

ДЕЯКІ АСПЕКТИ РОЗЧИНЕННЯ ВУГЛЕВОДНІВ У ТРАНСФОРМАЦІЇ СКУПЧЕНЬ ЛЕГКИХ НАФТОПРОДУКТІВ У ГЕОЛОГІЧНОМУ СЕРЕДОВИЩІ

А.Л. Брикс¹, Ю.О. Негода²

(Рекомендовано д-ром геол.-мінерал. наук М.С. Огняником)

¹ *Інститут геологічних наук НАН України, Київ, Україна, E-mail: gwp_ign@gwp.org.ua
Кандидат геолого-мінералогічних наук, провідний науковий співробітник.*

² *Інститут геологічних наук НАН України, Київ, Україна, E-mail: gwp_ign@gwp.org.ua
Молодший науковий співробітник.*

Наведені результати моніторингових досліджень, які виконувались на забрудненій ділянці аеродрому біля м. Миколаїв. Описана схема формування скупчення легких нафтопродуктів у геологічному середовищі. Охарактеризовані результати визначення вмісту вуглеводнів у пробах ґрунту і води. Виявлений зв'язок між вмістом БТЕК і вмістом усіх розчинених у воді вуглеводнів. В результаті статистичної обробки даних аналітичних визначень доведена їх однорідність. Стверджується, що однорідність показників, що характеризують зв'язок між вмістом БТЕК і вмістом вуглеводнів у водному розчині, можна інтерпретувати як наслідок переважаючого впливу розчинення вуглеводнів на формування зовнішньої частини скупчення легких нафтопродуктів у геологічному середовищі.

Ключові слова: геологічне середовище, забруднення легкими нафтопродуктами, вміст вуглеводнів, БТЕК, розчинення вуглеводнів, ґрунтові води.

SOME ASPECTS OF THE HYDROCARBON DISSOLUTION IN TRANSFORMING OF LIGHT OIL PRODUCT ACCUMULATIONS IN THE GEOLOGICAL ENVIRONMENT

A.L. Bricks¹, Yu.O. Negoda²

(Recommended by doctor of geological-mineralogical sciences M.S. Ognianik)

¹ *Institute of Geological Sciences of NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine, E-mail: gwp_ign@gwp.org.ua
Candidate of geological-mineralogical sciences, leading researcher.*

² *Institute of Geological Sciences of NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine, E-mail: gwp_ign@gwp.org.ua
Junior scientific researcher.*

The results of the monitoring studies performed at the contaminated site airfield near Nikolayev city are presented. The scheme that shows the formation of the clusters of light petroleum products in the subsurface is described. Some of the results that show the determination of hydrocarbons in soil and water samples are presented. The relationship between the concentrations of BTEX (Benzene, Toluene, Ethylbenzene, Xylenes) and dissolved hydrocarbons was detected. As a result of analytical determinations statistical data processing, their homogeneity has been proved. The homogeneity of the indicators that characterize the connection between the concentration of BTEX and hydrocarbons contained in aqueous solution can be interpreted as a consequence of the prevailing hydrocarbon dissolution process in the formation of the outer part of light products cluster.

Key words: geological environment, light petroleum products pollution, content of hydrocarbons, BTEX, dissolved hydrocarbons, ground water.

НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ РАСТВОРЕНИЯ УГЛЕВОДОРОДОВ В ТРАНСФОРМАЦИИ СКОПЛЕНИЙ ЛЕГКИХ НЕФТЕПРОДУКТОВ В ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЕ

А.Л. Брикс¹, Ю.А. Негода²

(Рекомендовано д-ром геол.-минерал. наук Н.С. Огняником)

¹ *Институт геологических наук НАН Украины, Киев, Украина, E-mail: gwp_ign@gwp.org.ua
Кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник.*

² *Институт геологических наук НАН Украины, Киев, Украина, E-mail: gwp_ign@gwp.org.ua
Младший научный сотрудник.*

Приведены результаты мониторинговых исследований, которые выполнялись на загрязненном участке аэродрома около г. Николаев. Описана схема формирования скопления легких нефтепродуктов в геологической среде. Охарактеризованы результаты определения содержания углеводородов в пробах грунта и воды. Обнаружена связь между содержанием БТЭК и содержанием всех растворенных в воде углеводородов. В результате статистической обработки данных аналитических определений доказана их однородность. Утверждается, что однородность показателей, характеризующих связь между содержанием БТЭК и содержанием углеводородов в водном растворе, можно интерпретировать как следствие преобладающего влияния растворения углеводородов на формирование внешней части скопления легких нефтепродуктов в геологической среде.

Ключевые слова: геологическая среда, загрязнение легкими нефтепродуктами, содержание углеводородов, БТЭК, растворение углеводородов, грунтовые воды.

Вступ

Моніторингові дослідження як система тривалих спостережень, натурних і лабораторних експериментів, а також аналізу інформації про утворення і трансформацію* скупчень нафтових вуглеводнів (ВВ), небезпечних забруднювачів підземних вод, безумовно, мають наукове і практичне значення. Цій темі присвячено багато публікацій, переважно в англійськомовних наукових журналах та збірниках. В українсько- та російськомовних публікаціях здебільшого посилаються на такі монографії [Гольдберг, Газда, 1984; Огняник и др., 2013; Основы..., 2006; Техногенное..., 2001]. В численних статтях розглядаються різні приклади моніторингу забруднених нафтовими ВВ ділянок та їх очищення.

