

ГІДРОГЕОЛОГІЯ, ІНЖЕНЕРНА ТА ЕКОЛОГІЧНА ГЕОЛОГІЯ

УДК 504.5(556.047)](477)

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.96.11>

О. Шпак, канд. геол. наук, ст. наук. співроб.,

E-mail: shpak_lena@yahoo.com;

Р. Гаврилюк, канд. геол. наук, ст. наук. співроб.,

E-mail: gavrilyuk.ruslan@gmail.com;

О. Логвиненко, мол. наук. співроб.,

E-mail: lohvyenko.olha@gmail.com;

Інститут геологічних наук НАН України,

вул. О. Гончара, 55-Б, м. Київ, 01054, Україна

**ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ РЕМЕДІАЦІЇ ГЕОЛОГІЧНОГО СЕРЕДОВИЩА
НА ТЕРИТОРІЇ СКЛАДУ ПАЛИВНО-МАСТИЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ
АЕРОПОРТУ "БОРИСПІЛЬ"***(Представлено членом редакційної колегії д-ром геол. наук, ст. дослідником О.І. Меньшовим)*

Присвячено актуальній проблемі ремедіації геологічного середовища, забрудненого нафтопродуктами. Забруднення геологічного середовища нафтопродуктами на території складу аеропорту "Бориспіль" у вигляді лінзи авіаційного гасу існує тривалий час. Відновлювальні роботи з вилучення мобільних нафтопродуктів та забруднених ґрунтових вод, що проводились на ділянці досліджень, не дозволили повністю ліквідувати забруднення. Щоб визначити ефективність ліквідаційних відкачок мобільних нафтопродуктів та ґрунтових вод, було оцінено обсяг і стан нафтопродуктів у ґрунті та їхню трансформацію під впливом коливання рівня ґрунтових вод. За розробленою нами методикою розраховане мінімальне значення потужності шару нафтопродуктів у свердловині, за якого мобільні нафтопродукти в ґрунті відсутні, і ліквідаційні відкачки стають неефективними. За даними моніторингу та розрахунків обсягу гасу в лінзі, ліквідаційні відкачки на забрудненій ділянці привели до стабілізації поширення забруднення і скорочення площі лінзи авіаційного гасу.

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

Постановка проблеми. Ремедіація забрудненого нафтопродуктами (НП) геологічного середовища є проблемою світового масштабу і одним із пріоритетних напрямів геоecологічної діяльності в Україні. На території України існують численні осередки забруднення геологічного середовища НП, які виступають стійким чинником погіршення екологічної ситуації протягом останніх десятиліть (Огняник та ін., 2002; Shpak et al., 2003). Особливо небезпечним є вплив НП-забруднення на якість підземних вод – джерела питного водопостачання. Поширення НП-забруднення у геологічному середовищі супроводжується негативними змінами довкілля, що можуть бути невідворотними протягом десятиків, а можливо і сотень років. За значних масштабів забруднення на поверхні ґрунтових вод формуються лінзи мобільних НП, які необхідно вилучити відкачкою, щоб обмежити подальше поширення забруднення. Досвід закордонних спеціалістів та досліджень, проведених в ІГН НАНУ на забруднених НП ділянках, свідчить про те, що ліквідаційні відкачки без застосування інших додаткових методів ремедіації не завжди дозволяють відновити забруднене геологічне середовище до потрібних стандартів якості (Огняник та ін., 2013; Abdul, 1992; Newell et al., 1995; Testa, Paczkowski, 1989; U.S.EPA, 2005).

Показовим об'єктом є територія складу паливно-мастильних матеріалів (ПММ) аеропорту "Бориспіль" (Київська обл.), де забруднення геологічного середовища НП у вигляді лінзи авіаційного гасу існує з 1998 р. Відновлювальні роботи з вилучення мобільних НП та забруднених ґрунтових вод, що проводились на ділянці досліджень, не дозволили повністю ліквідувати забруднення. За даними моніторингу було підтверджено наявність шару гасу майже у всіх ліквідаційних свердловинах. Виникає необхідність визначення ефективності ліквідаційних відкачок на забрудненій ділянці та доцільності їх подальшого застосування.

Аналіз публікацій за темою досліджень. У зв'язку з глобальним поширенням забруднення геологічного

середовища НП, починаючи з 70-х років минулого століття вченими-гідрогеологами у багатьох країнах, і в першу чергу у США, низка наукових досліджень була присвячена розробці методів ремедіації забруднених НП ґрунтів та підземних вод (National Research Council, 1994; Newell et al., 1995; Manual, 1992). Існує ряд публікацій, в яких описано застосування ліквідаційних відкачок для відновлення забрудненого НП геологічного середовища (Кржиж і Резник, 2007; Abdul, 1992; Charbeneau et al., 2000; U.S.EPA, 2005). Однак в Україні систематичні спеціалізовані дослідження та регулярний моніторинг осередків забруднення практично не проводяться. На забруднених НП ділянках ремедіаційні заходи переважно здійснюють приватні підприємства на засадах самофінансування, і при зниженні показників ремедіації до рівня "рентабельності" відновлювальні роботи можуть бути припинені, навіть якщо головна мета – усунення загрози об'єктам, які можуть зазнавати забруднення, не досягнута. Слід зауважити, що кількість публікацій із цієї теми з практичними прикладами застосування методів ремедіації забрудненого НП геологічного середовища в Україні є незначною.

Виділення нерозв'язаних раніше частин загальної проблеми. Статтю присвячено висвітленню особливостей застосування ліквідаційних відкачок для відновлення забрудненого НП геологічного середовища. Слід відзначити досить складні еколого-гідрогеологічні умови об'єкта досліджень, пов'язані з впливом коливання рівня ґрунтових вод (РГВ) та недостатньо ефективними попередніми відновлювальними роботами, що потребує проведення регулярного моніторингу осередку забруднення, визначення стану та об'єму знаходження НП в ґрунті та їх трансформації в процесі коливання РГВ та застосування нових підходів до ремедіації геологічного середовища.

