

<https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2023.2.273586>
УДК 502.5:(665.7:556.388)(477)

Оцінка впливу коливань рівня ґрунтових вод на трансформацію нафтопродуктового забруднення підземного середовища

О.М. Шпак*, Р.Б. Гаврилюк, О.І. Логвиненко, І.М. Запольський

Інститут геологічних наук НАН України, Київ, Україна

E-mail: shpak_lena@yahoo.com; gavrilyuk.ruslan@gmail.com; lohvyntenko.olha@gmail.com; igorzapol@gmail.com

* Автор для кореспонденції

Розглянуто актуальну проблему забруднення підземного середовища нафтопродуктами та його трансформації під впливом коливань рівнів ґрунтових вод. Проаналізовано світовий досвід дослідження впливу коливань рівнів ґрунтових вод на трансформацію нафтопродуктового забруднення, зокрема процеси перерозподілу мобільних нафтопродуктів, розчинення, випаровування та біодеградації вуглеводневих сполук, а також на різницю між дійсною потужністю шару мобільних нафтопродуктів у пористому середовищі та уявною потужністю нафтопродуктів у спостережній свердловині, що має важливе значення при плануванні ремедіаційних заходів.

Досліджено вплив коливань рівнів ґрунтових вод на трансформацію осередку нафтопродуктового забруднення підземного середовища на ділянці складу паливно-мастильних матеріалів аеропорту «Бориспіль». В результаті коливань рівня ґрунтових вод відбувались «розмазування» гасу в зоні аерації, що призвело до збільшення зони забруднення ґрунтів у вертикальному розрізі. Багаторічна амплітуда коливань рівня ґрунтових вод становить 2,4 м, зона забруднення ґрунтів нафтопродуктами також знаходиться в цих межах. Найбільша площа забруднення ґрунтових вод розчиненими нафтопродуктами спостерігалась при найнижчих рівнях ґрунтових вод. Найвищі концентрації розчинених нафтопродуктів (75,98 мг/дм³) зафіксовані в районі лінзи гасу. Поза лінзою гасу площинне поширення забруднення ґрунтових вод є обмеженим. Аналіз даних моніторингу свідчить про те, що на даний час забруднення підземного середовища нафтопродуктами на ділянці складу паливно-мастильних матеріалів аеропорту «Бориспіль» локалізовано, подальше його поширення не прогнозується. Рекомендовано проводити моніторинг процесів природного ослаблення осередку нафтопродуктового забруднення.

Ключові слова: підземне середовище; нафтопродукти; трансформація забруднення; коливання рівня ґрунтових вод.

Цитування: Шпак О.М., Гаврилюк Р.Б., Логвиненко О.І., Запольський І.М. Оцінка впливу коливань рівня ґрунтових вод на трансформацію нафтопродуктового забруднення підземного середовища. *Геологічний журнал*. 2023. № 2 (383). С. 40–57. <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2023.2.273586>

Citation: Shpak O.M., Havryliuk R.B., Lohvyntenko O.I., Zapolskiy I.M. 2023. Assessment of the impact of groundwater table fluctuations on the transformation of subsurface contamination with petroleum products. *Geologichnij zhurnal*, 2: 40–57. <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2023.2.273586>

© Видавець Інститут геологічних наук НАН України, 2023. Стаття опублікована за умовами відкритого доступу за ліцензією CC BY-NG-ND (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

© Publisher Institute of Geological Sciences of the NAS Ukraine, 2023. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

Вступ

Актуальність дослідження. Протягом останніх 50 років стрімкий розвиток нафто-хімічної промисловості у всьому світі призвів до численних аварійних розливів та витоків нафтопродуктів (НП), що значно вплинуло на довготривалу якість підземних вод. НП (бензин, гас, дизельне паливо тощо) є одними з найпоширеніших забруднювачів ґрунтів та підземних вод. Потрапляючи у підземне середовище, НП перерозподіляються шляхом міграції через зону аерації (ЗА) та насичену зону (НЗ) і взаємодії з підземними водами. Окремі компоненти НП є токсичними, що впливає на рослини, мікроорганізми, тварин і здоров'я людей. Це робить підземні води непридатними як для сільського господарства, так і для питного водопостачання (Cavelan et al., 2021). Оскільки НП зазвичай є складними багатокомпонентними сумішами з різними фізико-хімічними властивостями, це значно ускладнює відновлення забруднених НП ділянок, яке може бути довготривалим і дорогим. Краще розуміння керуючих факторів процесів трансформації НП-забруднення та відновлення забруднених ділянок стало важливою науковою метою останніх десятиліть (McAlexander, Sihota, 2019; Alazaiza et al., 2020; Ismail et al., 2020; Cavelan et al., 2021).

З метою покращення поведінки з осередками НП-забруднення та обмеження впливу забруднення на довкілля необхідно враховувати вплив сезонних коливань рівнів ґрунтових вод (РГВ), режиму опадів і температури на поведінку НП (Cavelan et al., 2021, 2022). Численні лабораторні і польові дослідження та модельні експерименти продемонстрували, що сезонні або спричинені відкачкою коливання РГВ впливають на міграцію та перерозподіл НП у підземному середовищі (Lenhard et al., 2017, 2019), швидкість розчинення компонентів (Teramoto, Chang, 2017), випаровування (Guo et al., 2019; Qi et al., 2020) та біодеградацію (Dobson et al., 2007; Gupta et al., 2019; Ismail et al., 2020). Дослідження показали, що коливання РГВ та/або зміни вологості ґрунту впливають на вертикальну дисперсію та перерозподіл компонентів НП у капілярній каймі, посилюючи їх вивільнення в ґрунтові води та повітря. Коливання РГВ суттєво впливають на різницю між уявною товщиною шару НП у спостереж-

ній свердловині та дійсною товщиною шару НП у підземному середовищі. Це ускладнює оцінку дійсної товщини та обсягу НП, що необхідно враховувати при проектуванні вилучення НП (Atteia et al., 2019; Deska, Осієра, 2013; Lenhard et al., 2017).

В Україні, де тривалий час існують численні осередки НП-забруднення підземного середовища, дослідження в цьому напрямі мають важливе значення при плануванні ремедіаційних заходів.

Метою статті є огляд літературних джерел стосовно впливу коливань РГВ на трансформацію НП-забруднення підземного середовища та оцінки впливу коливань РГВ на трансформацію осередку НП-забруднення на ділянці складу паливно-мастильних матеріалів (ПММ) аеропорту «Бориспіль».

Теоретичне обґрунтування та аналіз останніх досліджень і публікацій

На міграцію та розподіл НП у ґрунтах та підземних водах впливають різні параметри, а саме об'єм витоку НП, фізико-хімічні властивості НП, характеристики ґрунту та амплітуда і швидкість коливань РГВ.

Після витоків у підземне середовище мобільні НП під впливом гравітації просочуються вниз крізь пори ґрунту (рис. 1). Під час міграції через ЗА значна частина НП може бути захоплена капілярними силами у вигляді залишкових крапель та ганглій або сорбована зернами ґрунту. Багато компонентів НП характеризуються високим тиском пари і можуть безпосередньо випаровуватися в ґрунтовий газ, утворюючи потенційно шкідливі викиди летких органічних компонентів – ЛОК (Patterson, Davis, 2009). Якщо в підземне середовище потрапляє достатній об'єм НП, мобільні НП досягають РГВ та накопичуються на ньому (див. рис. 1). Далі під впливом плавучості та відносної проникності мобільні НП поширюються латерально в напрямку потоку ґрунтових вод, утворюючи лінзи в капілярній каймі. Мобільні та залишкові НП є джерелом потрапляння розчинених вуглеводнів з інфільтраційним потоком у ґрунтові води, утворюючи шлейф розчинених компонентів НП (див. рис. 1). Якщо вміст компонентів НП у ґрунтових водах перевищує їх номінальну розчин-

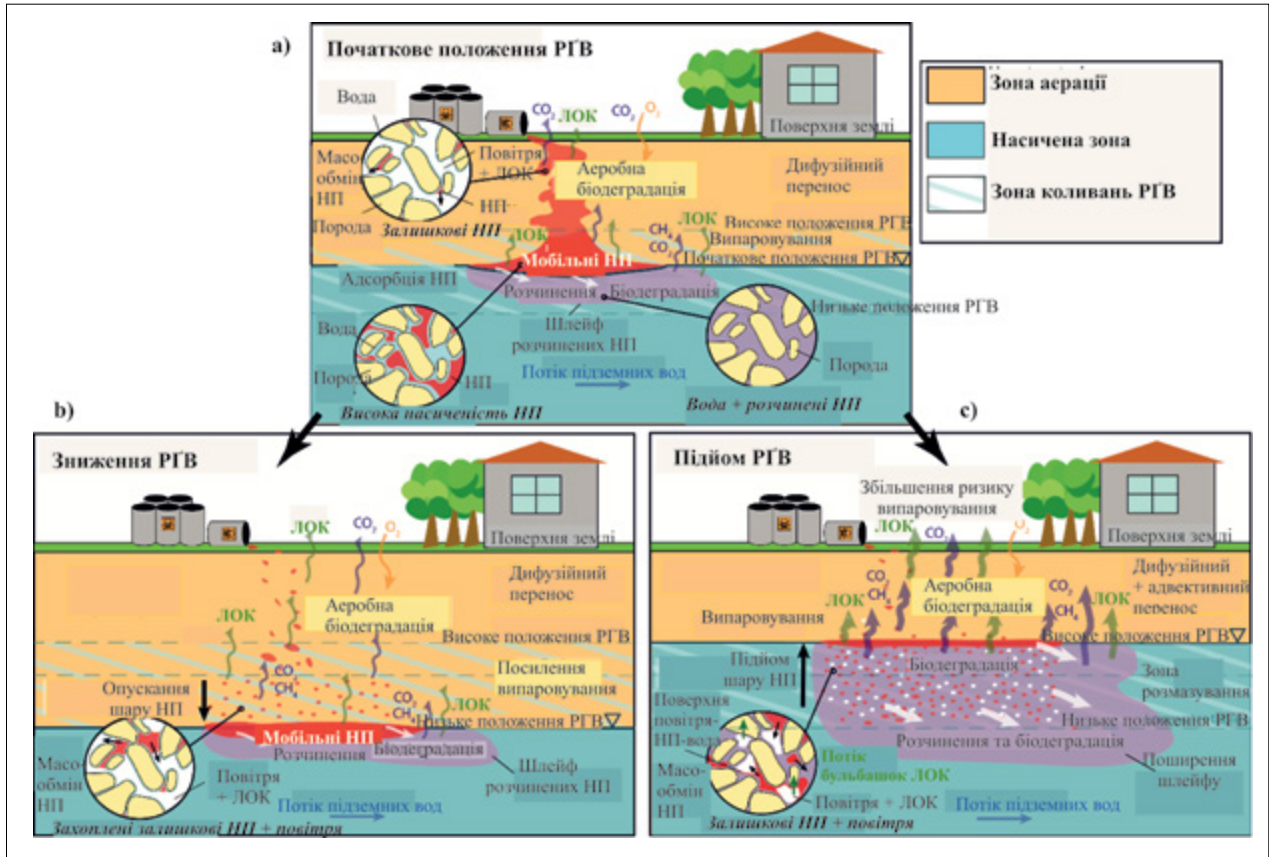


Рис. 1. Концептуальна модель трансформації НП-забруднення під час коливань РГВ: (а) початкове положення РГВ під час розливу НП; (б) зниження РГВ (сухий сезон); (с) підйом РГВ (вологий сезон) (Cavelan et al., 2021)