Відомо, що втрачені легкі нафтопродукти (ЛНП), які потрапляють у геологічне середовище (ГС), в основному розповсюджуються або у вигляді шару нафтопродуктової рідини (лінзи), що «плаває» на рівні ґрунтових вод (РГВ), або як розчин ВВ у ґрунтових водах. Дослідження цих найбільш

рухливих різновидів скупчень (осередків) нафтових ВВ мають на меті у кінцевому підсумку визначення рівня небезпеки, яку вони становлять для довкілля (або, більш конкретно, для певних природних чи водогосподарських об'єктів, що потребують захисту). У спрощеній постановці задачі оцінка небезпеки полягає у визначенні часу, за який «фронт» забруднення досягне об'єкта, що має бути захищений [Огняник и др., 2013]. В такому разі більш небезпечними безумовно видаються осередки розчинених у воді ВВ, швидкість просування яких перевищує швидкість руху нафтопродуктової лінзи. Більш адекватний підхід додатково передбачає врахування процесів трансформації як осередків забруднення в цілому, так і окремих ВВ зі складу ЛНП. Такий підхід хоча й обіцяє певне підвищення вірогідності результатів, є складнішим в реалізації і вимагає більш високого рівня вивченості цих процесів, серед яких насамперед слід звернути увагу на перехід ВВ зі складу рідини у розчин з подальшим розповсюдженням у цьому стані.

* Під трансформацією скупчень (осередків) нафтових ВВ у ГС розуміємо зміну їх просторових характеристик, а також зміни фізичного стану і хімічного складу, що відбуваються під дією природних та техногенних факторів.

Об'єкт і методика досліджень

У статті, що розглядається, наведені результати досліджень, які виконано на забрудненій ділянці аеродрому Кульбакине біля м. Миколаїв. Доречно буде вказати, що гідрогеологічні умови ділянки, загальна характеристика осередку забруднення, а також історія досліджень були досить докладно описані в [Брикс, 2010; Огняник и др., 2013]. У теперішній роботі увагу акцентовано на спостереженнях за зміною вмісту ароматичних ВВ групи БТЕК** в ЛНП-рідині і у водному розчині.

Слід зазначити, що: 1) БТЕК мають серед ВВ найбільшу розчинність у воді: від 1780 у бензолу до 150 мг/дм³ в етилбензолу**, а через це схильність до розповсюдження з фільтраційним потоком; 2) частка БТЕК у складі бензину та гасу, найбільш розповсюджених нафтопродуктів (НП), досить суттєва і може досягати ~20%; 3) БТЕК за показниками, прийнятими в США, ЄС і РФ, вважаються сполуками, які становлять реальну небезпеку для здоров'я людини [Гольдберг, Газда, 1984; Основы..., 2006]. Тож зрозуміло, чому в рамках еколого-гідрогеологічних досліджень саме ця група нафтових ВВ варта особливого ставлення.

Відбір проб ґрунту здійснювався співробітниками відділу охорони підземних вод Інституту геологічних наук (ІГН) НАН України в процесі буріння свердловин. Проби води з моніторингових свердловин відбиралися в середньому 2-3 рази на рік упродовж 3 років. Аналітичні дослідження виконувалися в лабораторії УкрНДІНП «МАСМА» (м. Київ). Методом газової хроматографії визначалися загальний вміст НП, а також вміст ВВ групи БТЕК.

Матеріали досліджень

Виходячи з наведеного визначення БТЕК як групи найбільш розчинних вуглеводневих сполук, можна було б припустити, що в підземних водах, які контактують із техногенними скупченнями ЛНП-рідини, повинна спостерігатися переважаюча концентрація ароматичних ВВ саме цієї групи. Це припу-

щення підтверджується результатами лабораторного експерименту [Гольдберг, Газда, 1984]. В натурних умовах переважання ароматичних ВВ у складі водного розчину не спостерігається, але це припустимо, якщо йдеться про початкову стадію формування осередку забруднення. Можна уявити, як з часом в тій частині лінзи ЛНП, що контактує з водою, зменшується відсотковий вміст легко розчинних ВВ, а через це скорочується їх надходження до розчину. Натомість, збільшується надходження менш розчинних ВВ.

На рис. 1 у схематичному вигляді показано наше (здебільшого апріорне) уявлення про зміну в часі вмісту легко розчинних ВВ у ґрунтових водах. Такі самі міркування справедливі для розчинення крапельно роздрібненої ЛНП-рідини, що утримується в ґрунтах зони аерації (ЗА). Треба лише мати на увазі, що роль фільтраційного потоку в цьому випадку відіграє низхідний потік інфільтраційних вод.