Мета досліджень – оцінка ефективності та доцільності подальшого застосування ліквідаційних відкачок на забрудненій ділянці складу ПММ аеропорту "Бориспіль".

© Шпак О., Гаврилюк Р., Логвиненко О., 2022

У статті наведено результати досліджень відділу охорони підземних вод ІГН НАНУ, що проводились на забрудненій ділянці складу ПММ аеропорту "Бориспіль", включаючи моніторинг осередку забруднення, визначення вмісту НП у пробах води та ґрунту, оцінку об'єму і стану знаходження НП в ґрунті та їх трансформації під впливом коливання РГВ.

Визначення ефективності ліквідаційних робіт на забрудненій ділянці. Забруднення геологічного середовища НП в районі складу ПММ аеропорту "Бориспіль" у вигляді лінзи авіаційного гасу було виявлено у 1998 р. У результаті витоків НП відбувалось їх просочування в зону аерації, представлену проникними лесоподібними та алювіальними супісками і пісками, та подальша інфільтрація у напрямку ґрунтових вод. Потужність шару НП у свердловинах сягала 0,9 м, сумарний об'єм НП, які накопичилися на поверхні ґрунтових вод, складав 1 725 м³.

У 1999–2000 рр. було розроблено проєкт вилучення підземних вод, забруднених НП, та пробурено мережу з 42 ліквідаційних свердловин. Однак виконані відновлювальні роботи не дозволили повністю ліквідувати забруднення. Це пов'язано з недостатньою кількістю ліквідаційних свердловин, щоб покрити всю область забруднення, і відстанями між свердловинами, що суттєво

перевищували радіус впливу свердловин. Результати математичного моделювання з імітації роботи ліквідаційних свердловин свідчать, що за потужності лінзи гасу 0,5 м свердловини мають розміщуватись за сіткою не рідше ніж 20х20 м (*Шпак та ін.*, 2020), що не було забезпечено існуючою системою.

У 2011 р. ІГН НАН України розпочато дослідження осередку забруднення ділянки складу ПММ. На початковому етапі досліджень (серпень 2011 р.) моніторинговими даними було підтверджено наявність шару гасу майже у всіх ліквідаційних свердловинах. Аналогічні дані отримані за станом на вересень 2015 р. (рис. 1).

За час проведення ліквідаційних робіт на осередку забруднення (2001–2019 рр.) було вилучено та очищено 35 267 м³ забрудненої води та 353,81 м³ мобільних НП (рис. 2). Максимальний ефект спостерігався в перші три роки (2001–2003 рр.), протягом яких було вилучено 281,96 м³ НП – 79,7 % від загальної кількості вилучених НП. У 2003–2019 рр. було вилучено 71,84 м³ НП – 20,3 % від загальної кількості вилучених НП. У цей період річний видобуток НП коливався в межах від 0,6 % до 1,7 % (2–6 м³) від сумарної кількості. Об'єм вилученого нафтопродукту становить 20 % від розрахованого на доліквідаційному етапі.

