pollution Control Agency*. <http://www.pca.state.mn.us/index.php/view-document.html?gid=2982>
- 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.
- Rivett M.O., Thornton S.F. Monitored natural attenuation of organic contaminants in groundwater: principles and application. *Water Management*. 2008. Vol. 161 (6). P. 381-392.
- Schwille F. Groundwater pollution by mineral oil products. In: *Groundwater Pollution Symposium: Proceedings of the Moscow Symposium*, August 1971, IAHS-AISH Publ. 1975. No. 103. P. 226-240.
- Snell R.W. Three phase relative permeability in an unconsolidated sand. *J. Inst. Pet.* 1962. Vol. 84. P. 80-88.
- Technical Report 34: A practitioner's guide for the analysis, management and remediation of LNAPL. CRC for CARE. Adelaide, Australia, 2015. https://www.tceq.texas.gov/assets/public/comm_exec/pubs/rg/rg-366-trrp-32.pdf
- Texas Commission on Environmental Quality. Risk-Based NAPL Management Requirements. RG-366/TRRP-32. 2013. https://www.tceq.texas.gov/assets/public/comm_exec/pubs/rg/rg-366-trrp-32.pdf
- U.S. EPA, 1999. OSWER Directive, Use of Monitored Natural Attenuation at Superfund, RCRA Corrective Action, and Underground Storage Tank Sites. <https://www.epa.gov/sites/default/files/2014-02/documents/d9200.4-17.pdf>
- U.S. EPA, 2005. A Decision Making Framework for Cleanup of Sites Impacted with LNAPL, EPA-542-R-04-011. <https://clu-in.org/download/rtdf/napl/decisionframework.pdf>

Надійшла до редакції 06.06.2022

Надійшла у ревізованій формі 27.07.2022

Прийнята 28.07.2022

REFERENCES

- Adamski M., Kremesec V., Kolhatkar R., Pearson C. and Rowan B. 2005. LNAPL in fine-grained soils: conceptualization of saturation, distribution, recovery, and their modeling. *Groundwater Monit. Remed.* 25 (1): 100-112.
- ASTM 2010. Standard Guide for Risk Based Corrective Action Applied at Petroleum Release Sites. ASTM E1739-95 (Reapproved 2010). ASTM International, West Conshohocken, PA. <http://www.astm.org/Standards/E1739.htm> (accessed 20 June 2022)
- Baehr A.L., Corapcioglu M.Y. 1987. A compositional multiphase model for groundwater contamination by petroleum products. *Water Resour. Res.*, 2 (1): 191-200. <https://doi.org/10.1029/WR023i001p00201>
- Bricks A.L. 2010. Features of the research of the subsurface polluted with aviation kerosene in southern Ukraine. *Geologičnij žurnal*, 4 (333): 105-110. <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/57676> (in Russian).
- Bricks A.L., Gavriľuk R.B. 2011. Features of distribution of petroleum hydrocarbons dissolved in groundwater within airfield of Nikolayev city (Ukraine). *Geologičnij žurnal*, 1 (334): 120-127. <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/57692> (in Russian).
- Bricks A.L., Havryľuk R.B. 2015. Transformation of light hydrocarbon accumulations that pollute the geological environment. *Visnyk Kharkivskogo Universytetu*, 42, 1157: 116-123 (in Ukrainian).
- Bricks A.L., Ognianyk M.S., Chomko D.F. 2020. Pollution of geological environment of petroleum products. Educational reference book. Kyiv. VPC "University of Kyiv" (in Ukrainian).
- Carey M.A., Finnamor J.R., Morrey M.J. and Marsland P.A. 2000. Guidance on the assessment and monitoring of natural attenuation of contaminants in groundwater. Environment Agency R&D Publication 95. <http://www.eugris.info/displayresource.aspx?r=3856&Cat=document>
- CL: AIRE. 2014. An illustrated handbook of LNAPL transport and fate in the subsurface. Retrieved from CL: AIRE: London. Access mode: <http://www.claire.co.uk/projects-and-initiatives/surf-uk/20-framework-and>
- Corey A.T. 1994. Mechanics of immiscible fluids in porous media. *Water Resources Publications*. 252 p.
- Dracos Th. 1987. Immiscible Transport of Hydrocarbons infiltrating in unconfined Aquifers. In: *Oil in Freshwater: Chemistry, Biology, Countermeasure Technology*. Pergamon Press, New York, pp. 161-175.