На рис. 2 показана схема розташування точок відбору проб води і ґрунту. На схемі визначені три ділянки, де може бути підсилене надходження розчинених ВВ до ґрунтових вод. Це ділянки складу ПММ і АЗС, де ґрунти ЗА утримують крапельно роздрібнену ЛНП-рідину, яка надходила з поверхні землі, а також ділянка розташування лінзи ЛНП у теперішніх границях і в минулому. Під час колювання шару ЛНП-рідини (лінзи ЛНП) разом з РГВ над та під лінзою формується шар ґрунтів, які вміщують іммобільну ЛНП-рідину. Ділянка загального розповсюдження мобільного ЛНП за своїми розмірами перевищує лінзу в її нинішніх границях, бо включає також ділянки, де лінза існувала в минулому. Ці ділянки визначаються по свердловинах за наявністю ЛНП-рідини, що утримується ґрунтами вище або нижче РГВ, за межами теперішнього розташування лінзи ЛНП. Деяку розбіжність контурів зон підвищеного вмісту розчинених ВВ у воді (>10 мг/дм³) та іммобільної ЛНП-рідини у ґрунтах (>1 г/кг) можна пояснити недосконалістю побудови схеми через недостатню кількість пунктів опробування і занадто короткий

* БТЕК – акронім, утворений від назв чотирьох перших ВВ ароматичного ряду: бензолу, толуолу, етилбензолу та ізомерів ксилолу.

** Для порівняння: н-гексан з класу алканів з такою ж кількістю атомів вуглецю, як у молекулі бензолу, має розчинність у воді 9,5 мг/дм³, а циклогексан з класу нафтенів – 55 мг/дм³.

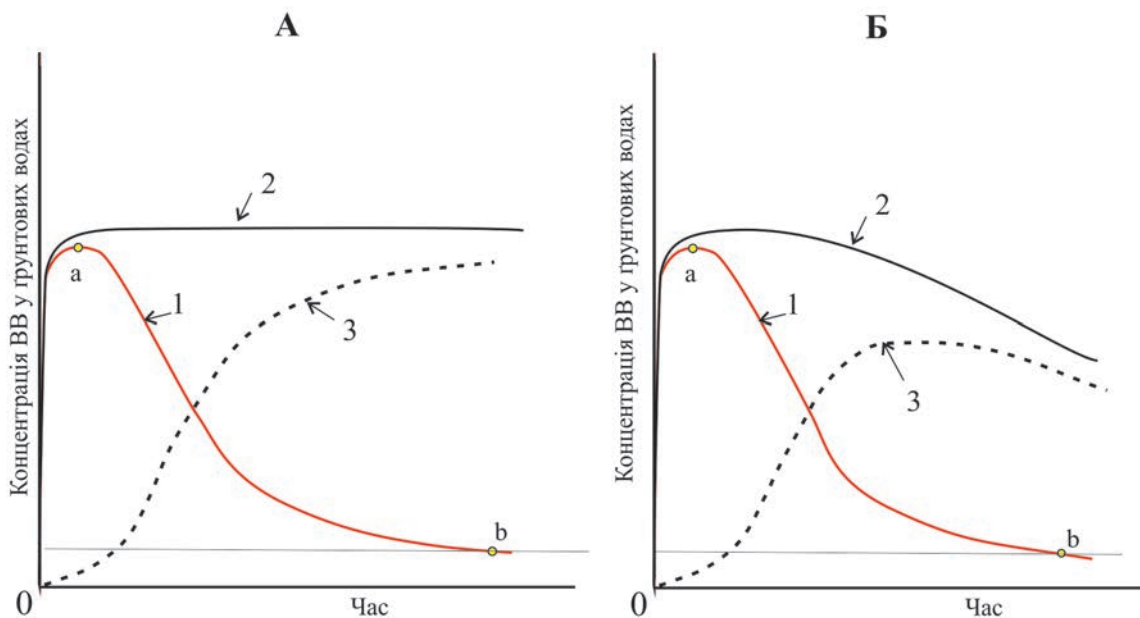


Рис. 1. Зміна в часі співвідношення вмісту розчинних і легко розчинних ВВ у ґрунтових водах: А – при постійній концентрації ВВ, Б – при зменшенні концентрації ВВ у ґрунтових водах

1 — концентрація легко розчинних ВВ; 2 — сумарна концентрація ВВ у ґрунтових водах; 3 — концентрація у воді решти ВВ (крім легко розчинних). Точки: а – максимальний вміст легко розчинних ВВ у воді, б – вміст легко розчинних ВВ, що складає приблизно десяту частину вмісту розчинених ВВ

Fig. 1. Time variation ratio of soluble and easily soluble hydrocarbons concentration in the groundwater: А – at constant concentration of hydrocarbons in the groundwater, Б – with a decrease in hydrocarbons concentration in the groundwater

1 — concentration of easily soluble hydrocarbons; 2 — concentration of total hydrocarbons in the groundwater; 3 — concentration of the remaining hydrocarbons in the groundwater (except for those that are readily soluble). Point: a – the highest concentration of easily soluble hydrocarbons in water, b – about one tenth of the dissolved hydrocarbons concentration

період спостережень (2-3 роки) у порівнянні із 40-річним періодом трансформації осередку забруднення.

На рис. 3 як приклад опробування ГС на забрудненій ділянці представлені результати визначення вмісту ВВ у ґрунтовій товщі і підземних водах у двох моніторингових свердловинах.