Fig. 1. Conceptual model showing LNAPL mobilization and transformation processes in a contaminated site during water table fluctuations: (a) initial water table level during the oil spill; (b) low water table level (dry season); (c) high water table level (wet season) (Cavelan et al., 2021)

ність, це можна сприймати як непряму ознаку наявності плівки або емульсії НП (Брикс та ін., 2015). Механічна дисперсія та дифузія в поєднанні з адвективним потоком ґрунтових вод призводять до поперечної міграції розчинених компонентів НП, збільшуючи ризики для об'єктів-реципієнтів (наприклад, джерел питного водопостачання), куди розвантажуються ґрунтові води. Прогнозування трансформації НП-забруднення підземного середовища у часі та відновлення забруднених ділянок є складною задачею (Newell et al., 1995; Lenhard et al., 2017).

Мікроорганізми ґрунту сприяють деградації компонентів НП. Мікробні популяції та процеси біодеградації вуглеводнів характеризуються різноманітністю та значно змінюються з глибиною залежно від окисно-відновних умов, доступності електронних акцепторів і складу НП (Garg et al., 2017; Шпак, Логвиненко, 2019; Sookhak Lari et al., 2019). Дослідження з визначення природи мікроорганізмів і механізмів,

що контролюють життєдіяльність бактерій, свідчать про значну роль біодеградації у природному ослабленні НП-забруднення (Rivett, Sweeney, 2019; Bruckberger et al., 2021).

В роботі (Cavelan et al., 2021) проаналізовано літературу переважно за останні два десятиліття, щоб покласти основу для розуміння динаміки процесів, які впливають на мобільність, розподіл та біодеградацію НП у підземному середовищі в контексті зміни клімату. Головним чином два фактори мають найбільший вплив на трансформацію НП-забруднення, а саме коливання РГВ і зміни температури. Більш глибоке розуміння ймовірних переходів у масштабах домінуючих процесів забезпечує основу для розробки стратегії поводження з осередками НП-забруднення та зменшення ризиків, пов'язаних із забрудненими НП ділянками.

У безнапірних водоносних горизонтах висота РГВ і капілярної кайми з часом може змінюватися з ряду причин. Такі кліматичні фактори,

як кількість опадів та зміна температурного режиму, призводять до зміни амплітуди коливань РГВ. У праці (Шевченко та ін., 2021) наведено дані про зміни циклічності РГВ, пов'язані з проявами глобального потепління, а в роботі (Шевченко та ін., 2019) йдеться про взаємоз'язок між зростанням температури теплового періоду, збільшенням випаровування та зниженням РГВ і підземного стоку, а також зменшенням живлення більш глибоких водоносних горизонтів та зниженням рівнів у них. Сезонні коливання РГВ відбуваються, коли живлення, поглинання рослинністю та забір підземних вод змінюються протягом року. Максимальні РГВ спостерігаються весною завдяки таненню снігу, зростанню рівня води в річках, частим опадам. Під час літньої посухи і відсутності дощів РГВ знижуються. В осінній період РГВ відновлюються через часті дощі (варто зазначити, що в Україні останні два десятиліття за осінній період РГВ відновлювались лише частково). Коливання РГВ можуть відбуватися протягом більш коротких періодів часу через зміни висоти водної поверхні у навколишніх водоймах та завдяки іншим метеорологічним і гідрофізичним чинникам. Зміни положення РГВ також можуть відбуватися впродовж більш тривалого періоду часу, якщо середні показники живлення перевищують середні показники відбору та природного розвантаження підземних вод, або навпаки. Також на положення РГВ впливають глобальні зміни клімату, що відображаються в багаторічних коливаннях – десяти і сторічних.

Колівання положення РГВ впливають на просторовий розподіл НП у водоносному горизонті. За умов «стаціонарного» РГВ процеси розчинення, випаровування та поперечна міграція розчинених компонентів НП є відносно обмеженими через малу вертикальну дисперсію та повільну дифузію розчинених компонентів НП (Gupta et al., 2019). Утримання і мобільність НП у насиченому пористому середовищі залежать від насиченості кожної фази (повітря, вода, НП) у ЗА. Ефект гістерезису, значною мірою викликаний коливаннями РГВ, часто виникає, оскільки мобільна фаза НП рухається вертикально разом із коливаннями РГВ (Gatsios et al., 2018). Насиченість мобільної фази НП є високою, а вода займає менші пори. Коли РГВ опускається,

мобільні НП одночасно рухаються вниз (див. рис. 1, *b*), що призводить до перерозподілу мобільних НП і зміни розподілу компонентів НП між різними фазами. Частина НП залишається в ЗА у вигляді переривчастих залишкових ганглій (Charbeneau, 2007). Найбільш леткі та розчинні сполуки НП можуть випаровуватися або вимиватися з інфільтраційними водами в ґрунтові водоносні горизонти та сприяти утворенню шлейфів розчинених вуглеводнів (Kechavarzi et al., 2005). Подальше підвищення РГВ (див. рис. 1, *c*) призводить до висхідного перерозподілу мобільних НП, при цьому окремі нерухомі захоплені краплі НП залишаються у НЗ (Charbeneau, 2007). Зону коливання РГВ і НП часто називають «зоною розмазування» (Cavelan et al., 2021). Під час послідовних фаз дренажу/вбирання вплив капілярного тиску, а також захоплення рідин у ЗА та НЗ постійно змінюють шляхи потоку води. Ці ефекти гістерезису, що супроводжуються додатковими взаємодіями НП–вода (ґрунтові та інфільтраційні води), сприяють мобілізації забруднень. Таким чином, сезонні або спричинені відкачкою коливання РГВ часто призводять до перерозподілу та поширення НП у зоні коливань РГВ (див. рис. 1), зменшення середньої насиченості НП та маси мобільних НП, що залишається після цього, та зниження дебіту вилучення НП (Newell, 1995; Charbeneau, 2007).

У відділі охорони підземних вод Інституту геологічних наук (ІГН) НАН України проведено лабораторні дослідження впливу коливань РГВ на стан і вміст НП у геологічному середовищі (Парамонова та ін., 2017а,б). Виконані експерименти показали, що при початковому підйомі і наступному опусканні РГВ товщина шару мобільного гасу зменшується (майже до повного зникнення). При підйомі РГВ зменшення потужності шару НП відбувається більш інтенсивно, через те що НП витрачається на створення нового шару з мобільним НП і нових капілярних зон, залишаючи після себе зацемлений водою НП. При зниженні РГВ товщина шару НП падає менш інтенсивно, оскільки шар НП витрачається на залишковий НП, який утримується ґрунтом після гравітаційного стікання. В роботі (Парамонова та ін., 2016) досліджено вплив коливання РГВ на формування залишкових та зацемлених НП.

Встановлено, що залишкова повнорідинна насиченість (вода+НП) і залишкові насиченості води та НП мають параболічну залежність від вихідних насиченостей води та НП при дренаванні із системи НП–вода. При природному підйомі РГВ НП (у даному випадку гас) не переноситься вище 10 см і заземляється в капілярній зоні; при первинному і наступних опусканнях РГВ після формування шару з мобільним НП залишкові насиченості води та НП будуть різними залежно від літологічного складу ґрунту, початкового насичення, інтервалу та часу опускання РГВ.

Утворення захоплених НП нижче РГВ призводить до зменшення мобільної фази НП у межах капілярної кайми. Це, ймовірно, зменшує міграцію мобільних НП до об'єктів-реципієнтів, розташованих нижче за потоком. Однак захоплення НП нижче РГВ збільшує вертикальну протяжність зони джерела (осередку) забруднення. Більше того, заземлення НП (у вигляді ізольованих крапель або ганглій) збільшує площу розподілу НП–вода, тим самим сприяючи посиленому розчиненню НП. Це може збільшити розмір шлейфу розчинених вуглеводнів та швидкість біодеградації через зростання доступності поживних речовин та електронних акцепторів (Cavelan et al., 2021).

Зміни положення РГВ також впливають на випаровування НП та викиди ЛОК (Guo et al., 2019; Qi et al., 2020). Послідовність підйому та опускання РГВ призводить до скорочення або подовження шляхів транспортування випарів від шлейфу розчинених НП до поверхні (див. рис. 1) і посилює перенесення маси до шлейфу розчинених НП та газової фази ґрунту. Коли РГВ знижується, ґрунтові води, збагачені розчиненими компонентами НП, частково дренаються (див. рис. 1, *b*). Розчинені компоненти НП у поровій воді поступово піддаються впливу повітряної фази, сприяючи перенесенню ЛОК у парову фазу (Qi et al., 2020). Це збільшує ризики викидів ЛОК і проникнення випарів, особливо для неглибоких водоносних горизонтів.

На експериментальній станції GISFI (Номескорт, Франція) було досліджено вплив інтенсивності коливань РГВ та різних режимів опадів на стан забруднених дизелем ґрунтів. Результати моніторингу, який проводився протягом 120 днів, продемонстрували, що збіль-

шення інтенсивності коливань РГВ посилює розповсюдження та захоплення НП у порах ґрунту, сприяючи процесам випаровування НП і, отже, збільшуючи поверхневі викиди токсичних газів. Однак вплив на процеси розчинення НП у результаті вивільнення мобільних та залишкових НП під дією опадів та коливань РГВ був обмеженим або, принаймні, компенсувався біодеградацією значної частини НП, розчинених у ґрунтових водах (Cavelan et al., 2022).