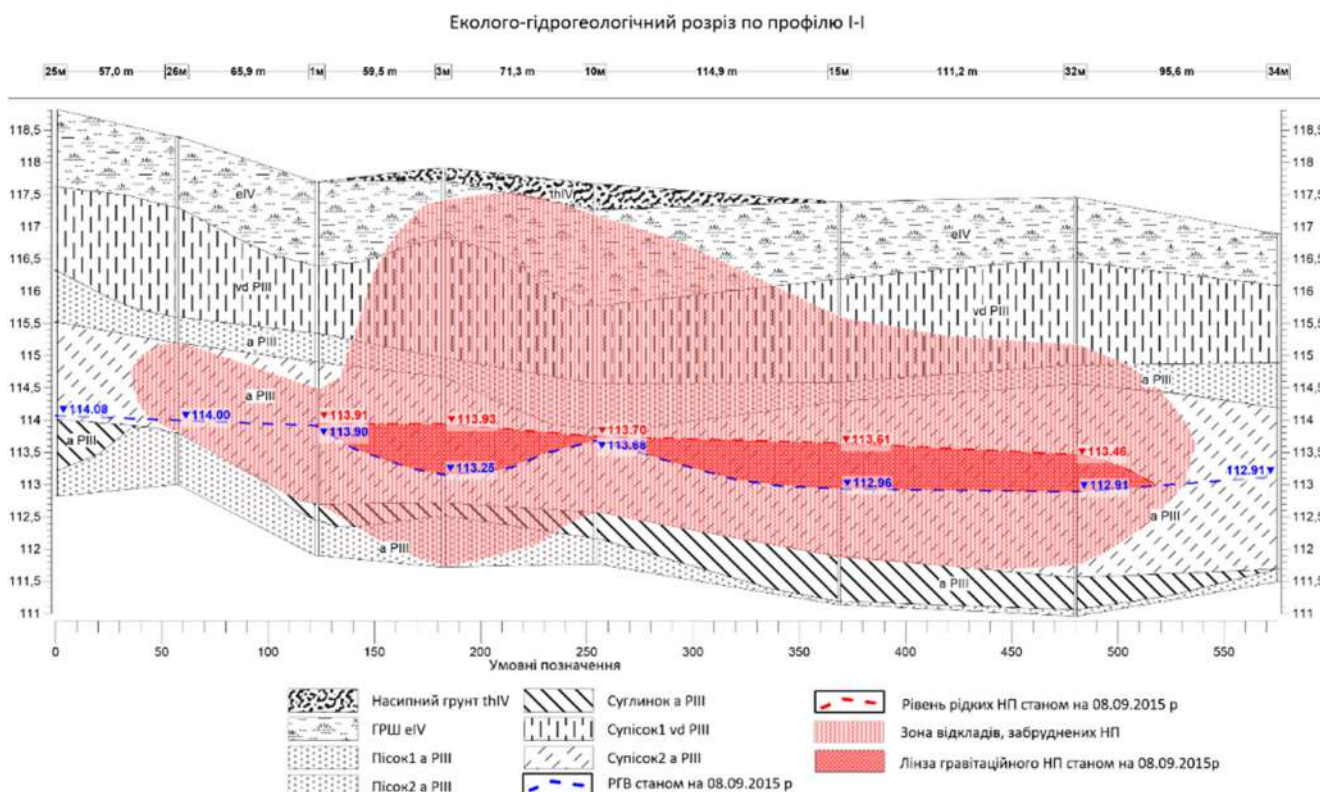


Рис. 1. Еколого-гідрогеологічний розріз забрудненої ділянки складу ПММ

У 2019 р. ліквідаційні відкачки було призупинено у зв'язку з досягнутою мінімізацією загрози поширення забруднення (шар мобільних НП у спостережних свердловинах суттєво зменшився або зовсім зник). Однак залишається загроза забруднення через втрати НП з трубопроводів.

Для визначення ефективності ліквідаційних робіт шляхом відкачок мобільних НП та ґрунтових вод необхідно оцінити об'єм і стан знаходження НП у ґрунті та їх трансформацію в процесі коливання РГВ.

Розрахунки проводились за розробленою нами методикою, яка була застосована на забруднених НП територіях військових аеродромів України (*Огняник та ін.*, 2013).

Потужність шару мобільних НП у відкладах T пов'язана з потужністю НП у свердловині T^w рівнянням

$$T^w = T + \frac{h_d^{ao}}{1 - \rho_{r,o}}, \quad (1)$$

де h_d^{ao} – напір зміщення ЛНП в повітря; $\rho_{r,o} = \rho_o / \rho_w$ – відносна питома вага ЛНП: $\rho_{r,o} = 0,8/1 = 0,8$.

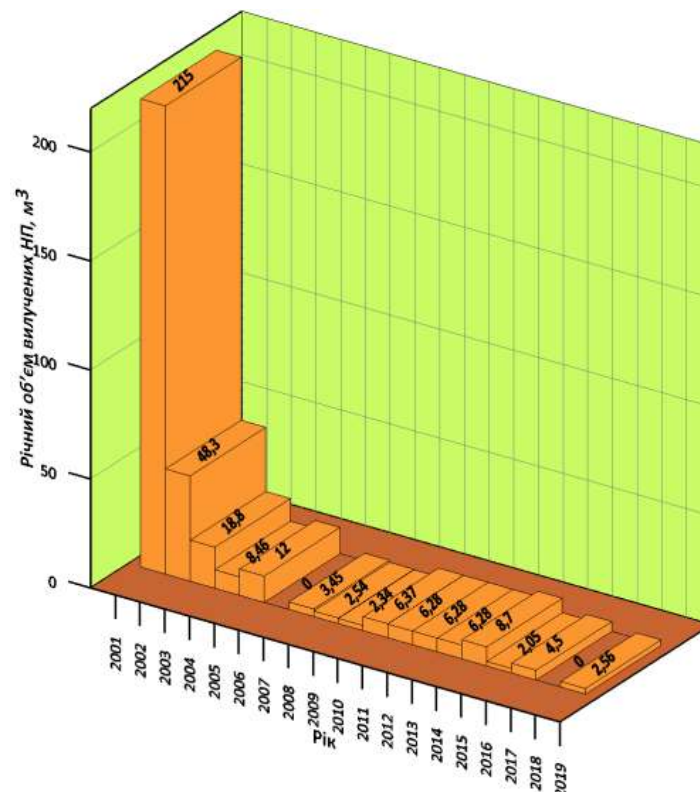


Рис. 2. Динаміка об'єму вилучених НП на забрудненій ділянці складу ПММ

З формули (1) виходить, що при $T = 0$

$$T^w = \frac{h_d^{ao}}{1 - \rho_{r,0}} \quad (2)$$

Для визначення мінімального значення T^w , за якого існує зв'язок між потужністю шару мобільного газу у свердловині і ґрунті необхідно знайти

$$h_d^{ao} = \frac{h_d^{aw} \sigma_{ao}}{\sigma_{aw}} \quad (3)$$

де $\sigma_{aw} = 72$ дін/см – поверхневий натяг у системі флюїдів "повітря – вода"; $\sigma_{ao} = 24,55$ дін/см – поверхневий натяг у системі флюїдів "повітря – газ"; h_d^{aw} розраховується за формулою

$$h_d^{aw} = \alpha^{-1} S_x^{1/\lambda} (S_x^{-1/m} - 1)^{1-m} \quad (4)$$

$$\text{де } S_x = 0,72 - 0,35e^{-\varepsilon^4}, \quad \lambda = \frac{m(1-0,5^{1/m})}{1-m} \quad (5)$$

$\alpha = 0,04$ 1/см; $\varepsilon = 1,296$; $m = 1 - 1/\varepsilon = 0,228$, отримані екстраполяцією рівнянням Van Genuchten (Van Genuchten, 1980) експериментальних вимірів "вміст води (θ_w) – капілярний напір h_{aw} на зразках ґрунту з дослідного об'єкта. Після підстановки значень: α , ε , m отримано, що $h_d^{aw} = 21,16$ см, а згідно з рівнянням (3) – $h_d^{ao} = 7,215$ см. Підставивши це значення у формулу (2), отримуємо, що мінімальне значення потужності шару ЛНП у свердловині, за якого зникає мобільний газ в ґрунті, становить $T^w = 36,08$ см.