Результати опробування ґрунту і води в св. 9м (рис. 3) можна вважати типовими для ділянки складу ПММ, де забруднення простежується від поверхні землі (вся ЗА) на усю глибину свердловини (тобто на глибину 2-3 м нижче РГВ). Як правило, у приповерхневій частині товщі ґрунтів ЗА вміст ВВ має доволі низькі значення — 0,5-0,6 г/кг, що в 2-3 рази менші, ніж в інтервалі глибин коливання РГВ і у водонасиченій зоні. Це пояснюється тим, що на малих глибинах, передусім у ґрунтово-рослинному шарі, існують найкращі умови для протікання деструктивних

процесів: 1) випаровування летких ВВ, 2) окиснення під впливом атмосферного повітря, 3) біодеградації, 4) перенесення ВВ, що розчиняються водою низхідного інфільтраційного потоку.

Розріз св. 52м є типовим для ділянки латерального розповсюдження ЛНП-рідини у минулому (за межами теперішнього розташування лінзи). Відрізняється від попереднього тим, що зона забруднених ґрунтів починається не з поверхні землі, а в інтервалі глибин коливання РГВ. Загальний вміст ВВ у ґрунтах змінюється від 0,8 (св. 52м, глибина 3 м) до 3,4 г/кг (св. 50м, глибина 6 м). Нижня границя зони забруднених ґрунтів може знаходитись на глибині понад 10 м, про це свідчить суттєве зменшення вмісту ВВ (0,66 г/кг – св. 50, глибина 10 м).

Ці дані з деякими уточненнями можна розповсюдити і на ділянку нинішнього розташування лінзи ЛНП. Дуже цікавою є св. 58р,

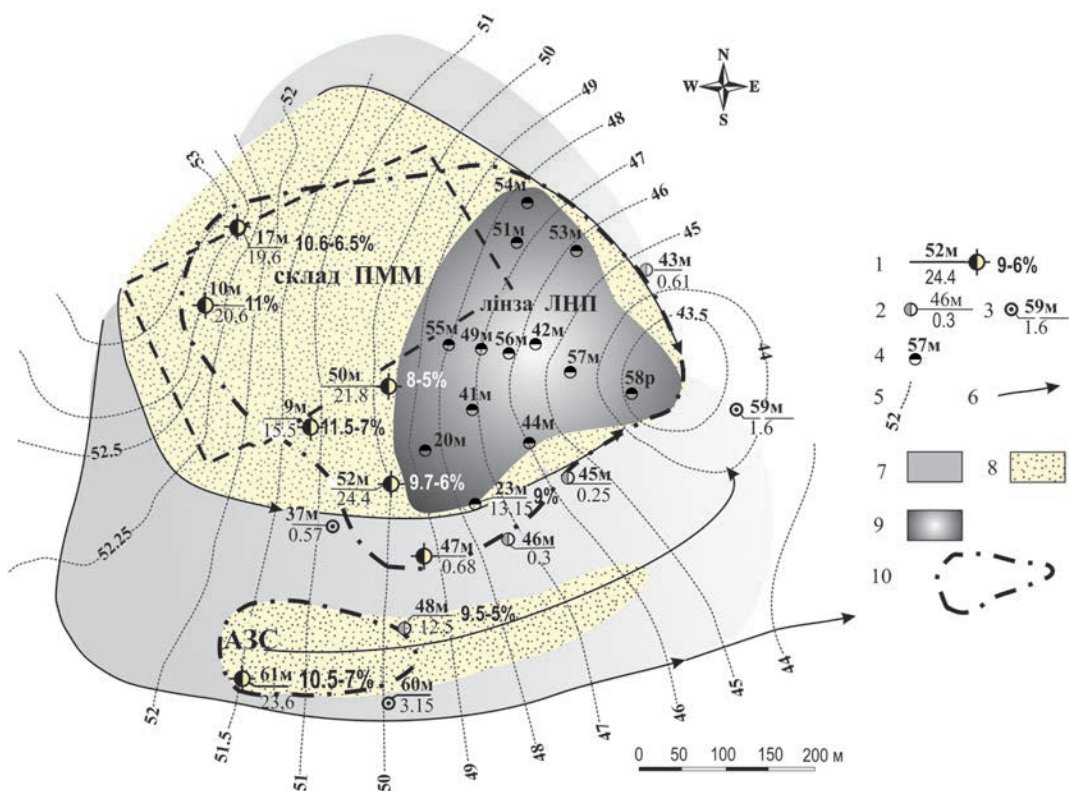


Рис. 2. Схема осередку нафтопродуктового забруднення ГС на аеродромі біля м. Миколаїв

1, 2, 3 – свердловини, з яких відібрані проби води і ґрунту: 1 – вміст ЛНП в пробах ґрунту >1 г/кг; 2 – вміст ЛНП в пробах ґрунту <1 г/кг; 3 – вміст ВВ у пробах води <5 мг/дм³, ґрунти «чисті». Числові позначення: чисельник – номер свердловини, знаменник – максимальне значення вмісту розчинних ВВ, мг/дм³, збоку – відсоткове відношення вмісту БТЕК до вмісту усіх ВВ, розчинених у воді; 4 – свердловини, які розкривають шар ЛНП-рідини (вміст ЛНП у пробах ґрунту 1-11 г/кг). Число зверху – номер свердловини; 5 – гідроізогіпси за станом на жовтень 2003 р.; 6 – лінія току. Вміст розчинених ВВ у ґрунтових водах: 7 – <3 мг/дм³; 8 – >10 мг/дм³; 9 – лінза ЛНП; 10 – контур зони з підвищеним вмістом ЛНП (>1 г/кг), що утримується ґрунтами