Порівняння експериментів з умовами стаціонарного РГВ та РГВ, який зазнає коливань, показало, що послідовні підвищення та опускання РГВ і подальший розподіл компонентів НП сильно змінюють швидкість біодеградації НП (Gupta et al., 2019; Ismail et al., 2020; Van De Ven et al., 2021). Експерименти (Rainwater et al., 1993) продемонстрували, що у колонії, яка піддавалась циклічним коливанням рівня води (діапазон коливань становив 15 см кожні 48 годин), спостерігалось на 15 % менше залишкового забруднення паливом через 9 тижнів, ніж у колонії зі статичним рівнем води. Коливання РГВ також тимчасово впливають на вологість ґрунту, змінюючи швидкість дифузії кисню в ЗА, а отже, процеси аеробної біодеградації. Це впливає на здатність до біологічного розкладання органічних забруднювачів і вивільнення ЛОК у повітря (Gupta et al., 2019; Van De Ven et al., 2021). У більш загальному плані послідовні коливання РГВ посилюють дифузійну кисню (Gupta et al., 2019), оновлення мікроелементів у ґрунті і водній товщі шляхом адвективного перенесення (Rezanezhad et al., 2014), евакуацію побічних продуктів реакції, накопичених під час біодеградації, функціональну різноманітність і рухливість мікроорганізмів (Zhou et al., 2015). Це природним чином посилює біохімічну та мікробну динаміку, що призводить до більш високої швидкості біодеградації розчинених, захоплених і залишкових органічних забруднювачів (Rezanezhad et al., 2014). Лабораторні експерименти (Dobson et al., 2007) продемонстрували, що коливання РГВ призвели до захоплення НП та повітря нижче поверхні ґрунтового водоносного горизонту, збільшення вертикальної протяжності зони осередку НП-забруднення (у 6,7 раза), збільшення біодеградаційної активності та посилення вимивання розчинених компонентів НП (у 10–20 разів). Отже, можна очікувати,

що, незважаючи на підвищення біодеградації, коливання РГВ у водоносних горизонтах, забруднених НП, можуть призвести до збільшення ризику забруднення об'єктів-рецепієнтів, розташованих нижче за потоком.

Низка наукових праць присвячена дослідженню впливу коливань РГВ на товщину шару НП у спостережній свердловині (Charbeneau, 2007; Deska, Осієра, 2013; Lenhard et al., 2017; Atteia et al., 2019). З метою проектування ремедіації забрудненого НП підземного середовища необхідно оцінити обсяг мобільних НП, який можна визначити на основі товщини НП, вимірної в свердловинах, пробурених у кількох точках забрудненої ділянки (Charbeneau, 2007). Проте товщина шару НП, виміряна у спостережній свердловині (уявна товщина), завжди відрізняється від товщини шару НП у пористому середовищі (дійсна товщина) (Deska, Осієра, 2013). Ця різниця залежить від характеристик ґрунту, кількості та фізико-хімічних властивостей НП (US EPA, 1996). Додатковими факторами, що впливають на різницю між уявною та дійсною товщиною шару НП, є коливання РГВ та їх швидкість (Deska, Осієра, 2013). Під час коливань РГВ збільшується об'єм ґрунту, забрудненого НП, а отже, змінюється співвідношення між уявною та дійсною товщиною шару НП, що може призвести до неточної оцінки дійсної товщини НП у геологічному середовищі (Deska, Осієра, 2013).

Матеріали та методи

Еколого-геологічні дослідження, що проведені на забрудненій ділянці складу ПММ аеропорту «Бориспіль», включали моніторинг осередку НП-забруднення підземного середовища із замірами рівнів води та НП, відбір проб води та ґрунтів, оцінку об'єму і стану знаходження НП у ґрунті та їх трансформації під впливом коливань РГВ.

Моніторинг РГВ та рівнів НП виконано з різною періодичністю: у 2014 р. – кожного місяця, у 2015 та 2016 рр. – один раз на 3 місяці, протягом 2017–2018 рр. – два рази на рік, у 2019 р. – один раз на рік. Відбір проб ґрунтових вод здійснено у 2014 р. один раз на рік, у 2015–2016 рр. – тричі на рік, у 2017–2018 рр. – один раз на рік. Відбір проб води проведено за допомогою насоса Комовського.

Вміст розчинених НП у пробах води визначено ультрафіолет-спектрофотометричним методом із використанням автоматичного аналізатора «Мікран» (виробник ТОВ НВП «ЕКОНІКА», м. Одеса) у лабораторії відділу охорони підземних вод ІГН НАН України. Діапазон вимірювання аналізатора «Мікран» становить 0,01–900,0 мг/л. Границя сумарної відносної похибки $\delta = 20\%$ при довірчій ймовірності $P = 0,95$.

Інформація про місячні суми атмосферних опадів за даними метеостанції «Бориспіль» за період 1994–2020 рр. була надана Українським гідрометеорологічним інститутом.

Створена база даних (БД) об'єкта досліджень за допомогою застосування Rock Works на базі модуля СУБД MS Access (<https://www.rockware.com/product/rockworks/>). БД включає такі параметри, як абсолютні відмітки поверхні землі, літологія, стратиграфія, глибини залягання рівнів НП та РГВ, вміст НП у ґрунті та підземних водах, кількість опадів тощо у вигляді таблиць. Створена БД була використана для побудови еколого-гідрогеологічних розрізів, карт та графіків.

Об'єкт досліджень

Ділянка досліджень складу ПММ міжнародного аеропорту «Бориспіль» розташована на північній околиці м. Бориспіль (Київська область).

У геоморфологічному відношенні територія досліджень належить до другої надзаплавної тераси р. Дніпро Придніпровської рівнини та являє собою межиріччя р. Дніпро та його лівої притоки р. Трубіж. За характером рельєфу територія є слабохвилястою рівниною із загальним нахилом поверхні до долини р. Трубіж. Рельєф ділянки складу ПММ та прилягаючих територій, що зазнали впливу НП-забруднення, рівнинний з абсолютними відмітками висот 116–118 м.

Кліматичні умови території характеризуються м'якою зимою з частими відлигами і теплим літом. Середньорічна температура становить $+7\text{ }^{\circ}\text{C}$. Найбільш теплі місяці – липень-серпень, холодні – січень-лютий. Середньорічна кількість опадів коливається від 400 до 829 мм.

Верхня частина геологічного розрізу, до якої приурочено НП-забруднення, складена шаруватою товщею четвертинних осадових

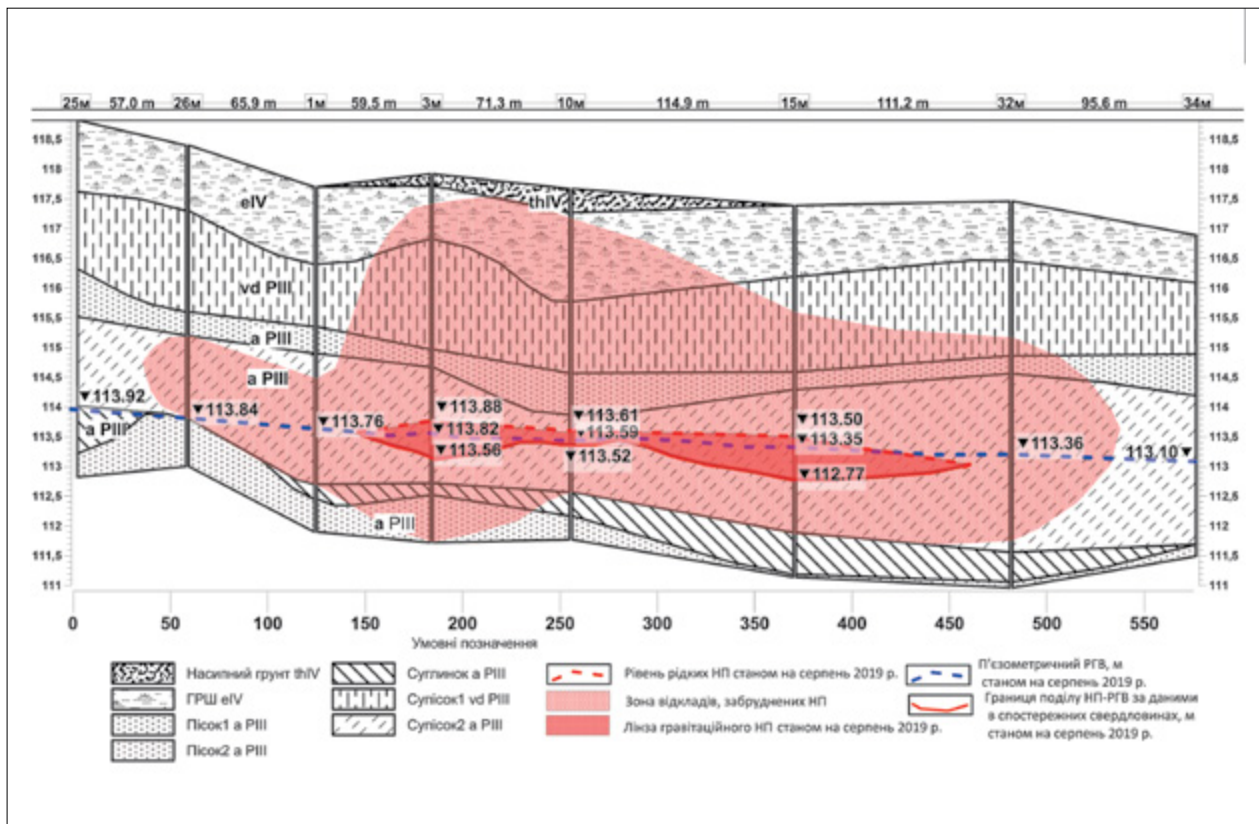


Рис. 2. Еколого-гідрогеологічний розріз ділянки складу ПММ аеропорту «Бориспіль» станом на серпень 2019 р.

Fig. 2. Ecological and hydrogeological section of the site of the warehouse of fuels and lubricants of the Boryspil airport as of August 2019

відкладів горизонтального залягання, стратиграфічно досить витриманих по простяганню (рис. 2).