- Farr A.M., Houghtilan R.J., McWhorter D.B. 1990. Volume Estimation of Light Nonaqueous Phase Liquids in Porous Media. *Ground Water*, 28 (1): 48-56.
- Gavryliuk R.B., Zagorodnyi Yu. V. 2011. Contamination of geological media with aviation gasoline of the former military airfield near the city of Uman. *Collected papers Institute of Environment Geochemistry*, 19: 159-164 (in Ukrainian).
- Goldberg V.M., Zverev V.P., Arbuzov A.I., Kazenov S.M., Kovalevskiy Y.V., Putilina V.S. 2001. Technogenic pollution of natural waters with hydrocarbons and its environmental consequences. Moscow: Nauka (in Russian).
- Holzer T.L. 1976. Application of groundwater flow theory to a subsurface oil spill. *J. Ground Water*, 14 (3): 138-145.
- ITRC. 2005. The Basics: Understanding the Behavior of LNAPLs in the Subsurface. https://clu-in.org/conf/tio/lnaplsbasics_121205/prez/LNAPL-Slides-10-26-05bpdf.pdf
- ITRC. 2009. Evaluating LNAPL Remedial Technologies for Achieving Project Goals. LNAPL-2. Washington, D.C.: Interstate Technology & Regulatory Council, LNAPLs Team. <https://itrcweb.org/guidancedocuments/LNAPL-2.pdf>
- ITRC. 2018. LNAPL Site Management: LCSM Evolution, Decision Process, and Remedial Technologies (LNAPL-3). <https://lnapl-3.itrcweb.org>
- Johnson P.C., Lundegard P., Liu Z. 2006. Source zone natural attenuation at petroleum hydrocarbon spill sites: I. Site-Specific Assessment Approach. *Groundwater Monit. Remed*, 26 (4): 82-92.
- Lenhard R.J., Parker J.C. 1987. A model for hysteretic constitutive relations governing multiphase flow. *Water Resour. Res.*, 23 (12): 2197-2206.
- Lenhard R.J., Parker J.C. 1988. Experimental validation of the theory of extending two-phase saturation-pressure relations to three-fluid phase systems for monotonic drainage paths. *Water Resour. Res.*, 24 (3): 373-380.
- Leverett M.C., Lewis W.B. 1941. Steady flow of gas—oil—water mixtures through unconsolidated sands. *Trans. Am. Inst. Min. Metall. Pet. Eng.*, 142: 107-116.
- Mercer J.W., Cohen R.M. 1990. A review of immiscible fluids in the subsurface: properties, models, characterization and remediation. *J. Contam. Hydrol.*, 6 (2): 107-163. [https://doi.org/10.1016/0169-7722\(90\)90043-G](https://doi.org/10.1016/0169-7722(90)90043-G)
- MPCA. 2021. Light non-aqueous phase liquid management strategy, Guidance Document 2-02, *Minnesota Pollution Control Agency*. <http://www.pca.state.mn.us/index.php/view-document.html?gid=2982>
- 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.
- Ognianik N.S., Paramonova N.K., Golub G.I., Zapolskiy I.N., Gamsheeva I.S. 2004. Determination of parameters for a two-fluid system “oil—water” in a porous medium with mixed wettability. Kyiv: “Znanie” Society of Ukraine (in Russian).
- Ognianik N.S., Paramonova N.K., Bricks A.L., Havryliuk R.B. 2013. Ecological and hydrogeological monitoring of subsurface contamination arias with light petroleum products. Kyiv: LAT & K (in Russian).
- Ogniani N.S., Paramonova N.K., Brick A.L., Pashkovskiy I.S., Konnov D.V. 2006. The fundamentals of studying of subsurface contamination with light petroleum products. Kyiv: A.P.N. (in Russian).
- Order of the Cabinet of Ministers of Ukraine of August 10, 1994 No. 595-r. On accelerating the implementation of measures to improve the ecological condition of the environment. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/595-94-%D1%80#Text> (in Ukrainian).
- Paramonova N.K., Golub G.I., Zapolskiy I.N., Logvinenko O.I., Negoda Yu.A. 2016. Influence of water table fluctuations on formations of retained and trapped light petroleum products. *Geologičnij žurnal*, 1 (354): 105-110 (in Russian).
- Rivett M.O., Thornton S.F. 2008. Monitored natural attenuation of organic contaminants in groundwater: principles and application. *Water Management*, 161 (6): 381-392.
- Schwille F. 1975. Groundwater pollution by mineral oil products. In: *Groundwater Pollution Symposium: Proceedings of the Moscow Symposium*, August 1971, IAHS-AISH Publ., No. 103, pp. 226-240.
- Snell R.W. 1962. Three phase relative permeability in an unconsolidated sand. *J. Inst. Pet.*, 84: 80-88.
- Technical Report 34. 2015: A practitioner’s guide for the analysis, management and remediation of LNAPL. CRC for CARE. Adelaide, Australia. <https://www.crccare.com/files/dmfile/CRCCARETechnicalReport34-PractitionersguideforanalysismanagementandremediationofLNAPL.pdf>
- Texas Commission on Environmental Quality. 2013: Risk-Based NAPL Management Requirements. RG-366/TRRP-32. https://www.tceq.texas.gov/assets/public/comm_exec/pubs/rg/rg-366-trrp-32.pdf
- U.S. EPA. 1999. OSWER Directive, Use of Monitored Natural Attenuation at Superfund, RCRA Corrective Action, and Underground Storage Tank Sites. <https://www.epa.gov/sites/default/files/2014-02/documents/d9200.4-17.pdf>
- U.S. EPA. 2005. A Decision Making Framework for Cleanup of Sites Impacted with LNAPL, EPA-542-R-04-011. <https://clu-in.org/download/rtdf/napl/decisionframework.pdf>