Fig. 2. Zone of the oil product contamination for the geological environment in the airfield near the city of Mykolaiv

1, 2, 3, 4 – wells from which water and ground samples were taken: 1 – concentration of the light oil products in ground samples >1 g/kg; 2 – concentration of the light oil products in ground samples <1 g/kg; 3 – concentration of the hydrocarbons in water samples <5 mg/dm³, grounds are not contaminated. The numbers: numerator – number of wells; denominator – maximum concentration of soluble hydrocarbons, mg/dm³; numbers on the side – percentage ratio BTEX concentrations to total content of hydrocarbons dissolved in the water; 4 – wells, which penetrated the layer of liquid oil product (the concentration of light oil products in ground samples 1-11 g/kg). The number from above is wells number; 5 – water table contour lines, as of October 2003; 6 – flow line. The concentration of dissolved hydrocarbons in groundwater: 7 – <3 mg/dm³; 8 – >10 mg/dm³; 9 – lens of the light oil products; 10 – contour of area with high concentration of oil products in the ground (>1 g/kg)

що знаходиться у низовій частині ділянки, де лінза, яка рухалась з боку складу ПММ, загальмувала і зупинилася через природне воронкоподібне утворення на рівневій поверхні ґрунтових вод*. Саме тут виявлено максимальне потовщення шару мобільного ЛНП – 4,3 м і найбільші значення вмісту ЛНП, що утримується ґрунтом, – 4,1 г/кг.

Але цей максимум не настільки перевищує середні значення вмісту ЛНП на інших позалінзових ділянках, щоб пояснити це наявним впливом мобільної ЛНП-рідини. До того ж, у межах розташування лінзи є ділянки, де вміст іммобільного ЛНП у ґрунтах такий самий і навіть дещо менший, ніж у пробах ґрунту поза лінзи.

* Пояснення цього природного утворення наведено у [Брикс, 2010].

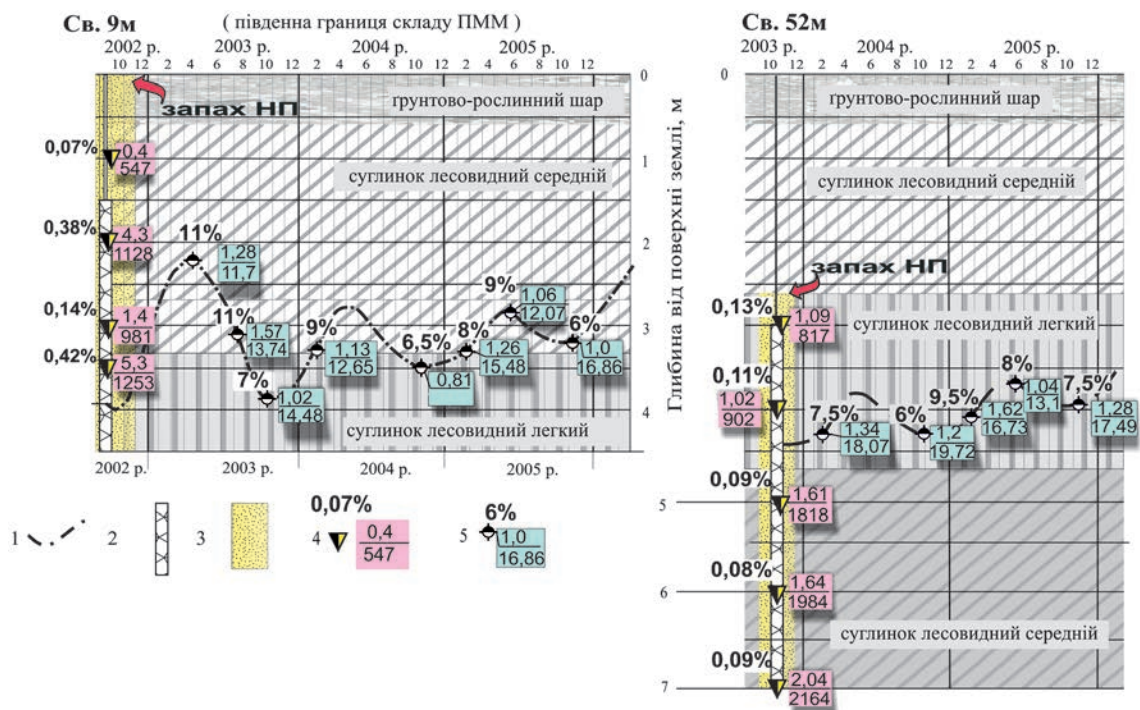


Рис. 3. Простеження зміни вмісту нафтових ВВ у пробах ґрунту і води

1 – графік коливання глибини залягання РГВ; 2 – місце розташування фільтра свердловини; 3 – зона забруднення ґрунтів; 4 – місце відбору проби ґрунту. Числа збоку: у чисельнику – вміст БТЕК, мг/кг, у знаменнику – вміст ВВ у пробі ґрунту, мг/кг. Число зверху – відсоткове відношення вмісту БТЕК до вмісту усіх ВВ у пробі ґрунту; 5 – проба води із свердловини. Числа збоку: у чисельнику – вміст БТЕК у пробах води, мг/дм³, у знаменнику – вміст ВВ у пробах води, мг/дм³. Число зверху – відсоткове відношення концентрацій БТЕК і усіх ВВ у пробах води