Ґрунтово-рослинний шар представлений сучасними елювіальними відкладами (eIV) потужністю до 1,1 м. Підстеляється він верхньочетвертинними еолово-делювіальними відкладами (vdIII), складеними лесовидними палево-жовтими макропористими супісками потужністю 1–1,5 м. Нижче залягають алювіальні верхньочетвертинні відклади (aIII), верхня частина яких до глибини 5,5–6,0 м являє собою піщано-супіщано-суглинисту товщу. Верхня частина відкладів на більшій території представлена прошарком піску потужністю 0,3–0,5 м дрібнозернистого жовто-сірого, іноді бурого через озалізнення, найчастіше глинистого. Основний шар товщі – це супісок жовто-сірий, з піскуватими прошарками, з включенням карбонатів розміром до 2–3 см, місцями озалізнений, потужністю 1,5–3,0 м. У нижній частині товщі супісок замінюється

суглинком середнім, тугопластичним, темно-коричневим, озалізненим, потужністю 0,2–0,4 м. Описана товща підстиляється верхньочетвертинними алювіальними пісками другої надзаплавної тераси Дніпра (aIII), дрібнозернистими, жовто-сірими, в верхній частині глинистими, озалізненими, водонасиченими, які розповсюджені, ймовірно, до глибини 50 м.

Ґрунтовий водоносний горизонт вміщується в алювіальній піщано-супіщано-суглинистій товщі (aIII). Глибини залягання РГВ становлять від 1,5 до 4,2 м, рівневий режим тісно пов'язаний із режимом атмосферних опадів, унаслідок інфільтрації яких відбувається живлення горизонту. Зниження поверхні ґрунтових вод спостерігається в східному напрямку, із нахилом 0,0018 (рис. 3).

Завдяки неглибокому залягання водоносний горизонт широко використовується місцевим населенням та окремими підприємствами для побутового водопостачання за допомогою колодязів та свердловин.

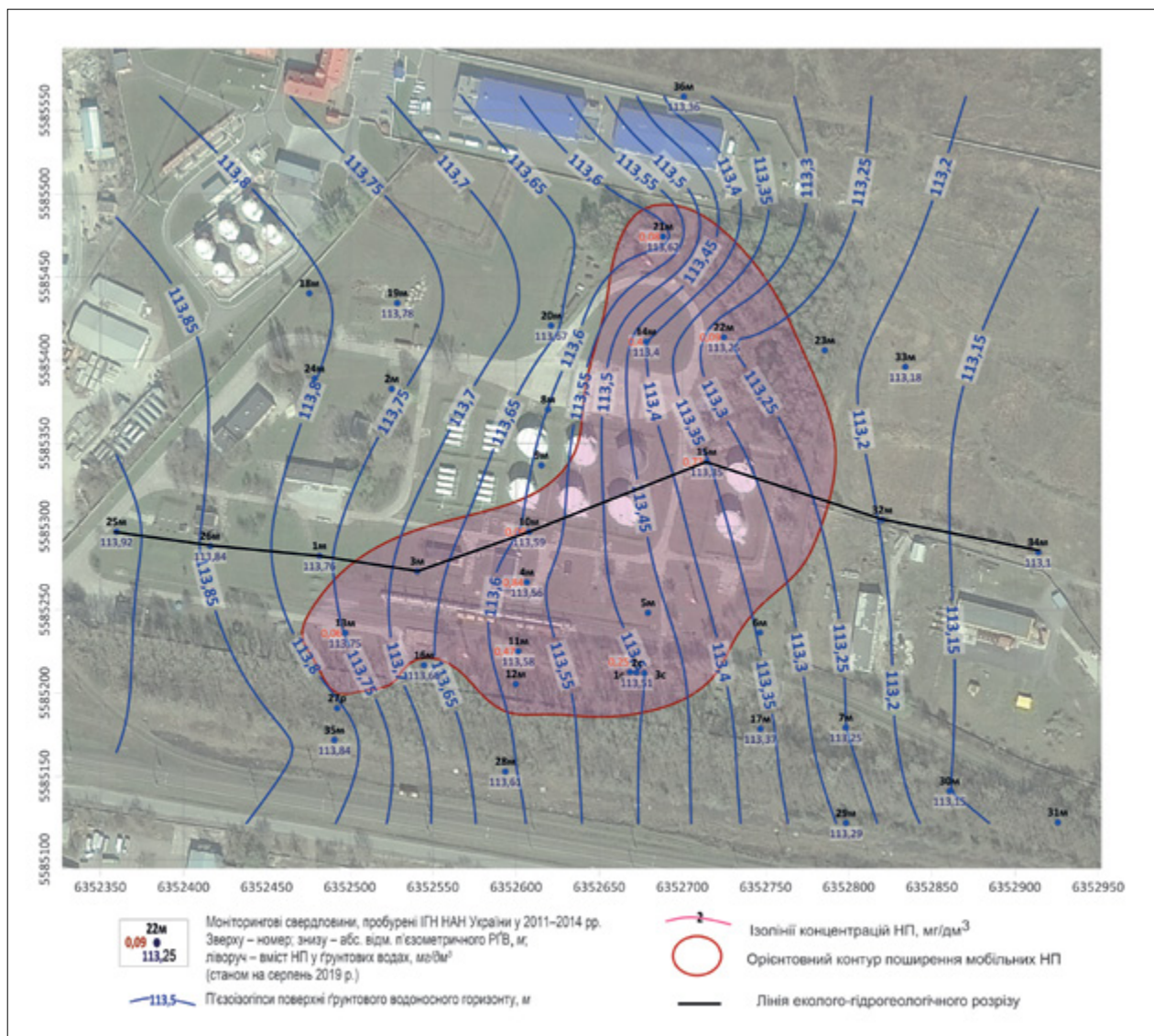


Рис. 3. Карта гідроізогінс ґрунтового водоносного горизонту станом на серпень 2019 р.

Fig. 3. The map of groundwater contours as of August 2019

Дослідження впливу коливань РґВ на трансформацію осередку НП-забруднення на ділянці складу ПММ аеропорту «Бориспіль»

Історія досліджень. Забруднення підземного середовища НП у районі складу ПММ аеропорту «Бориспіль» у вигляді лінзи авіаційного ґасу вперше було виявлено у 1998 р. У результаті витоків НП відбувалось їх просочування в ЗА, представлену проникними лесовидними та алювіальними супісками і пісками, та подальша інфільтрація в напрямку ґрунтових вод. Потужність шару НП у свердловинах сягала 0,9 м,

сумарний об'єм НП, які накопичились на поверхні ґрунтових вод, становив 1725 м³ (Наукові..., 2015).

Протягом 1999–2000 рр. АП «Укрбудвишукування» та ТОВ «Еко-Плюс» було розроблено проект вилучення підземних вод, забруднених НП, для запобігання їх витоку за межі території складу ПММ аеропорту «Бориспіль» та закладено мережу ліквідаційних свердловин. Система відкачування водно-НП суміші, яка налічувала 42 свердловини (35 ліквідаційних (св. 1–35) та п'ять спостережних свердловин), експлуатується з 2001 р. У 2007 р. додатково було закладено сім ліквідаційних



Рис. 4. Схема розміщення моніторингових свердловин та поширення мобільних НП станом на листопад 2012 р.

Fig. 4. Scheme of monitoring well network and spreading of mobile petroleum products as of November 2012

свердловин (св. Н1–Н7) на ділянках максимального НП-забруднення підземного середовища.

У 2011 р. ІГН НАН України розпочато дослідження осередку НП-забруднення ділянки складу ПММ. Протягом 2011–2012 рр. пробурено моніторингові св. 1м–17м, які, за винятком св. 7м, розташовані в межах складу ПММ. Додатково для визначення зони впливу ліквідаційної свердловини пробурено промінь із трьох спостережних свердловин (св. 1с–3с). Станом на листопад 2012 р. було підтверджено наявність шару мобільних НП майже в усіх ліквідаційних свердловинах (рис. 4).

З метою оконтурення осередку забруднення в 2014 р. додатково було закладено 19 свердловин (св. 18м–26м, 27р, 28м–36м), що дозволило із достатньою точністю встановити межі поширення мобільних НП та забруднення ґрунтів, обладнати моніторингову мережу. За даними обстеження було встановлено значне збільшення площі забруднення – до 7,4 га. Причиною цього збільшення було зниження РГВ, що призвело до вивільнення защемленого газу в ґрунті (Наукові..., 2015).

В подальшому проведено моніторингові дослідження за наявністю шару мобільних НП, рівневого режиму лінзи авіаційного газу та

