

М. С. Огняник, Н. К. Парамонова, О. М. Шпак

## КОНТРОЛЮЮЧИЙ МОНІТОРИНГ НА ТЕРИТОРІЯХ ІЗ ЗАБРУДНЕННЯМ ЛЕГКИМИ НАФТОПРОДУКТАМИ

*(Рекомендовано д-ром геол.-мінерал. наук В. М. Шовкоплясом)*

Освещены размещение наблюдательных точек, цель и процедура проведения контролирующего мониторинга за распространением пятен загрязнения и в зоне потенциальных источников (площадных, линейных, точечных) загрязнения легкими нефтепродуктами. Предложено вокруг объектов—потенциальных источников загрязнения устанавливать предупредительные зоны, а наблюдательные скважины в пределах зоны размещать в наиболее чувствительных узлах имитационных моделей массопереноса загрязнителя.

This paper describes the allocation of observation points, the goal and the procedure of controlling monitoring of oil plume spreading and a zone of potential (areal, linear, point) contamination sources. A compliance zone around objects-potential contamination sources was proposed and observation wells should be allocated in the most sensitive nodes of mass transport models.

Питання моніторингу геологічного середовища (ГС) висвітлені в роботах [1, 2 та ін.], де запропонована методика їх проведення відповідно до умов, що склались для конкретних об'єктів — від виявлення забруднення, його оцінки і прогнозу розповсюдження до обґрунтування санаційних робіт, без розгляду проблеми в цілому.

У зарубіжній літературі питання моніторингу забруднення ГС нафтопродуктами (НП) висвітлюються у зв'язку з дослідженнями випадків забруднення та проведенням відновлювальних робіт. Треба відмітити, що в процес моніторингу включаються не тільки спостереження за зміною рівнів і вмісту забруднювача, але й вивчення геолого-гідрогеологічних умов та водно-фізичних властивостей ґрунтів. Особливо слід наголосити на роботах Агентства охорони навколишнього середовища (EPA) [7, 8 та ін.], Американського нафтового інституту (API) [14], Центру повітряних сил по передових технологіях (AFCEE) [9, 14 та ін.]. Ці дослідження присвячені в основному методам опробування фізичних властивостей різних компонентів ГС, їх забруднення НП, визначенню наявності біодеградації та інших деструктивних процесів, тестуванню санаційних заходів та створенню моделей, що їх відображають. Питання власне постановки моніторингу, особливо у зв'язку з етапами і цілями дослідження не розглядалися.

Нами створена концепція проведення моніторингу в ГС з існуючим або можливим нафтопродуктовим забрудненням залежно від стадії дослідження [4], що складається з оціночного, спеціального і контролюючого моніторингів.

У даній статті описано створення контролюючого моніторингу за розповсюдженням існуючої плями забруднення і в зоні потенційних джерел забруднення.

### 1. Контролюючий моніторинг за розповсюдженням забрудненої плями

Моніторинг проводиться в середовищі (ґрунти і повітря зони аерації, підземні води), де відбувається перенесення забруднювача до об'єкта впливу забруднення (ОВЗ), коли для нього існують помірний і низький ризики забруднення та необхідно попередити про виникнення високого ризику.

Розміщення контролюючих точок спостереження залежить від динаміки забрудненої плями. Якщо забруднена пляма збільшується, а ОВЗ буде забрудненим через 7—10 років (помірний ризик), то контролюючі точки спостереження розташовуються перпендикулярно до центральної лінії плями на відстані пересування забруднювача за термін 2—3 роки. При наближенні до них плями контролюючі точки спостереження переносяться далі на таку або скориговану за даними спостереження відстань у напрямку до ОВЗ.

Якщо забруднення ОВЗ можливе за термін, більший за 10 років, або рівень ризику низький (забруднення можливе при деяких стохастичних змінах), то три контролюючі точки спостереження розміщуються перпендикулярно до лінії току в напрямку забрудненої плями на відстані можливого пересування плями до ОВЗ за термін 2—3 роки. Опробування в точках спостереження проводяться спочатку через рік, а потім у міру наближення забруднювача до ОВЗ, через півроку і поквартально.

Основна мета опробування — оцінити наявність забруднювача, в основному це БТЕК (бензол, толуол, етилбензол, ксилол) і загальні нафтові вуглеводні. Так, для контролю забруднення підземного повітря відбираються його проби для лабораторного визначення або аналізаторами безпосередньо біля контролюючих точок спостереження. Якщо забруднювач мігрує з підземними водами, то відбираються проби води. Якщо загроза надходить від лінзи легких нафтопродуктів (ЛНП), то заміряється рівень ґрунтових вод (РГВ) і здійснюється стеження за появою над ним шару ЛНП.