Fig. 3. Tracking changes in concentration of petroleum hydrocarbons in soil and water samples

1 – graph of the depth of groundwater levels; 2 – location of the wells filter; 3 – zone of ground contamination; 4 – location of ground sampling. The numbers on the side: numerator – the concentration of BTEX, mg/kg; denominator – the concentration of hydrocarbons in ground sample, mg/kg. The number from above is percentage of BTEX concentrations to content of total hydrocarbons in the ground sample; 5 – water sample from well. The numbers on the side: numerator – BTEX concentration in the water samples, mg/dm³; denominator – the concentration of hydrocarbons in the water samples, mg/dm³. The number from above is percentage ratio BTEX concentrations to total content of hydrocarbons in the water samples

Отож, формування зони забруднення ґрунтів у процесі одночасного латерального пересування і коливального (разом з РГВ) руху шару мобільної ЛНП-рідини в загальних рисах відбулося 2-3 десятки років тому. Тобто останні 2-3 десятки років процес просторової трансформації осередку забруднення суттєво уповільнився; натомість, підсилилось значення деструктивних і міжфазових процесів, під впливом яких утворилася відома картина розподілу ВВ на різних ділянках забрудненого ГС.

Як приклад на рис. 3 показано відсоткове відношення вмісту БТЕК до загального вмісту ВВ у пробах ґрунту, відібраних при бурінні двох свердловин, і таке саме відсоткове відношення для ВВ, розчинених у воді.

Ці розрахунки виконані для всіх проб ґрунту, в яких загальний вміст ВВ перевищує 0,6 г/кг, і всіх проб води з концентрацією ВВ не менше 10 мг/дм³. В інших випадках вміст ВВ групи БТЕК може бути на межі приладного виявлення.

Спроба встановити тренд у зміні вмісту розчинених ВВ через його прив'язку до відповідного положення РГВ виявилася невдалою. Тобто, є свердловини, в яких спостерігається збільшення відсоткового вмісту БТЕК у розчині при підйомі РГВ, але можна знайти і відхилення від цієї тенденції. Достатньо впевнено можна визначити лише інтервал цих змін. Для свердловин, в яких загальний вміст розчинених ВВ змінюється в інтервалі 10-24 мг/дм³, вміст ВВ групи

БТЕК – 1,0-2,5 мг/дм³, що становить 5-11% від загального вмісту розчинених ВВ. Як правило, зростанню вмісту усіх розчинених ВВ відповідає збільшення вмісту БТЕК. У справедливості цього твердження можна переконатися за результатами статистичної обробки даних (рис. 4).

Наведемо деякі пояснення до рис. 4.

1. Виходячи з того, що при відсутності ВВ у водному розчині вміст БТЕК також має бути нульовим, в першому варіанті побудови графіку лінія регресії штучно спрямована в точку початку координат. Це призводить до небажаного завищення коефіцієнта детермінації ($r^2 = 0,96$). Більш вірогідним видається другий варіант, де рівняння лінії регресії має вигляд $Y = a \cdot X + b$.

2. Коефіцієнт детермінації* у другому варіанті ($r^2 = 0,59$) показує, що зміна вмісту БТЕК у розчині на 59% пояснюється зміною вмісту розчинених ВВ. Решта (41%)

це вплив інших неврахованих факторів, в тому числі помилок, що неминуче допускаються при відборі проб і виконанні аналітичних процедур. Коефіцієнт кореляції ($r = 0,77$) вказує на тісний зв'язок між вмістом БТЕК і загальним вмістом ВВ, розчинених у воді.

3. Відношення вмісту БТЕК до вмісту ВВ, розчинених у воді, за графіком в середньому становить:

$$\bar{q} = \theta_y \cdot 100 / \theta_x = 1,45 \cdot 100 / 16,6 = 8,7\%.$$

Коефіцієнт варіації, визначений для сукупності значень $\theta_{yi} / \theta_{xi}$ за формулою $V = (\sigma / \bar{q}) \cdot 100$, де σ – середнє квадратичне відхилення, \bar{q} – середнє арифметичне $\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\theta_{yi} / \theta_{xi})$, сягає 20%. Прийнято вважати, що коефіцієнт варіації менше 33% вказує на статистичну однорідність сукупності даних.