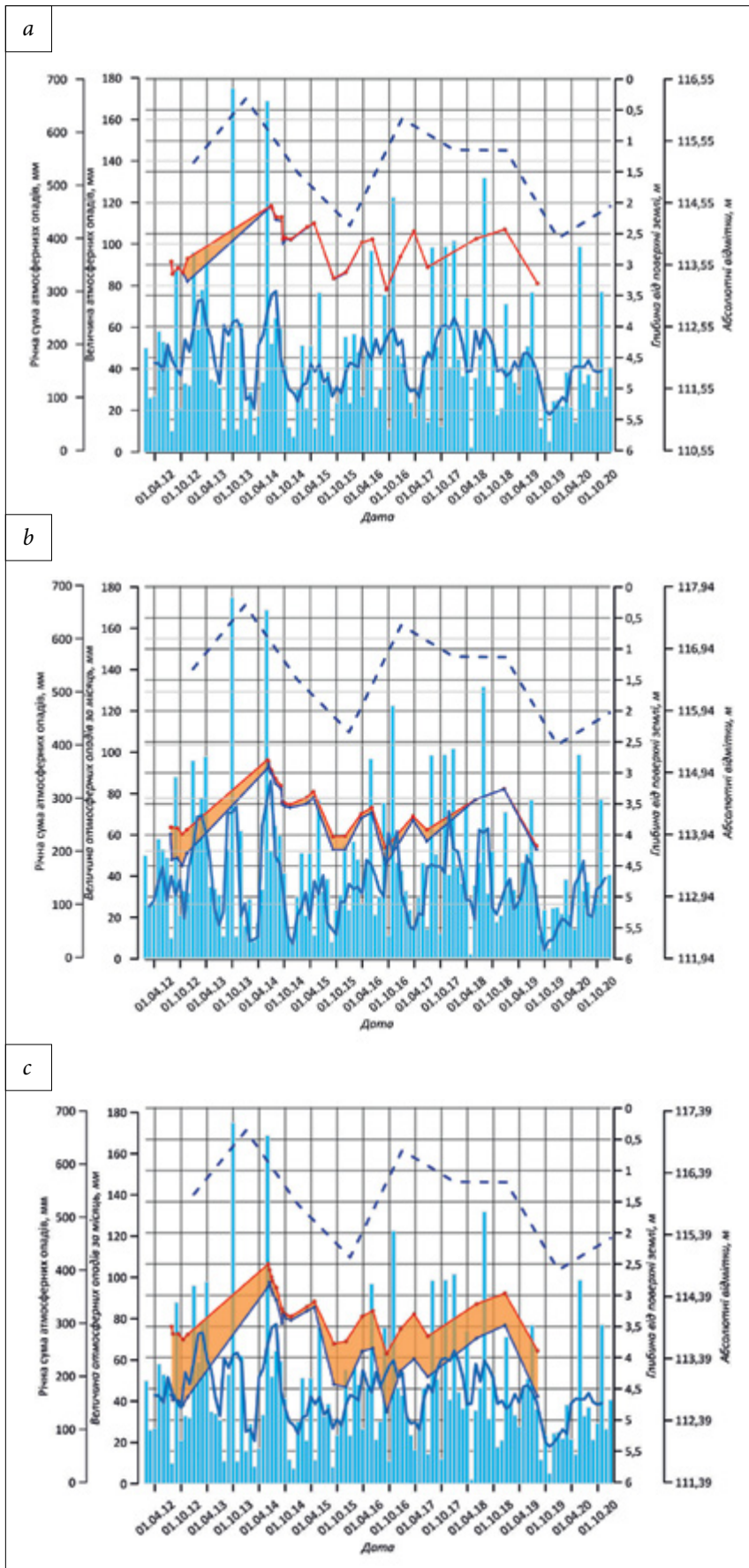


Рис. 5. Зміни товщини шару мобільних НП при зміні положення РГВ та кількості атмосферних опадів у свердловинах: а) св. 7; б) св. 13; в) св. 15

Fig. 5. Changes in the thickness of a mobile petroleum product layer due to groundwater table fluctuations and different atmospheric precipitation amount in the wells: a) well No. 7; b) well No. 13; c) well No. 15

грунтових вод, зміни хімічного складу ґрунтових вод у зв'язку із НП-забрудненням.

Ліквідаційні відкачки в зоні осередку забруднення виконано у період 2001–2019 рр. За час проведення ліквідаційних відкачок вилучено та очищено 35 267 м³ забрудненої води та 353,81 м³ мобільних НП. З 2019 р. ліквідаційні відкачки припинено в зв'язку з досягнутою мінімізацією загрози розповсюдження забруднення, оскільки максимально можливий об'єм НП було вилучено і застосований метод втратив ефективність (Шпак та ін., 2022). Потреби у ліквідаційних відкачках наразі не існує. Однак осередок НП-забруднення залишається, і хоча просування забруднення в горизонтальному плані не відбувається, але можливе збільшення зони забруднення по вертикалі (в розрізі) внаслідок зростання амплітуди коливань РГВ або його зниження.

Вплив коливань РГВ на зміну потужності шару НП у ґрунті та спостережній свердловині. Як було детально описано вище, в результаті коливань РГВ відбуваються процеси, що призводять до збільшення зони забруднення ґрунтів. Ці процеси дуже добре спостерігаються на дослідному об'єкті.

Шар мобільних НП у ґрунті було зафіксовано в усіх свердловинах протягом 2012 р. (рис. 5). У св. 13 та 15 шар мобільних НП спостерігався впродовж 2014–2017 рр. та у 2019 р. (див. рис. 5, *b, c*). З жовтня 2013 р. по жовтень 2014 р. в усіх свердловинах та у 2018 р. в окремих свердловинах (св. 7 і 13) НП переходив у защемлений стан у результаті підйому РГВ і практично був відсутній у спостережних свердловинах (див. рис. 5, *a, b*).

За період спостережень шар мобільного гасу майже зникав при підйомах РГВ і частково відновлювався при зниженнях РГВ (див. рис. 5). При цьому відбувалось додаткове забруднення ЗА, оскільки при кожному підйомі РГВ та гасу формувалась нова капілярна зона. Наприклад, у червні 2014 р. спостерігалось найбільше підняття РГВ за весь період спостережень, що призвело до значного зменшення товщини шару мобільного гасу або його зникнення в спостережних свердловинах, тобто перехід гасу в защемлений стан. З 11 вересня 2012 р. по 12 червня 2014 р. шар гасу скоротився від 3 разів і більше. Наприклад, у св. 15 потужність шару гасу зменшилась з 1,07 до 0,20 м, тобто в 5,35 раза

(див. рис. 5, *c*). При подальшому зниженні РГВ шар гасу відновлювався, але не повною мірою. Найбільша його потужність спостерігалась у вересні 2016 р. при найбільш низьких РГВ за час спостережень і у св. 15м становила 0,93 м, або 83 % від максимальної потужності у 2012 р. Близько 13 % гасу залишилися захопленими ґрунтом. Такі ж закономірності підтверджуються даними інших свердловин. Найбільші потужності мобільного гасу спостерігались на відмітках 113–114,2 м; на цих глибинах, ймовірно, і формувався основний об'єм лінзи гасу. При наступних підняттях РГВ потужності гасу зменшувались.

За час спостережень багаторічна амплітуда коливань РГВ становила 2,4 м. Зона забруднення також знаходилась в цих межах. Шар вільного гасу, що відновлювався, сягав 112,5–114,5 м. У результаті коливань РГВ відбувалось «розмазування» гасу в ЗА і забруднення додаткового об'єму ґрунту. Починаючи з 2015 р. у зв'язку з поступовим зниженням РГВ шар гасу частково відновлювався.

Вплив коливань РГВ на розчинення НП у ґрунтових водах. За час спостережень певних закономірностей в зміні концентрацій розчинених НП у ґрунтових водах не відзначено, але намітилися деякі тенденції. Найвищі концентрації розчинених НП зафіксовані в районі лінзи гасу – максимальні значення до 75,98 мг/дм³. За межами лінзи гасу поширення забруднення ґрунтових вод є досить обмеженим по площі із згасанням концентрацій розчинених НП. На відстані близько 100 м від межі поширення лінзи гасу розчинені НП у воді не виявлені (рис. 6). Найменша відстань, на яку розповсюджується забруднення ґрунтових вод, простежується в південному напрямку, що може бути пов'язане з наявністю менш проникних ґрунтів і загальною спрямованістю ґрунтового потоку у східному напрямку. У вересні 2016 р. при найнижчих РГВ спостерігалась найбільша площа поширення розчинених НП (див. рис. 6).

Найвищі концентрації розчинених НП у воді були зафіксовані у березні 2015 р. при високих відмітках РГВ. У межах лінзи гасу концентрації НП становили до 75,98 мг/дм³ (св. 12м), за її межами – до 6,99 мг/дм³ (св. 26м). Найнижчі концентрації НП зафіксовані у березні 2016 р. при зниженнях РГВ до 20,32 мг/дм³

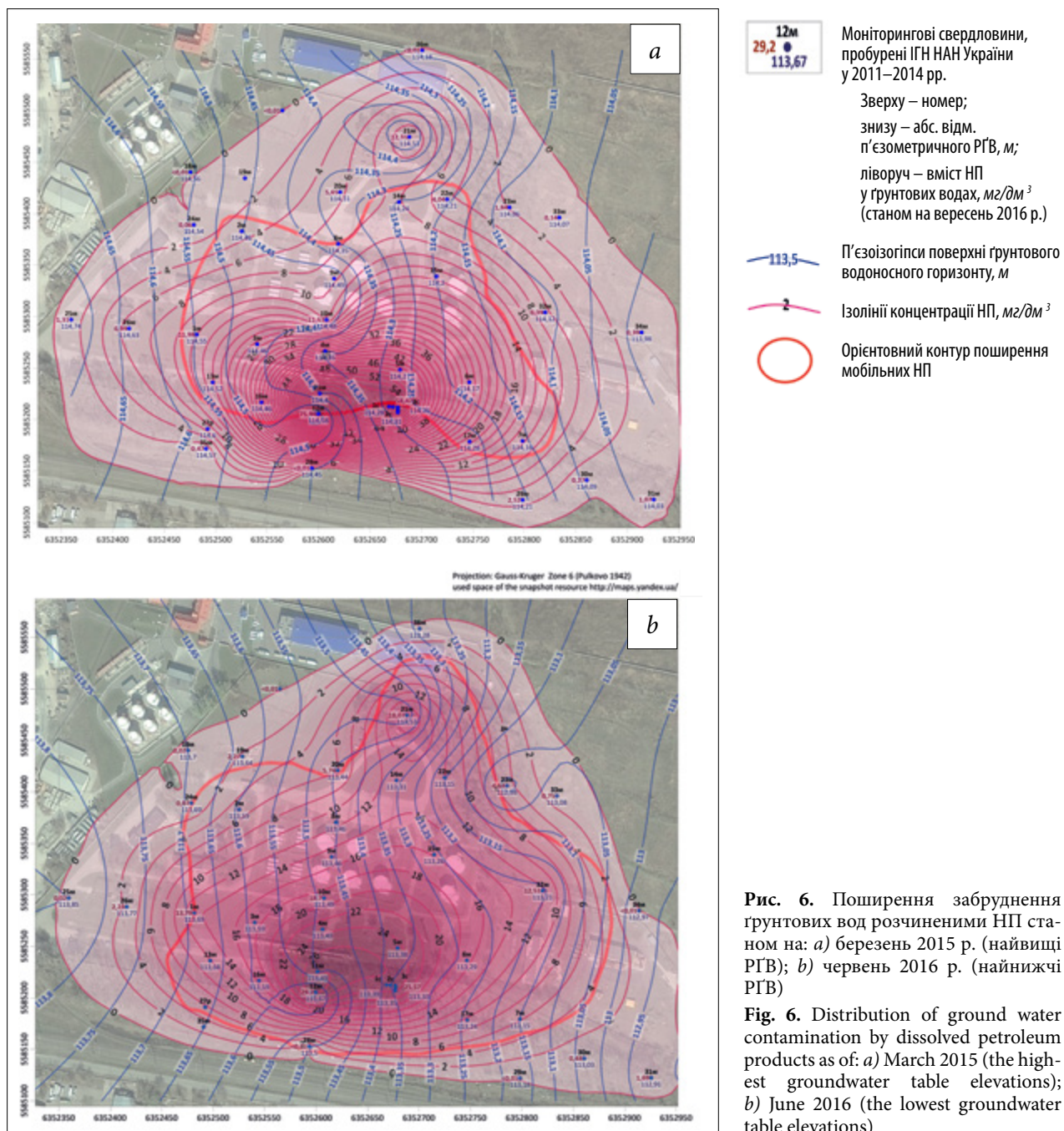


Рис. 6. Поширення забруднення ґрунтових вод розчиненими НП станом на: *a*) березень 2015 р. (найвищі РГВ); *b*) червень 2016 р. (найнижчі РГВ)

Fig. 6. Distribution of ground water contamination by dissolved petroleum products as of: *a*) March 2015 (the highest groundwater table elevations); *b*) June 2016 (the lowest groundwater table elevations)

у межах лінзи газу (св. 20м) і до 1,65 мг/дм³ за її межами (св. 26м). Станом на 2018 р. концентрації розчинених НП у межах лінзи газу становили до 46,51 мг/дм³ (св. 20м) і до 12,87 мг/дм³ (св. 26м) поза межами лінзи.