Отже, за відсутності впливу процесів коливання РГВ товщина шару НП у свердловині, за якої можна очікувати наявності шару мобільних НП у відкладах, становить $T^w \approx 0,36$ м, тому за таких показників ліквідаційні заходи не мають сенсу.

Вплив коливання РГВ на зміну потужності шару НП у ґрунті та спостережній свердловині. У результаті коливання рівнів ґрунтових вод (РГВ) відбуваються

процеси, які призводять до збільшення зони забруднення ґрунтів та концентрації НП у них. Під час підйому рівня ґрунтових вод потужності шару газу в свердловині і мобільного газу у відкладах зменшуються. Газ витрачається на формування нового мобільного шару і капілярних зон "повітря–НП–вода" та "НП–вода", збільшуючи заземлену водою частку. Наступні висхідні і низхідні рухи збільшують багаторічний максимум амплітуди коливань РГВ, що призводить до "розмазування" газу в її межах. Тому на формування мобільної фази витрачається все менше і менше газу.

Коливання РГВ безпосередньо впливають на результативність ліквідаційних відкачок НП, зменшуючи їх ефективність. Ці процеси дуже добре спостерігаються на дослідному об'єкті.

За період спостережень шар вільного газу майже зникає при підйомах РГВ і відновлюється при їх зниженні. При цьому відбувається додаткове забруднення зони аерації, оскільки при кожному підйомі РГВ та рівня газу формується нова капілярна зона. Так, у червні 2014 р. спостігалось найбільше підняття рівнів за весь період спостережень, що призвело до значного скорочення шару вільного газу або його зникнення у спостережних свердловинах, тобто його перехід у заземлений стан. За період з 11.09.2012 по 12.06.2014 р. шар НП зменшився у більше ніж 3 рази. Наприклад, у свердловині 15 потужність газу зменшилась з 1,07 до 0,20 м, тобто в 5,35 рази (рис. 3). Під час подальшого зниження РГВ шар НП відновлювався, але не повною мірою. Найбільше його відновлення (потужність) спостігалась у вересні 2016 р. за найбільш низьких положень РГВ за час моніторингових спостережень і становила у св. 15 м – 0,93 м, або 83 % від максимальної потужності у 2012 р. Близько 13 % НП залишились захопленими ґрунтом. Такі ж закономірності підтверджуються даними інших свердловин. Найбільші потужності мобільних НП спостігались на відмітках

113–114,2 м, імовірно, на цих глибинах і формувався основний об'єм лінзи НП. Під час наступних піднятих рівнів потужності гасу зменшуються.

За час спостережень багаторічна амплітуда коливань РГВ становила 2,4 м. Зона забруднення також перебуває в цих межах, шар вільного НП, що відновлюється, – в межах відміток 112,5–114,5 м. У результаті коливань РГВ відбувається "розмазування" НП по зоні аерації і забруднення додаткового об'єму ґрунту.

У період 2012–2015 рр. у зв'язку з поступовим зниженням РГВ шар НП дещо відновлювався.

Якщо враховувати коливання РГВ, які спостерігалися протягом 2011–2020 рр., можливість вилучення мобільних НП була лише в окремі періоди: за товщини шару НП понад 0,36 м. Шар мобільних НП у ґрунті спостерігався протягом 2012, 2014–2017 рр. та у 2019 р. У період з жовтня 2013 р. по жовтень 2014 р. та у 2018 р. НП переходив у заземлений стан у результаті підйому рівня ґрунтових вод і майже не фіксувався спостережними свердловинами.

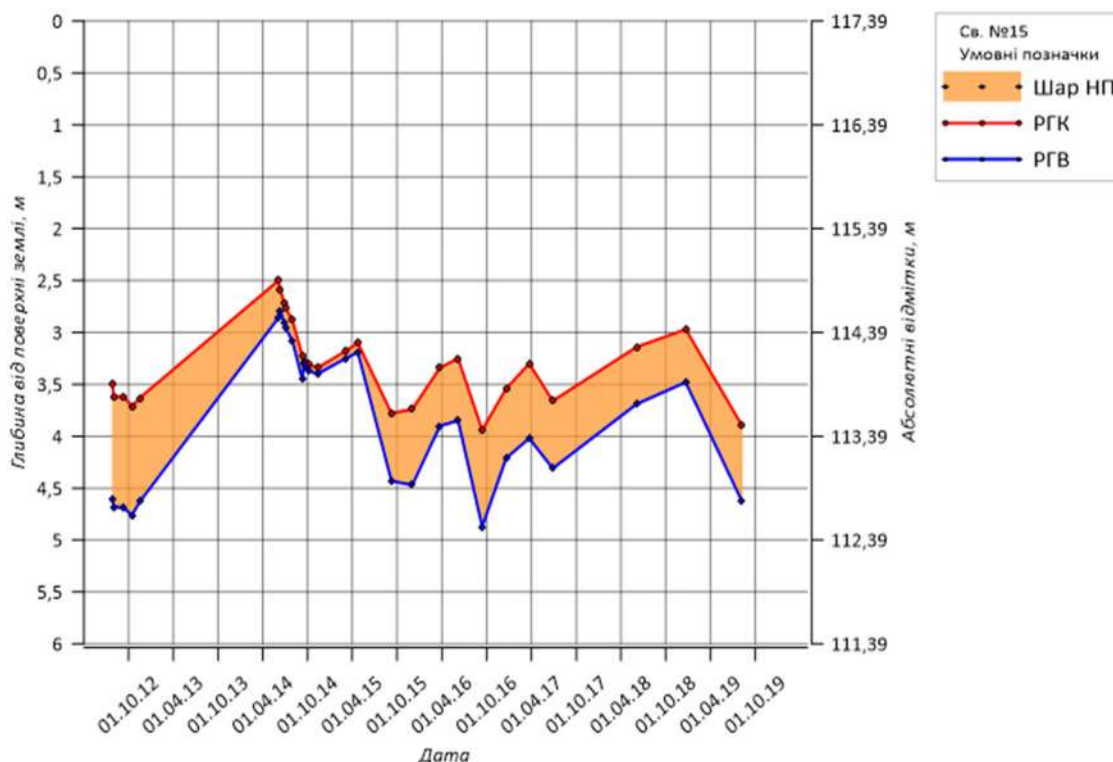


Рис. 3. Зміна товщини шару нафтопродукту при зміні рівня ґрунтових вод у свердловині № 15