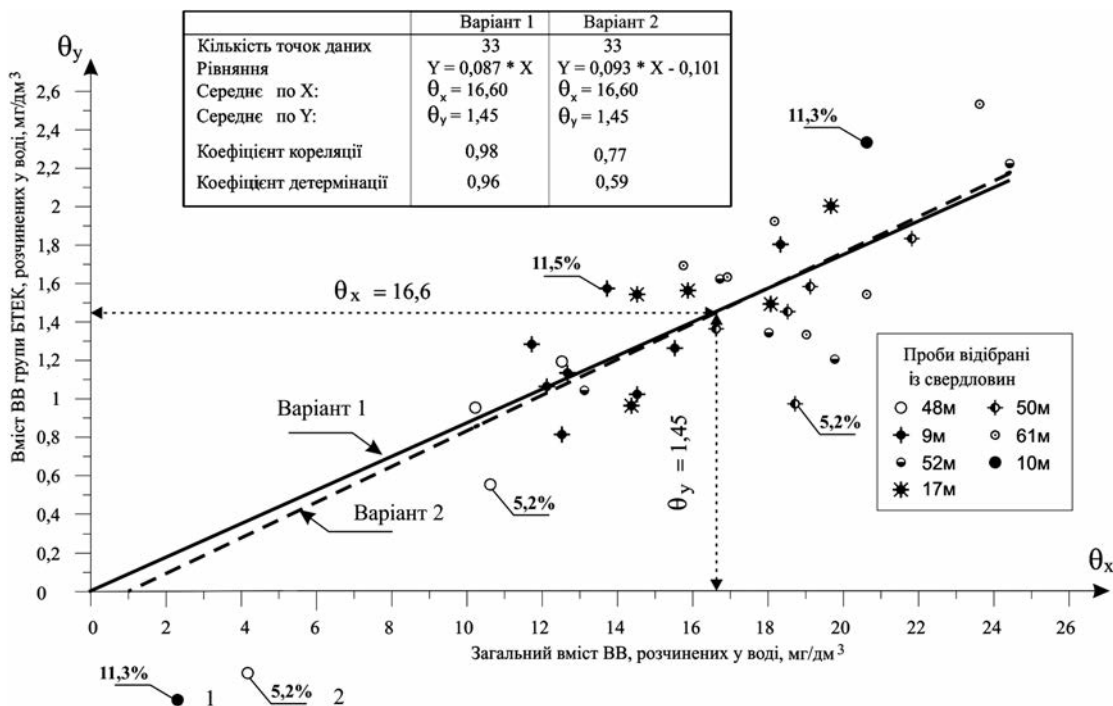


Рис. 4. Залежність вмісту БТЕК від вмісту загальної кількості розчинених у воді ВВ. Відсоткове відношення концентрацій БТЕК і усіх ВВ у пробах води: 1 – найбільші значення; 2 – найменші значення

Fig. 4. Dependence of BTEX concentration on the concentration of total dissolved hydrocarbons. Percentage concentrations of BTEX and total hydrocarbons in the water samples: 1 – the highest values, 2 – the lowest values

* Для моделі парної лінійної регресії коефіцієнт детермінації дорівнює квадрату коефіцієнта кореляції між Y та X ($r^2_{x,y}$).

Інтерпретація результатів та висновки

Можна вважати, що однорідність статистичних показників пов'язана із однорідністю умов перетворення (трансформації) осередку забруднення, що розглядається, принаймні на його останньому (сучасному) етапі. За нашою орієнтовною схемою йому передують етап промочування (насичення) ґрунтів ЗА та утворення лінзи ЛНП безпосередньо на ділянці складу ПММ, а також етап просторового поширення лінзи та утворення в зоні її вертикального коливання скупчення окремих крапель ЛНП-рідини, що утримуються ґрунтами. Коли живлення лінзи суттєво скорочується або повністю припиняється, обсяг лінзи ЛНП зменшується в результаті переходу мобільної ЛНП-рідини в стан утримання ґрунтами. Цей процес, особливо помітний на периферії лінзи, в її бічній і верховій частинах, де і амплітуда коливань РГВ більша, і товщина шару ЛНП-рідини менша, призводить до суттєвої трансформації осередку забруднення, аж до повного зникнення шару мобільного ЛНП. Останній етап це період просторової стабілізації (точніше, уповільнення процесів трансформації) осередку.

На підставі загальних міркувань можна стверджувати, що трансформація якісного складу вуглеводневих скупчень внаслідок селективної дії *випаровування, розчинення, окиснення та біоокиснення* (біодеградації) розпочинається, як тільки ЛНП потрапляє у ГС. Але на різних етапах трансформації осередку і в різних його частинах інтенсивність і порівняна значущість цих процесів має суттєво відрізнятися. Так, на початку утворення осередку забруднення, коли ЛНП потрапляє на поверхню землі і відбувається його всмоктування у приповерхневі шари ґрунтової товщі, найбільш інтенсивним процесом має бути випаровування, причому випаровуються насамперед леткі ВВ*. Інтенсивного окиснення зазнають ВВ, які містяться на порівняно невеликих глибинах у поровому середовищі, збагаченому киснем. Наявність кисню також є однією з умов життєдіяльності аеробних бактерій, завдяки яким відбувається розклад ВВ. Найбільш стійкими до хімічного окиснення є алкани (насичені УВ),

ті ж самі алкани виявляються найбільш доступними для мікробних ферментів. Натомість, ароматичні ВВ мають дещо більшу реакційну здатність, проте їх руйнування мікроорганізмами відбувається набагато повільніше і при певних умовах [Коронелли, 1982]. Якби ці процеси, що різняться за механізмом дії, були б рівноцінними за своєю ефективністю, то зараз ми б спостерігали дуже «строкату» картину розподілу ВВ у різних частинах осередку забруднення. Те, що ми відмічаємо повсюдно однорідність сукупності показників, які характеризують зв'язок між вмістом БТЕК і вмістом ВВ у водному розчині, можна інтерпретувати як наслідок переважаючої дії одного з вищевказаних процесів, який до всього ще має нівелюючий ефект. На нашу думку, таким процесом може бути лише *розчинення* ВВ з подальшим їх перемішуванням у потоці ґрунтових вод.