У деяких свердловинах (св. 31м, 34м) простежується залежність збільшення концентрацій розчинених НП у ґрунтових водах від підйому РГВ (рис. 7). У св. 20м, 21м, 23м, 30м та 33м спостерігається протилежна закономірність – з підняттям РГВ концентрації розчинене-

них НП зменшуються (див. рис. 7). Але для більшості свердловин певної закономірності не простежується. За період спостережень площа забруднених розчиненими НП ґрунтових вод не змінилась. Ймовірно, це пов'язано з сорбційними властивостями ґрунтів.

Аналіз даних моніторингу дозволяє припустити, що забруднення, в його сучасних масштабах, локалізовано і подальшого його поширення не відбудеться за умови виключення нових втрат і надходжень НП у підземне середовище.

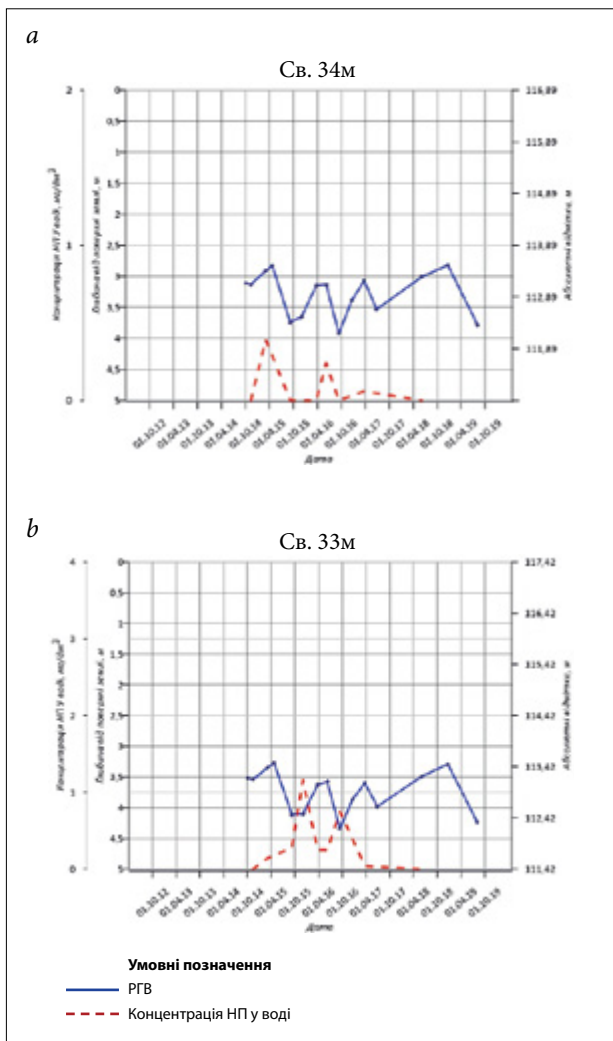


Рис. 7. Залежність концентрацій розчинених НП від коливань РГВ у св. 34м та 33м

Fig. 7. The relationship between dissolved hydrocarbon concentrations and water table fluctuations in wells No. 34m and No. 33m

Процеси, що відбуваються в межах осередку залишкового НП-забруднення, можна віднести до природного самоочищення, однак для уточнення цього твердження варто в подальшому проводити регулярний моніторинг з відбором проб ґрунту і води та визначенням вмісту НП у них.

Висновки

Аналіз сучасного стану досліджень щодо впливу кліматичних факторів на трансформацію НП-забруднення підземного середовища свідчить про те, що коливання РГВ суттєво впливають на процеси перерозподілу мобільних НП,

розчинення, випаровування та біодеградацію вуглеводнів, сприяючи поширенню НП-забруднення та збільшенню ризику забруднення об'єктів-рецепієнтів. Коливання РГВ також впливають на різницю між уявною товщиною шару НП у спостережній свердловині та дійсною товщиною шару НП у підземному середовищі. Це ускладнює оцінку дійсної товщини та обсягу НП, що необхідно враховувати при проектуванні вилучення НП.

Оцінено вплив коливань РГВ на трансформацію осередку НП-забруднення на ділянці складу ПММ аеропорту «Бориспіль». В результаті коливань РГВ відбувались процеси, які призводили до збільшення зони забруднення ґрунтів. У період спостережень шар мобільного гасу майже зникав при підйомах РГВ і відновлювався при їх зниженні. При цьому відбувалось додаткове забруднення ЗА, оскільки при кожному підйомі РГВ та гасу формувалась нова капілярна зона. Практично у всіх спостережних свердловинах шар мобільного гасу був зафіксований протягом 2012 р., а потім до 2014 р. у результаті підйому РГВ зникав, переходячи у защемлений стан. Починаючи з 2015 р. у зв'язку з поступовим зниженням РГВ шар мобільного гасу частково відновлювався в окремих свердловинах. Багаторічна амплітуда коливань РГВ становила 2,4 м, зона НП-забруднення підземного середовища також знаходилась у цих межах. Таким чином, у результаті коливань РГВ відбувалось «розмазування» гасу в ЗА і забруднення додаткового об'єму ґрунту.

За час спостережень найбільші концентрації розчинених НП у ґрунтових водах (до 75,98 мг/дм³) зафіксовані в районі лінзи гасу. За межами лінзи гасу поширення забруднення ґрунтових вод є незначним – на відстані близько 100 м від лінзи гасу розчинені НП у воді не виявлені. У вересні 2016 р. при найбільш низьких РГВ спостерігалась найбільша площа забруднення ґрунтових вод розчиненими НП. Найвищі концентрації розчинених НП у воді були відмічені у березні 2015 р. при високих відмітках РГВ: у межах лінзи гасу концентрації НП становили до 75,98 мг/дм³, за її межами – до 6,99 мг/дм³. Найнижчі концентрації НП зафіксовані у березні 2016 р. при зниженні РГВ до 20,32 мг/дм³ у межах лінзи гасу і до 1,65 мг/дм³ за її межами.

Аналіз даних моніторингу осередку НП-забруднення на ділянці складу ПММ аеропорту «Бориспіль» дозволяє припустити, що на даний час НП-забруднення підземного середовища локалізовано і подальшого його поширення не відбудеться за умови виключення нових втрат і надходжень НП у підземне середовище. В подальшому варто проводити

регулярний моніторинг процесів природного ослаблення осередку НП-забруднення.

В роботі висвітлено результати досліджень, профінансованих за бюджетною програмою «Геологічні дослідження для пом'якшення та адаптації до зміни клімату в Україні» (КПКВК 6541230-2).

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Брикс А.Л., Гаврилюк Р.Б. Трансформація скупчень легких нафтопродуктів, забруднюючих геологічне середовище. *Вісн. Харків. нац. ун-ту ім. В.Н. Каразіна. Сер. Геологія, географія, екологія*. 2015. № 1157. С. 116–123.
- Наукові основи ліквідації забруднення геологічного середовища легкими нафтопродуктами. Звіт про науково-дослідну роботу, № держреєстрації 0115U005445. Київ: ІГН НАН України, 2020. 224 с.
- Парамонова Н.К., Голуб Г.И., Запольский И.Н., Логвиненко О.И. Лабораторные исследования влияния колебания уровня грунтовых вод на состояние и содержание легких нефтепродуктов в геологической среде. Ст. 1. Проведение опыта с первоначальным подъемом уровня грунтовых вод после формирования слоя с легким нефтепродуктом. *Геол. журн.* 2017а. № 3 (360). С. 42–54.
- Парамонова Н.К., Голуб Г.И., Запольский И.Н., Логвиненко О.И. Лабораторные исследования влияния колебания уровня грунтовых вод на состояние и содержание легких нефтепродуктов в геологической среде. Ст. 2. Опыт с первоначальным опусканием напора воды после формирования слоя с мобильным керосином. *Геол. журн.* 2017б. № 4 (361). С. 77–87.
- Парамонова Н.К., Голуб Г.И., Запольский И.Н., Логвиненко О.И., Негода Ю.О. Влияние колебания уровня грунтовых вод на формирование остаточных и защемленных легких нефтепродуктов. *Геол. журн.* 2016. № 1 (354). С. 112–124.
- Шевченко О.Л., Скорбун А.Д., Чарний Д.В. Підпорядкованість коливань рівнів ґрунтових вод в басейні р. Південний Буг кліматичним змінам. *Вісн. Одес. нац. ун-ту. Сер. Географічні та геологічні науки*. 2021. Т. 26, вип. 2 (39). С. 175–194. [https://doi.org/10.18524/2303-9914.2021.2\(39\).246202](https://doi.org/10.18524/2303-9914.2021.2(39).246202)
- Шевченко А.Л., Осадчий В.И., Чарний Д.В. Изменения режима, баланса и ресурсов подземных вод Полесья и лесостепи Украины под влиянием глобального потепления. *Вучонья записки Бреськага універсітета*. 2019. Вып. 15, ч. 2. С. 117–128.
- Шпак О.М., Гаврилюк Р.Б., Логвиненко О.И. Оцінка ефективності ремедіації геологічного середовища на території складу паливно-мастильних матеріалів аеропорту «Бориспіль». *Вісн. Київ. нац. ун-ту. Сер. Геологія*. 2022. № 1 (96). С. 76–82.
- Шпак Е.Н., Логвиненко О.И. Исследование природного самоочищения подземной среды, загрязненной нефтепродуктами. *Мінер. ресурси України*. 2019. № 3. С. 49–51.
- Alazaiza M.Y.D., Ramli M.H., Coptu N.K., Sheng T.J., Aburas M.M. LNAPL saturation distribution under the influence of water table fluctuations using simplified image analysis method. *Bull. Eng. Geol. Environ.* 2020. Iss. 79. P. 1543–1554. <https://doi.org/10.1007/s10064-019-01655-3>
- Atteia O., Palmier C., Schafer G. On the influence of groundwater table fluctuations on oil thickness in a well related to an LNAPL contaminated aquifer. *Journal of Contaminant Hydrology*. 2019. Vol. 223. 103476. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169772219300014>
- Bruckberger M.C., Gleeson D.B., Bastow T.P., Morgan M.J., Walsh T., Rayner J.L., Davis G.B., Puzon G.J. Unravelling Microbial Communities Associated with Different Light Non-Aqueous Phase Liquid Types Undergoing Natural Source Zone Depletion Processes at a Legacy Petroleum Site. *Water*. 2021. Iss. 13 (7). 898.
- Cavelan A., Golfier F., Colombano S., Davarzani H., Deparis J., Faure P. A critical review of the influence of groundwater level fluctuations and temperature on LNAPL contaminations in the context of climate change. *Science of the Total Environment*. 2021. 806. 150412. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150412>
- Cavelan A., Golfier F., Colombano S., Oltean C. How climate change could affect our contaminated soils and groundwater tables: example of light petroleum contaminants (LNAPLs). 2022. https://www.researchgate.net/publication/365225085_How_climate_change_could_affect_our_contaminated_soils_and_groundwater_tables_example_of_light_petroleum_contaminants_LNAPLs
- Charbeneau R. LNAPL Distribution and Recovery Model. Vol. 1: Distribution and Recovery of Petroleum Hydrocarbon Liquids in Porous Media. 2007. API Publication 4760. https://www.api.org/-/media/files/ehs/clean_water/ground_water_quality/lnapl/4760-v1.pdf
- Deska I., Ociepa E. Impact of the water table fluctuations on the apparent thickness of light non-aqueous phase liquids. *Ecol. Chem. Eng.* 2013. A. 20 (7–8). P. 771–778. DOI: 10.2428/ecea.2013.20(07)070