## **2. Контролюючий моніторинг у зоні потенційних джерел забруднення**

Джерелом нафтопродуктового забруднення є об'єкти нафтопродуктозабезпечення, тобто всі споруди, пов'язані з видобуванням, зберіганням та очищенням нафти і стоків, переробкою, транспортуванням і споживанням нафти та НП. Незважаючи на свою різноманітність, об'єкти нафтопродуктозабезпечення можуть бути об'єднані за інженерно-функціональними особливостями у три групи: площові, точкові, лінійні.

До площових об'єктів відносяться нафтові родовища, нафтоочисні та нафтохімічні заводи, аеродроми, де об'єкти нафтопродуктозабезпечення розташовані на великій площі, але достатньо близько один від одного, формуючи єдиний ареал забруднення природного середовища (повітря, ґрунтів, зони аерації, підземних вод).

Точкові об'єкти утворюють зосереджене нафтопродуктове навантаження. Це склади паливних і мастильних матеріалів (ПММ), нафтобази, автозаправні станції, ремонтні

майстерні, ділянки для мийки, накопичувачі забруднених нафтопродуктових стоків.

Лінійні об'єкти пов'язані з транспортуванням нафти і НП як магістральними і розподільними трубопроводами, так і залізничним, шосейним, річковим і морським транспортом.

### **2.1. Контролюючий моніторинг у зоні площових і лінійних об'єктів**

На площових об'єктах забруднення відбувається внаслідок потрапляння в атмосферу викидів газоподібних вуглеводнів (свердловини, заводи, транспорт) і рідких ЛНП (літаки). Газоподібні вуглеводні розчиняються в атмосферній волозі і у вигляді забруднених атмосферних опадів надходять до зони аерації, а потім у вигляді забрудненої інфільтрації — на РГВ. Рідкі ЛНП розпилюються в атмосфері і у вигляді дрібних крапельок осідають на поверхні землі. Далі вони з атмосферними опадами в розчиненому або емульгованому вигляді опускаються на РГВ, забруднюючи їх на великій площі в напрямку переважаючих вітрів або злітно-посадкових смуг. Якщо за потоком підземних вод знаходяться ОВЗ, то на відстані від них 2—3 років фільтрації встановлюються спостережні свердловини для періодичного відбору проб води для визначення БТЕК і загальних нафтових вуглеводнів.

Лінійні системи мають специфічні особливості [5], які необхідно враховувати при організації моніторингу ГС:

- значна довжина трас, що проходять через різні кліматичні і природні зони з різноманітними інженерно-геологічними умовами;
- тенденції збільшення технологічних навантажень на трубопроводи, пов'язані зі зростанням об'ємів перекачуваних продуктів;
- надзвичайно серйозні екологічні наслідки для довкілля, спричинені аваріями трубопроводів, з чого випливає потреба забезпечити достатньо високу надійність їх роботи;
- ув'язка різноманітних споруд нафтопроводів з інженерними комплексами родовищ.

У разі освоєння великих нафтових родовищ, коли потрібно видобувати, очищати

і транспортувати нафту, створюється складна регіональна природно-технічна система (ПТС), яка займає величезну територію. У випадку створення й експлуатації таких систем внаслідок порушення природних умов, зміни теплового та водного режимів ґрунтів активізуються різноманітні екзогенні процеси, а також спостерігається інтенсивний прояв інженерно-геологічних процесів, які призводять до руйнування трубопроводів і вилливу нафти. Тому система моніторингу ГС на лінійних об'єктах повинна створюватися для оцінки стану ПТС і для періодичного прогнозування зміни інженерно-геологічних умов, щоб оперативної приймати рішення і рекомендації щодо управління цією системою.

Методика дослідження інженерно-геологічного середовища і контролю за його станом розглянута в роботі [5] і не є метою наших досліджень.

Якщо серед лінійних об'єктів є точкові, то біля них встановлюється контролюючий моніторинг відповідно до описаного нижче. При виникненні аварійних виливів проводяться спеціальні роботи по видаленню ЛНП з поверхні землі і ґрунту, а при проникненні ЛНП на глибину — спеціальні дослідження та моніторинг.

## 2.2. Контролюючий моніторинг навколо точкових об'єктів

У межах площових об'єктів, як правило, знаходяться точкові об'єкти (склади ПММ, накопичувачі твердих і рідких забруднених відходів і т. п.), які можуть стати джерелом інтенсивного надходження в ГС рідких ЛНП або забрудненої води, але тільки при виникненні витоків після порушення цілісності емностей та облицювання.