Кількісна оцінка зони забруднення. Для кількісної оцінки зони забруднення необхідно оцінити формування капілярної зони "повітря–НП–вода" при піднятті РГВ та НП, а також потужність капілярної зони "НП–вода" та безпосередньо об'єм мобільної частини лінзи НП (Огняник та ін., 2013).

Розрахунок вмісту гасу за вертикаллю в межах виділених зон розраховано з використанням формули Van Genuchten (Van Genuchten, 1980):

$$\bar{\theta} = [1 + (\alpha h_c)^n]^{-m}, \quad (6)$$

де $\alpha = \{\alpha_{aw}, \alpha_{ao}, \alpha_{ow}\}$, $h_c = \{h_{aw}, h_{ao}, h_{ow}\}$.

У насиченій зоні вміст води (θ_w) розраховується за h_{ow} та α_{ow} . $\alpha_{ow} = \alpha_{aw} \sigma_{aw} / \sigma_{ow}$, $\alpha_{ow} = 23,81$ 1/м. h_{ow} у точці z розраховується за формулою

$$h_{ow} = (1 - \rho_{r.o})(z - H_{ow}^w) \quad (7)$$

Розрахунок проводився по св. 4 м, $H_{ow}^w = 112,89$, $H_{ao} = 113,73$.

За отриманим $\bar{\theta}_w$ визначається вміст води за формулою

$$\theta_w = \bar{\theta}_w(\theta_s - \theta_{w,r}) + \theta_{w,r} \quad (8)$$

Вміст НП оцінюється як

$$\theta_o = \theta_s - \theta_w. \quad (9)$$

Об'єм гасу в капілярній зоні:

$$V_o = \theta_{o,cp} h_{ow}^k; V_w = \theta_{w,cp} h_{ow}^k \quad (10)$$

Об'єм гасу в зоні з мобільним гасом:

$$\begin{aligned} V_o &= \theta_{o,cp}(T^w - 0,36); \\ V_{ow} &= (\theta_{w,cp} - \theta_{r,w})(T^w - 0,36); \\ \theta_{w,cp} &= 0,220 \end{aligned} \quad (11)$$

Об'єм гасу за площею:

$$V_{o,F} = V_o F; V_{w,F} = V_w F \quad (12)$$

Результати розрахунків розподілу та об'єму води та гасу в насиченій зоні наведено в табл. 1.

З табл. 1 видно, що в межах насиченої капілярної зони "НП–вода" перебуває 163 м³ гасу. У зоні з мобільними НП – 146 м³ гасу. Всього в насиченій зоні перебуває 310 м³ гасу.

За залежністю Van Genuchten було розраховано вміст рідини θ_l (вода + гас) за α_{ao} та h_{ao} , та вміст води за α_{ow} та h_{ow} . Розраховано аналогічно вищевказаному. $\alpha_{ao} = 12,61$ 1/м, знаходиться зі співвідношення $\alpha_{aw} \sigma_{aw} = \alpha_{ao} \sigma_{ao}$, $h_{ao} = \rho_{r.o}(z - H_{ao}^w)$, $\theta_o = \theta_l - \theta_w$.

Результати розрахунків вмісту НП у ненасиченій зоні наведено в табл. 2.

За результатами розрахунків у межах лінзи перебуває 404 м³ гасу, у т. ч. в ненасиченій зоні – 95,09 м³ або 23,5 % від загального об'єму гасу в лінзі. У насиченій зоні з мобільним гасом – 146 м³ або 36,1 % від загального

об'єму гасу в лінзі. У насиченій капілярній зоні – 163 м³ або 40,3 % від загального об'єму гасу в лінзі.

Виходячи з даних спостережень за рівнями води та НП та отриманих даних щодо об'єму гасу в лінзі, можна зробити висновок, що ліквідаційні відкачки, які проводились до 2018 р., мали позитивний результат у стабілізації поширення забруднення та скороченні площі лінзи майже на 35 %. Площа лінзи за період з 2016–2019 рр. зменшилась з 7,89 га до 5,06 га (рис. 4). Максимальна товщина шару НП спостерігається у свердловинах 4 м

та 15 м та становить 0,84 та 0,74 м відповідно. Площа лінзи з такою товщиною шару НП становить близько 445 м². В інших свердловинах потужність НП коливається від 0,47 м до 0,08 м, отже мобільні НП в ґрунті практично відсутні.

Якщо враховувати, що помітне скорочення лінзи відбувалось у період 2017–2019 рр. за відсутності відкачок, можна стверджувати, що метод ліквідаційних відкачок за цих умов є неефективним, а для ремедіації забрудненої ділянки потрібно використовувати інші методи.