Якщо на цьому закінчити статтю, може виникнути непорозуміння щодо значущості процесів трансформації осередку забруднення. Зокрема, те, що вище вказано про роль *розчинення*, загалом правильно, натомість, безумовно вірно і те, коли розглядаються зміни фізичного стану і хімічного складу забруднювача в тій частині осередку, де ґрунти вміщують (утримують) іммобільну ЛНП-рідину. Саме тут внаслідок розчинення цієї рідини утворюється значна, а може навіть більша частина ареалу забруднених ґрунтових вод, саме тут спостерігається коливання концентрації ВВ у ґрунтових водах, яке можна пояснити лише змінами інтенсивності низхідного потоку інфільтраційних вод, що проходять крізь товщу забруднених ґрунтів і переносять розчинені ВВ у водоносний горизонт. За межами цієї частини осередку інфільтраційні води проходять крізь «чисті» ґрунти, тому виконують іншу не менш значущу функцію – розбавлення водного розчину, тобто поступове зменшення концентрації ВВ у ґрунтових водах (може бути аж до безпечного рівня).

Автори статті висловлюють подяку співробітникам відділу охорони підземних вод ІГН НАН України Р.Б. Гаврилюку, Г.І. Голубу, Ю.О. Загородньому, В.М. Підтикани за надані матеріали польових досліджень і пов'язані з ними консультації.

* При одній і тій самій молекулярній масі найлегше випаровуються *алкани*, меншою випаровуваністю характеризуються молекули *нафтенів*, найменша випаровуваність у *ароматичних ВВ*.

Список літератури / References

1. Брикс А.Л. Особенности исследования геологической среды юга Украины, загрязненной легкими нефтепродуктами. *Геол. журн.* 2010. № 4 (333). С. 105-110.
Bricks A.L., 2010. Features of the research of the subsurface polluted with aviation kerosene in the southern Ukraine. *Geologichnyy zhurnal*, № 4 (333), p. 105-110 (in Ukraine).
2. Гольдберг В.М., Газда С. Гидрогеологические основы охраны подземных вод от загрязнения. Москва: Недра, 1984. 262 с.
Gol'dberg V.M., Gazda S., 1984. Hydrogeological basics of protection of the groundwater from contamination. Moscow: Nedra, 1984, 262 p. (in Russian).
3. Гольдберг В.М. Взаимосвязь загрязнения подземных вод и природной среды. Ленинград: Гидрометеоиздат, 1987. 248 с.
Gol'dberg V.M., 1987. The relationship of groundwater contamination and the environment. Leningrad: Hydrometeoizdat, 248 p. (in Russian).
4. Коронелли Т.В. Микробиологическая деградация углеводородов и ее экологические последствия. *Биологические науки.* 1982. № 3. С. 2-13.
Koronelli T.V., 1982. Microbiological degradation of hydrocarbons and its environmental aftermath. *Biologicheskije nauki*, № 3, p. 5-13 (in Russian).
5. Огняник Н.С., Парамонова Н.К., Брикс А.Л. Эколого-гидрогеологический мониторинг территорий загрязнения геологической среды легкими нефтепродуктами. Киев: LAT&K, 2013. 254 с.
Ognianik N. S., Paramonova N. K., Bricks A.L., 2013. Ecological and hydrological monitoring of subsurface contamination areas with light petroleum products. Kiev: LAT&K, 254 p. (in Russian).
6. Основы изучения загрязнения геологической среды легкими нефтепродуктами / Н.С. Огняник, Н.К. Парамонова, А.Л. Брикс, И.С. Пашковский, Д.В. Коннов. Киев: [А.П.Н.], 2006. 278 с.
Ognianik N.S., Paramonova N.K., Bricks A.L., Pashkovskij I.S., Konnov D.V., 2006. The Fundamentals of studying of subsurface contamination with light petroleum products. Kiev: [A.P.N.], 278 p. (in Russian).
7. Техногенное загрязнение природных вод углеводородами и его экологические последствия / В. М. Гольдберг, В. П. Зверев, А. И. Арбузов и др. Москва: Наука, 2001. 125 с.
Gol'dberg V.M., Zverev V.P., Arbuzov A.I., Kazennov S.M., Kovalevskiy Yu.V., Putilina V.S., 2001. Anthropogenic pollution of natural waters with hydrocarbons and its ecological consequences. Moscow: Nauka, 125 p. (in Russian).

Стаття надійшла
16.03.2015