- Dobson R., Schroth M.H., Zeyer J. Effect of water-table fluctuation on dissolution and biodegradation of a multi-component, light nonaqueous-phase liquid. *Journal of Contaminant Hydrology*. 2007. Vol. 94, iss. 3–4. P. 235–248.
- Garg S., Newell C.J., Kulkarni P.R., King D.C., Adamson D.T., Renno M.I., Sale T. Overview of natural source zone depletion: Processes, controlling factors, and composition change. *Groundwater monitoring & remediation*. 2017. Vol. 37, iss. 3. P. 62–81. <https://doi.org/10.1111/gwrm.12219>
- Gatsios E., García-Rincón J., Rayner J.L., McLaughlan R.G., Davis G.B. LNAPL transmissivity as a remediation metric in complex sites under water table fluctuations. *Journal of Environmental Management*. 2018. Vol. 215. P. 40–48. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.03.026>
- Guo Y., Holton C., Luo H., Dahlen P., Johnson P.C. Influence of Fluctuating Groundwater Table on Volatile Organic Chemical Emission Flux at a Dissolved Chlorinated Solvent Plume Site. *Groundwater Monitoring & Remediation*. 2019. Vol. 39. P. 43–52.
- Gupta G.P.K., Yadav B., Yadav B.K. Assessment of LNAPL in subsurface under fluctuating groundwater table using 2D sand tank experiments. *Journal of Environmental Engineering*. 2019. Vol. 145. 04019048. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0001560](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0001560).
<https://www.rockware.com/product/rockworks/>
- Ismail R., Shafieiyoun S., Al-Raoush R.I. Influence of water table fluctuation on natural source zone depletion in hydrocarbon contaminated subsurface environments. *Proceedings of the International Conference on Civil Infrastructure and Construction (CIC 684 2020)*. Presented at The International Conference on Civil Infrastructure and Construction, Qatar University Press. 2020. P. 654–658. <https://doi.org/10.29117/cic.2020.0084>
- Kechavarzi C., Soga K., Illangasekare T.H. Two-dimensional laboratory simulation of LNAPL infiltration and redistribution in the vadose zone. *Journal of Contaminant Hydrology*. 2005. Vol. 76. P. 211–233. <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2004.09.001>
- Lenhard R.J., Rayner J.L., Davis G.B. A practical tool for estimating subsurface LNAPL distributions and transmissivity using current and historical fluid levels in groundwater wells: Effects of entrapped and residual LNAPL. *Journal of Contaminant Hydrology*. 2017. Vol. 205. P. 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2017.06.002>
- Lenhard R.J., Rayner J.L., García-Rincón J. Testing an analytical model for predicting subsurface LNAPL distributions from current and historic fluid levels in Monitoring Wells: A preliminary test considering hysteresis. *Water*. 2019. Vol. 11. 2404.
- McAlexander B., Sihota N. Influence of Ambient Temperature, Precipitation, and Groundwater Level on Natural Source Zone Depletion Rates at a Large Semiarid LNAPL Site. *Groundwater Monitoring & Remediation*. 2019. Vol. 39. P. 54–65. <https://doi.org/10.1111/gwrm.12309>
- Newell C.J. Light Nonaqueous Phase Liquids. *United States Environmental Protection Agency*. Office of Research and Development, [and] Office of Solid Waste and Emergency Response. 1995.
- Patterson B.M., Davis G.B. Quantification of vapor intrusion pathways into a slab-on-ground building under varying environmental conditions. *Environmental science & technology*. 2009. Vol. 43. P. 650–656.
- Qi S., Luo J., O'Connor D., Cao X., Hou D. Influence of groundwater table fluctuation on the non-equilibrium transport of volatile organic contaminants in the vadose zone. *Journal of Hydrology*. 2020. Vol. 580. 124353. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124353>
- Rainwater K., Mayfield M.P., Heintz C., Claborn B.J. Enhanced in situ Biodegradation of Diesel Fuel by Cyclic Vertical Water Table Movement: Preliminary Studies. *Water Environment Research*. 1993. Vol. 65. P. 717–725.
- Rezanezhad F., Couture R.M., Kovac R., O'Connell D., Van Cappellen P. Water table fluctuations and soil biogeochemistry: An experimental approach using an automated soil column system. *Journal of Hydrology*. 2014. Vol. 509. P. 245–256. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.11.036>
- Rivett M., Sweeney R. An introduction to natural source zone depletion at LNAPL sites (technical bulletin). University of Strathclyde, Glasgow. 2019.
- Sookhak Lari K., Davis G.B., Rayner J.L., Bastow T.P., Puzon G.J. Natural source zone depletion of LNAPL: A critical review supporting modelling approaches. *Water research*. 2019. Vol. 157. P. 630–646.
- Teramoto E.H., Chang H.K. Field data and numerical simulation of btx concentration trends under water table fluctuations: Example of a jet fuel-contaminated site in Brazil. *Journal of Contaminant Hydrology*. 2017. Vol. 198. P. 37–47. <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2017.01.002>
- USEPA. How to effectively recover free product at leaking underground storage tank sites: A guide for state regulators. EPA 510-R-96-001.1996.
- Van de Ven C.J., Scully K.H., Frame M.A., Sihota N.J., Mayer K.U. Impacts of water table fluctuations on actual and perceived natural source zone depletion rates. *Journal of Contaminant Hydrology*. 2021. Vol. 238. 103771.
- Zhou A., Zhang Y., Dong T., Lin X., Su X. Response of the microbial community to seasonal groundwater level fluctuations in petroleum hydrocarbon-contaminated groundwater. *Environ Sci. Pollut Res*. 2015. Vol. 22. P. 10094–10106. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-4183-6>