Таблиця 1

Результати розрахунку розподілу вмісту та об'єму НП та води в насиченій зоні

Розрахункова точка z, м		h_{ow} у точці z	θ , доля од.	θ_w , доля од.	θ_o , доля од.
Капілярна зона h_{ow}^k					
H_{ow}^k	113,08	0,038	0,896	0,382	0,019
H_{ow}	113,25	0,072	0,830	0,370	0,031
Зона з мобільним гасом					
$T^w = 0,4$	113,29	0,08	0,818	0,368	0,033
$T^w = 0,5$	113,39	0,1	0,791	0,363	0,038
$T^w = 0,6$	113,49	0,12	0,768	0,359	0,042
$T^w = 0,7$	113,59	0,14	0,749	0,356	0,045
$T^w = 0,84$	113,73	0,168	0,725	0,351	0,050
Середнє значення, доля од.		Площа, F	Об'єм гасу, V_o , м ³ , у межах		Об'єм рухомої води V_w , м ³ у межах
		T^w	м ²	1м ²	площа
Капілярна зона					
0,376	0,025	0–0,8	50673	0,003	163
Насичена зона					
0,369	0,032	0–0,4	39977	0,001	53
0,366	0,035	0,4–0,5	5872	0,005	31
0,361	0,040	0,5–0,6	2924	0,010	29
0,357	0,044	0,6–0,7	1455	0,015	23
0,353	0,048	0,7–0,84	445	0,024	11
Всього:				310	3025

Таблиця 2

Результати розрахунку розподілення вмісту та об'єму НП в ненасиченій зоні

T^w , м	Розрахункова точка z	h_{ao} , м	h_{ow} , м	θ_l , долі од.	θ_w , долі од.	θ_o , долі од.	$\theta_{o,ср}$ долі од.	Площа F, м²	Об'єм гасу в межах площі, V_o , м³
h_{ao}^k , м									
0-0,4 0,05		0 0,04	0,08 0,09	0,401 0,394	0,368 0,366	0,033 0,028	0,031	39977	61,96
0,4-0,6 0,08		0 0,064	0,12 0,136	0,401 0,390	0,359 0,365	0,042 0,025			
0,6-0,8 0,11		0 0,088	0,168 0,182	0,401 0,386	0,351 0,349	0,050 0,037	0,044	1900	9,2
Всього									

Висновки. Забруднення геологічного середовища НП у районі складу ПММ аеропорту "Бориспіль" (Київська обл.) у вигляді лінзи авіаційного гасу існує з 1998 р. Відновлювальні роботи з вилучення мобільних НП та забруднених ґрунтових вод, що проводились на ділянці досліджень, не дозволили повністю ліквідувати забруднення. Виникла потреба визначення ефективності ліквідаційних відкачок на забрудненій ділянці та доцільності їх подальшого застосування.

За час проведення ліквідаційних робіт на осередку забруднення (2001–2019 рр.) було вилучено та очищено 35 267 м³ забрудненої води та 353,81 м³ мобільних НП. Максимальний ефект спостерігався у 2001–2003 рр., протягом яких було вилучено 281,96 м³ НП – 79,7 % від загальної кількості вилучених НП. У період 2003–2019 рр. було вилучено 71,84 м³ НП – 20,3 % від загальної кількості. У 2019 р. ліквідаційні відкачки було призупинено, однак залишається загроза забруднення через втрати НП з трубопроводів.

Для визначення ефективності ліквідаційних робіт шляхом відкачок мобільних НП та ґрунтових вод було оцінено об'єм і стан знаходження НП у ґрунті та їх трансформацію в процесі коливання РГВ. Встановлено, що за відсутності впливу процесів коливання РГВ товщина шару НП у свердловині, за якої можна очікувати наявності шару мобільних НП у відкладах, становить $T^w \approx 0,36$ м, а отже за таких показників ліквідаційні відкачки є неефективними.

Коливання РГВ знижують ефективність ліквідаційних відкачок НП. Протягом 2011–2020 рр. можливість вилучення мобільних НП була лише в окремі періоди – за товщини шару НП понад 0,36 м. Шар мобільних НП в ґрунті спостерігався протягом 2012, 2014–2017 рр. та у 2019 р. У період з жовтня 2013 р. по жовтень 2014 р. та у 2018 р. НП переходив у защемлений стан у результаті підйому РГВ і майже не фіксувався спостережними свердловинами.

Для кількісної оцінки зони забруднення було оцінено формування капілярної зони "повітря–НП–вода" при піднятті РГВ та НП, потужність капілярної зони "НП–вода"

та об'єм мобільної частини лінзи НП. Встановлено, що в межах насиченої капілярної зони "НП-вода" перебуває 163 м³ гасу, в зоні з мобільними НП – 146 м³ гасу, та об'єм гасу в ненасиченій зоні становить 95,09 м³.

За даними спостережень за рівнями води та НП та отриманими даними щодо об'єму гасу в лінзі можна зробити висновок, що ліквідаційні відкачки, які проводились до 2018 р. мали позитивний результат щодо стабілізації поширення забруднення та скорочення площі лінзи майже на 35 % (у період 2016-2019 рр. площа лінзи

зменшилась з 7,89 га до 5,06 га). Враховуючи, що помітне скорочення лінзи відбувалось у період 2017–2019 рр. за відсутності відкачок, можна стверджувати, що метод ліквідаційних відкачок за цих умов є неефективним. Отже, для подальшої ремедіації забрудненої ділянки потрібно використовувати інші методи.

Отримані результати досліджень можуть бути застосовані для ліквідації забруднення геологічного середовища НП багатьох забруднених ділянок в Україні.