Received 06.06.2022

Received in revised form 27.07.2022

Accepted 28.07.2022

A.L. Bricks *, M.S. Ognianyk

Institute of Geological Sciences of NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine

E-mail: abricks2013@gmail.com

* Corresponding author

ASPECTS OF MANAGEMENT OF SITES OF THE GEOLOGICAL ENVIRONMENT CONTAMINATED WITH PETROLEUM PRODUCTS

In Ukraine, inefficient methods of using oil products for many decades have left thousands of contaminated areas of geological environment as a legacy. The local and regional accumulation of hydrocarbon pollutants is increasing so much that by altering the quality of the vegetation, surface and groundwater, it can threaten the natural environment, in general and human health, in particular. Conventional remediation methods designed to remove contaminants dissolved in groundwater turn out to be insufficient and even unsuitable to achieving an acceptable purification of the geological environment from lost petroleum products. To date, many special technologies and related devices have been developed in the world for the treatment of contaminated soils and groundwater. However, this article is not about remediation technologies and the equipment used. Equally important is a strategy definition for the management of oil-contaminated areas of the geological environment, that is, the development of a long-term decision-making plan to achieve the goal of rehabilitation of the pollution sites. This strategy relies on a scientifically based understanding of the physical and chemical properties of petroleum products, their behavior in the geological environment, potential threats associated with the spread of pollutants, and available technical decisions for their removal. The decision-making scheme presented in the article can be perceived as an adaptation to the conditions of Ukraine.

The second part of the article provides examples of real events in some contaminated sites where remediation measures were implemented. Even a superficial comparison of real results and typical requirements for the expected levels of environmental cleanup leads to the conclusion that there are shortcomings in the organization of environmental protection measures.

Keywords: hydrocarbon pollution; geological environment; light petroleum products; management of petroleum-contaminated areas; remediation measures.