Надійшла до редакції 06.02.2023

Надійшла у ревізованій формі 23.04.2023

Прийнята 05.05.2023

REFERENCES

- Alazaiza M.Y.D., Ramli M.H., Coptly N.K., Sheng T.J., Aburas M.M. 2020. LNAPL saturation distribution under the influence of water table fluctuations using simplified image analysis method. *Bull. Eng. Geol. Environ*, 79: 1543–1554. <https://doi.org/10.1007/s10064-019-01655-3>
- Atteia O., Palmier C., Schafer G. 2019. On the influence of groundwater table fluctuations on oil thickness in a well related to an LNAPL contaminated aquifer. *Journal of Contaminant Hydrology*, 223: 103476. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169772219300014>
- Bricks A.L., Havryliuk R.B. 2015. Transformation of light petroleum product accumulations contaminating the geological environment. *Bulletin of Karazin Kharkiv National University. Series: "Geology, geography, ecology"*, 1157: 116–123 (in Ukrainian).
- Bruckberger M.C., Gleeson D.B., Bastow T.P., Morgan M.J., Walsh T., Rayner J.L., Davis G.B., Puzon G.J. 2021. Unravelling Microbial Communities Associated with Different Light Non-Aqueous Phase Liquid Types Undergoing Natural Source Zone Depletion Processes at a Legacy Petroleum Site. *Water*, 13(7): 898.
- Cavelan A., Golfier F., Colombano S., Davarzani H., Deparis J., Faure P. 2021. A critical review of the influence of groundwater level fluctuations and temperature on LNAPL contaminations in the context of climate change. *Science of the Total Environment*, 806: 150412. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150412>
- Cavelan A., Golfier F., Colombano S., Oltean C. 2022. How climate change could affect our contaminated soils and groundwater tables: example of light petroleum contaminants (LNAPLs). https://www.researchgate.net/publication/365225085_How_climate_change_could_affect_our_contaminated_soils_and_groundwater_tables_example_of_light_petroleum_contaminants_LNAPLs
- Charbeneau R. 2007. LNAPL Distribution and Recovery Model. Volume 1: Distribution and Recovery of Petroleum Hydrocarbon Liquids in Porous Media. *API Publication*, 4760. https://www.api.org/-/media/files/ehs/clean_water/ground_water_quality/lnapl/4760-v1.pdf
- Deska I., Ociepa E. 2013. Impact of the water table fluctuations on the apparent thickness of light non-aqueous phase liquids. *Ecol. Chem. Eng. A*. 20 (7–8): 771–778. DOI: 10.2428/ecea.2013.20(07)070
- Dobson R., Schroth M.H., Zeyer J. 2007. Effect of water-table fluctuation on dissolution and biodegradation of a multi-component, light nonaqueous-phase liquid. *Journal of Contaminant Hydrology*, 94, 3–4: 235–248.
- Garg S., Newell C.J., Kulkarni P.R., King D.C., Adamson D.T., Renno M.L., Sale T. 2017. Overview of natural source zone depletion: Processes, controlling factors, and composition change. *Groundwater monitoring & remediation*, 37: 62–81. <https://doi.org/10.1111/gwmr.12219>
- Gatsios E., García-Rincón J., Rayner J.L., Mc Laughlan R.G., Davis G.B. 2018. LNAPL transmissivity as a remediation metric in complex sites under water table fluctuations. *Journal of Environmental Management*, 215: 40–48. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.03.026>
- Guo Y., Holton C., Luo H., Dahlen P., Johnson P.C. 2019. Influence of Fluctuating Groundwater Table on Volatile Organic Chemical Emission Flux at a Dissolved Chlorinated-Solvent Plume Site. *Groundwater Monitoring & Remediation*, 39: 43–52.
- Gupta G.P.K., Yadav B., Yadav B.K. 2019. Assessment of LNAPL in subsurface under fluctuating groundwater table using 2D sand tank experiments. *Journal of Environmental Engineering*, 145: 04019048. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0001560](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0001560)
<https://www.rockware.com/product/rockworks/>
- Ismail R., Shafieiyoun S., Al-Raoush R.I. 2020. Influence of water table fluctuation on natural source zone depletion in hydrocarbon contaminated subsurface environments, in: *Proceedings of the International Conference on Civil Infrastructure and Construction (CIC 684 2020)*. Presented at the The International Conference on Civil Infrastructure and Construction, Qatar University Press. 654–658. <https://doi.org/10.29117/cic.2020.0084>
<https://doi.org/10.29117/cic.2020.0084>
- Kechavarzi C., Soga K., Illangasekare T.H. 2005. Two-dimensional laboratory simulation of LNAPL infiltration and redistribution in the vadose zone. *Journal of Contaminant Hydrology*, 76: 211–233. <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2004.09.001>
- Lenhard R.J., Rayner J.L., Davis G.B. 2017. A practical tool for estimating subsurface LNAPL distributions and transmissivity using current and historical fluid levels in groundwater wells: Effects of entrapped and residual LNAPL. *Journal of Contaminant Hydrology*, 205: 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2017.06.002>
- Lenhard R.J., Rayner J.L., García-Rincón J. 2019. Testing an analytical model for predicting subsurface LNAPL distributions from current and historic fluid levels in Monitoring Wells: A preliminary test considering hysteresis. *Water*, 11: 2404.
- McAlexander B., Sihota N. 2019. Influence of Ambient Temperature, Precipitation, and Groundwater Level on Natural Source Zone Depletion Rates at a Large Semiarid LNAPL Site. *Groundwater Monitoring & Remediation*, 39: 54–65. <https://doi.org/10.1111/gwmr.12309>
- Newell C.J. 1995. Light Nonaqueous Phase Liquids. United States Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, [and] Office of Solid Waste and Emergency Response.

- Paramonova N.K., Golub G.I., Zapolsky I.N., Logvinenko O.I. 2017b. Laboratory studies of the influence of groundwater table fluctuations on the state and content of light petroleum products in the subsurface. Article. 2. Experience with the initial lowering of the water pressure after the formation of a layer with mobile kerosene. *Geologičnij žurnal*, 4 (361): 77–87 (in Russian).
- Paramonova N.K., Golub G.I., Zapolsky I.N., Logvinenko O.I., Negoda Yu.O. 2016. The influence of groundwater table fluctuations on the formation of residual and entrapped light petroleum products. *Geologičnij žurnal*, 1 (354): 112–124 (in Russian).
- Paramonova N.K., Golub G.I., Zapolsky I.N., Logvinenko O.I. 2017a. Laboratory studies of the influence of groundwater table fluctuations on the state and content of light petroleum products in the subsurface. Article. 1. Conducting an experiment with the initial rise in the groundwater level after the formation of a layer with a light oil product. *Geologičnij žurnal*, 3 (360): 42–54 (in Russian).
- Patterson B.M., Davis G.B. 2009. Quantification of vapor intrusion pathways into a slab-on-ground building under varying environmental conditions. *Environmental science & technology*, 43: 650–656.
- Qi S., Luo J., O'Connor D., Cao X., Hou D. 2020. Influence of groundwater table fluctuation on the non-equilibrium transport of volatile organic contaminants in the vadose zone. *Journal of Hydrology*, 580: 124353. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124353>
- Rainwater K., Mayfield M.P., Heintz C., Claborn B.J. 1993. Enhanced in situ Biodegradation of Diesel Fuel by Cyclic Vertical Water Table Movement: Preliminary Studies. *Water Environment Research*, 65: 717–725.
- Rezanezhad F., Couture R.M., Kovac R., O'Connell D., Van Cappellen P. 2014. Water table fluctuations and soil biogeochemistry: An experimental approach using an automated soil column system. *Journal of Hydrology*, 509: 245–256. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.11.036>
- Rivett M., Sweeney R. 2019. An introduction to natural source zone depletion at LNAPL sites (technical bulletin). University of Strathclyde, Glasgow.
- Scientific foundations of elimination of pollution of the geological environment by light petroleum products. 2020. Report on research work, State registration number 0115U005445. Kyiv: IGS of NAN of Ukraine (in Ukrainian).
- Shevchenko A.L., Osadchii V.I., Charny D.V. 2019. Changes in the regime, balance and resources of groundwater of Polissya and the forest-steppe zone of Ukraine under the influence of global warming. *Academic Notes of Brest Universitetay*. 2019, iss. 15, part 2: 117–128 (in Russian).
- Shevchenko O.L., Skoribun A.D., Charny D.V. 2021. Subordination of groundwater level fluctuations in the Southern Bug river basin to climatic changes. *Bulletin of Odessa National University. Series: Geographical and geological sciences*, 26, 2 (39): 175–194. [https://doi.org/10.18524/2303-9914.2021.2\(39\).246202](https://doi.org/10.18524/2303-9914.2021.2(39).246202) (in Ukrainian).
- Shpak E.N., Logvinenko O.I. 2019. Research of natural remediation of the subsurface contaminated with petroleum products. *Mineral resources of Ukraine*, 3: 49–51 (in Russian).
- Shpak O.M., Havrilyuk R.B., Logvinenko O.I. 2022. Efficiency assessment of remediation actions in the site of subsurface contamination with petroleum products within the fuel and lubricants warehouse of Boryspil airport. *Bulletin of the Kyiv National University. Ser. Geology*, 1 (96): 76–82 (in Ukrainian).
- Sookhak Lari K., Davis G.B., Rayner J.L., Bastow T.P., Puzon G.J. 2019. Natural source zone depletion of LNAPL: A critical review supporting modelling approaches. *Water research*, 157: 630–646.
- Teramoto E.H., Chang H.K. 2017. Field data and numerical simulation of btx concentration trends under water table fluctuations: Example of a jet fuel-contaminated site in Brazil. *Journal of Contaminant Hydrology*, 198: 37–47. <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2017.01.002>
- USEPA. 1996. How to effectively recover free product at leaking underground storage tank sites: A guide for state regulators. EPA 510-R-96-001.
- Van de Ven C.J., Scully K.H., Frame M.A., Sihota N.J., Mayer K.U. 2021. Impacts of water table fluctuations on actual and perceived natural source zone depletion rates. *Journal of Contaminant Hydrology*, 238: 103771.
- Zhou A., Zhang Y., Dong T., Lin X., Su X. 2015. Response of the microbial community to seasonal groundwater level fluctuations in petroleum hydrocarbon-contaminated groundwater. *Environ Sci. Pollut Res.*, 22: 10094–10106.

Received 06.02.2023

Received in revised form 23.04.2023

Accepted 05.05.2023

Assessment of the impact of groundwater table fluctuations on the transformation of subsurface contamination with petroleum products

O.M. Shpak, R.B. Havryliuk, O.I. Lohvynenko, I.M. Zapolskiy*

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

E-mail: shpak_lena@yahoo.com; gavriyuk.ruslan@gmail.com; lohvynenko.olha@gmail.com; igorzapol@gmail.com

*Corresponding author

This paper describes the actual problem of groundwater contamination with petroleum products and its transformation under the influence of climatic factors. The global experience of studying the influence of groundwater table fluctuations on the transformation of petroleum contamination, in particular, the processes of redistribution of mobile petroleum products, dissolution, evaporation, and biodegradation of hydrocarbon compounds, as well as the difference between the actual thickness of a mobile petroleum product layer in porous media and the apparent thickness of a mobile petroleum product layer in a monitoring well was analyzed, which is important to plan remedial actions.

The impact of groundwater table fluctuations on transformation of the petroleum contamination source within the warehouse of fuels and lubricants of the Boryspil airport was studied. As a result of groundwater table fluctuations, kerosene was “smeared” in the vadose zone, which led to an increase in the soil contamination area. During the observation period, a mobile kerosene layer almost disappeared when a groundwater table rose and restored when a groundwater table decreased, while the vadose zone was additionally contaminated since a new capillary zone was formed during each rise of a groundwater table and kerosene. The long-term amplitude of groundwater table fluctuations was 2.4 m, and a petroleum contamination zone was also within these limits. During the observation period, the largest area of groundwater contamination with dissolved petroleum products was observed at the lowest groundwater table elevations in 2016. The highest concentration of dissolved hydrocarbons in groundwater (75.98 mg/dm³) was found within a mobile kerosene lens. Beyond the mobile kerosene lens, spreading of groundwater contamination with dissolved hydrocarbons is limited.

The analysis of the monitoring data of the petroleum contamination source within the warehouse of fuels and lubricants of the Boryspil airport indicates that at present subsurface contamination with petroleum products is localized, and its further spreading is not expected. It is recommended to continue in the future monitoring of the natural attenuation of subsurface contamination.

Keywords: *subsurface; petroleum products; contamination transformation; groundwater level fluctuations.*