Projection: Gauss-Kruger Zone 6 (Pulkovo 1942)
used space of the snapshot resource <http://maps.yandex.ua/>

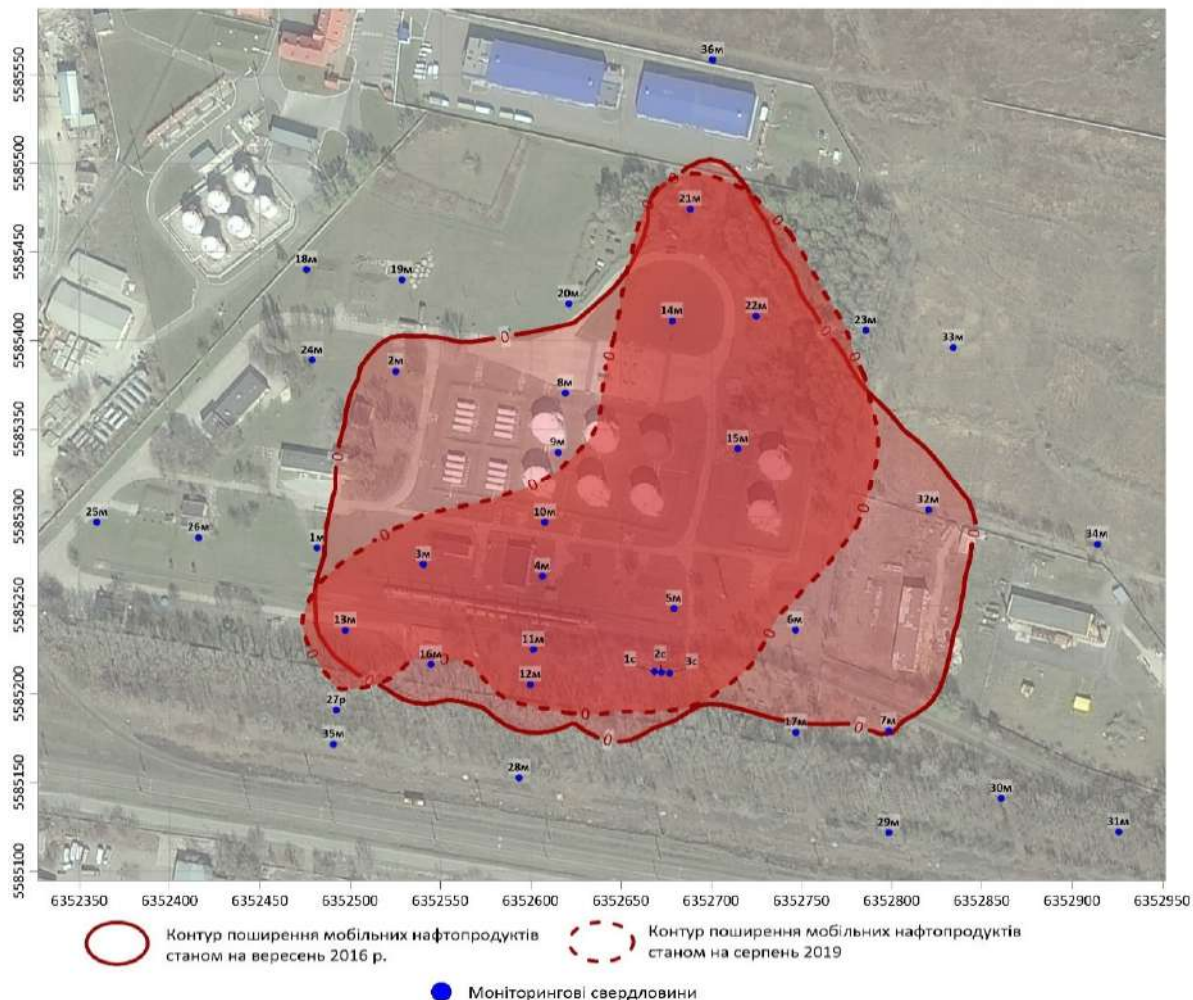


Рис. 4. Порівняння контурів поширення мобільних НП станом на вересень 2016 р. та серпень 2019 р.

Роботу виконано в рамках наукової теми "Наукові основи ліквідації забруднення геологічного середовища легкими нафтопродуктами" та частково профінансовано за бюджетною програмою "Підтримка розвитку пріоритетних напрямків наукових досліджень" (КПКВК 6541230).

Список використаних джерел

- Кржиж, Л., Резник, Д. (2007). Технології очистки геологической среды от загрязнения нефтепродуктами. *Экология производства*, 10, 54-57.
- Огняник, Н. С., Парамонова, Н. К., Брикс, А. Л., Гаврилюк, Р. Б. (2013). Эколого-гидрогеологический мониторинг территорий загрязнения геологической среды легкими нефтепродуктами. Монография. Київ: LAT&K.
- Огняник, Н.С., Шпак, Е.Н., Голуб, Г.И., Негода, Ю.А., Наседкина, О.И. (2002). Оценка эколого-геологического состояния территории авиабазы в связи с загрязнением грунтов и подземных вод нефтепродуктами. *Экология доквілля та безпека життєдіяльності*, 5-6, 71–76.
- Шпак, О.М., Гаврилюк, Р.Б., Логвиненко, О.І. (2020). Дослідження забруднення геологічного середовища авіаційним гасом у районі

аеропорту "Бориспіль" з використанням математичного моделювання. *Мінеральні ресурси України*, 2, 49-53.

Abdul, A.S. (1992). A new pumping strategy for petroleum product recovery from contaminated hydrogeologic systems: Laboratory and field evaluations. *Ground Water Monit. Rev.*, 12(1), 105-114.

Charbeneau, R.J., Johns, R.T., Lake, L.W., McAdams, M.J. (2000). Free Product Recovery of Petroleum Hydrocarbon Liquids. *Groundwater monitoring and remediation*, 20 (3), 147–158.

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.

Manual: Guidelines for Water Reuse. (1992). U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C., EPA/625/R-92/004 (NTIS 93-222180).

Shpak, E., Ognianik, N., Negoda, Y., Golub, G. (2003). Assessment of military airbase impact on the environment. *Proceedings of the 4th International Conference CERECO'2003, Miskolc, Hungary*, 366–369.

Testa, S.M., Paczkowski, M.T. (1989). Volume determination and recoverability of free hydrocarbon. *Ground Water Monit. Rev.*, 9(1), 120-128.

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).

Van Genuchten, M.T. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of un-saturated soils. *Soil. Sci. Soc. Amer. J.*, 44(5), 892-898.

References

Abdul, A.S. (1992). A new pumping strategy for petroleum product recovery from contaminated hydrogeologic systems: Laboratory and field evaluations. *Ground Water Monit. Rev.*, 12(1), 105-114.

Charbeneau, R.J., Johns, R.T., Lake, L.W., McAdams, M.J. (2000). Free Product Recovery of Petroleum Hydrocarbon Liquids. *Groundwater monitoring and remediation*, 20 (3), 147-158.

Krzysz, L., Reznik, D. (2007). Technologies for cleaning the subsurface from petroleum contamination. *Production Ecology*, 10, 54-57.

Manual: Guidelines for Water Reuse. (1992). U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C., EPA/625/R-92/004 (NTIS 93-222180).

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.

Ognyanik, N.S., Paramonova, N.K., Briks, A.L., Gavriyuk, R.B. (2013). Ecological and hydrogeological monitoring of the areas of subsurface contamination with light petroleum products. Monograph. Kiev: Publishing house LAT & K.

Ognyanik, N.S., Shpak, E.N., Golub, G.I., Negoda, Yu.A., Nasedkina, O.I. (2002). Assessment of the ecological and geological state of the airbase territory in connection with soil and groundwater contamination with petroleum products. *Environmental ecology and life safety*, 5-6, 71-76.

Shpak, E., Ognyanik, N., Negoda, Y., Golub, G. (2003). Assessment of military airbase impact on the environment. *Proceedings of the 4th International Conference CERECO'2003, Miskolc, Hungary*, 366-369.

Shpak, O., Havryliuk, R., Lohvynenko, O. (2020). Research of subsurface contamination with gasoline within Boryspil airport using mathematical modelling. *Mineral resources of Ukraine*, 2, 49-53. DOI: <https://doi.org/10.31996/mru.2020.2.49-53>

Testa, S.M., Paczkowski, M.T. (1989). Volume determination and recoverability of free hydrocarbon. *Ground Water Monit. Rev.*, 9(1), 120-128.

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).

Van Genuchten, M.T. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of un-saturated soils. *Soil. Sci. Soc. Amer. J.*, 44(5), 892-898.

Надійшла до редколегії 09.10.21

O. Shpak, PhD (Geol.), Senior Researcher,
E-mail: shpak_lena@yahoo.com;
R. Havryliuk, PhD (Geol.), Senior Researcher,
E-mail: gavriyuk.ruslan@gmail.com;
O. Lohvynenko, Junior Researcher,
E-mail: lohvynenko.olha@gmail.com;
Institute of Geological Sciences of the National Academy of Sciences of Ukraine,
55-B O. Honchara Str, Kyiv, 01054, Ukraine

EFFICIENCY ASSESSMENT OF REMEDIATION ACTIONS IN THE SITE OF SUBSURFACE CONTAMINATION WITH PETROLEUM PRODUCTS WITHIN THE FUEL AND LUBRICANTS WAREHOUSE OF BORYSPIL AIRPORT

This paper is devoted to the topical problem of remediation of the subsurface contaminated with petroleum products. Subsurface contamination with petroleum products on the territory of the fuel and lubricants warehouse of Boryspil Airport in the form of the aviation kerosene lens has occurred for a long time. Remediation works on the removal of mobile petroleum products and contaminated groundwater, which were carried out at the research site, did not allow to completely eliminate contamination. To determine the efficiency of liquidation pumping of mobile petroleum products and groundwater, the volume and state of petroleum products in soil and their transformation under the influence of groundwater level fluctuations were assessed. Using the method we developed, the minimum value of the thickness of a petroleum product layer in a well, at which mobile petroleum products are absent in soil and liquidation pumping becomes inefficient, was calculated. According to the monitoring data and calculation of the kerosene volume in the lens, liquidation pumping on the contaminated area led to the stabilization of contamination spreading and reduction of the aviation kerosene lens area.

Keywords: remediation, geological environment, contamination, petroleum products, liquidation pumping

Е. Шпак, канд. геол. наук, ст. науч. сотр.,
E-mail: shpak_lena@yahoo.com;
Р. Гаврилюк, канд. геол. наук, ст. науч. сотр.,
E-mail: gavriyuk.ruslan@gmail.com;
О. Логвиненко, мл. науч. сотр.,
E-mail: lohvynenko.olha@gmail.com;
Институт геологических наук НАН Украины,
ул. О. Гончара, 55-Б, г. Киев, 01054, Украина

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕМЕДИАЦИИ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ НА ТЕРРИТОРИИ СКЛАДА ГОРЮЧЕ-СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ АЭРОПОРТА "БОРИСПОЛЬ"

Посвящено актуальной проблеме ремедиации геологической среды, загрязненной нефтепродуктами. Загрязнение геологической среды нефтепродуктами на территории склада горюче-смазочных материалов аэропорта "Борисполь" в виде линзы авиационного керосина существует длительное время. Восстановительные работы по извлечению мобильных нефтепродуктов и загрязненных грунтовых вод, которые проводились на участке исследований, не позволили полностью ликвидировать загрязнение. Для определения эффективности ликвидационных откачек мобильных нефтепродуктов и грунтовых вод оценены объем и состояние нефтепродуктов в грунте и их трансформация в процессе колебаний уровня грунтовых вод. По разработанной нами методике рассчитано минимальное значение мощности слоя нефтепродуктов в скважине, при котором мобильные нефтепродукты в грунте отсутствуют, и ликвидационные откачки становятся неэффективными. Согласно данным мониторинга и расчетов объема керосина в линзе, ликвидационные откачки на загрязненном участке привели к стабилизации распространения загрязнения и сокращению площади линзы авиационного керосина.

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