Для того, щоб не дати розповсюджуватись забруднювачу, необхідно якнайшвидше зафіксувати його надходження. Це здійснює контролюючий моніторинг, який може зафіксувати появу забруднювача в межах застережної зони.

Застережна (compliance) зона (рис. 1) — це зона, на межах якої забруднювач не повинен перевищувати гранично допустиму концентрацію (ГДК), тобто забруднювач має утримуватись в цій зоні користувачем, який у разі невиконання сплачує штраф. До речі,

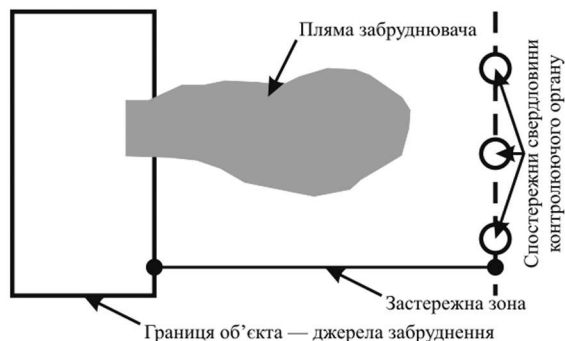


Рис. 1. Розташування застережної зони

границя застережної зони в США встановлюється контролюючими органами не далі як 150 м за потоком від можливого джерела забруднення. На наш погляд, для різних джерел забруднення, гідрогеологічних умов і знаходження сприймачів забруднення величина і розташування застережної зони будуть різними. Тому вона повинна обґрунтуватися спеціальними дослідженнями і розрахунками в період проектування об'єктів, що можуть стати джерелом забруднення ГС, і узгоджуватись з контролюючими органами, наприклад Мінприроди або його територіальними представниками.

Отже, користувач зацікавлений, щоб забруднення було якнайшвидше виявлено і ліквідовано. Інакше йому доведеться сплачувати штраф і ліквідувати забруднення на більшій площі та більше за об'ємом. В Україні встановлення застережної зони навколо об'єктів, які є потенційним джерелом забруднення, не регламентується. Існує тільки Постанова Кабінету Міністрів України № 175 "Про затвердження методики оцінки збитків від наслідків надзвичайних ситуацій техногенного і природного характеру" від 15 лютого 2002 р., де "...фактом забруднення підземних вод є виявлення експертним шляхом за допомогою хіміко-аналітичних методів нафти чи інших забруднюючих речовин у пробах підземних вод та в місцях їх виходів на поверхню землі", а також "...є виявлення втрат НП чи інших забруднюючих речовин з місткостей для зберігання чи акумуляції, з продуктопроводів, інших об'єктів" [6]. Дане визначення вказує лише на наявність забруднення в певній частині підземних вод, а не на надзвичайну ситуацію, коли забруднення розчиненими вуглеводнями має вплив на здоров'я людей та водну і поверхневу біосферу. Крім

того, не вказуються місця відбору проб для виявлення в них забруднювача.

В місцях зберігання і акумуляції НП і нафтопродуктових стоків втрати їх у ГС неминучі. Тому є сенс встановити обґрунтовану застережну зону, в якій користувач утримував би забруднювач, не допускаючи надзвичайних ситуацій. Контролюючі органи повинні стежити за появою забруднювача в підземних водах з концентрацією, більшою за ГДК, на границі застережної зони. Коли забруднення вийде поза межі застережної зони, тоді користувач повинен сплатити штраф і провести відповідні інженерні заходи по утриманню забруднювача в застережній зоні, а не платити за збитки від наслідків надзвичайних ситуацій, які будуть просто недопущені.

Дана проблема пов'язана з тим, що проектування мережі контролюючого моніторингу відбувається, коли водоносний горизонт ще не забруднений. Для її вирішення застосовуються якісні та імітаційні підходи. Якісні підходи [10], які базуються на основі розрахунків і здорового глузду гідрогеолога, не дають критеріїв для квантифікації відносної значущості численних потенційних місць опробування. Імітаційні підходи для проектування мережі моніторингу застосували J. Massman та R. A. Freeze [11], а також P. D. Meyer і E.D. Brill [12] при невизначеності місць надходження забруднювача і в параметрах водоносного горизонту, результатом чого є невизначеність потенційних шляхів міграції забруднювача. Задача розв'язується за допомогою методу Монте-Карло, який генерує тисячі можливих випадкових моделей масопереносу. Мережа спостережних точок (СТ) визначається шляхом оптимізаційної моделі, що вирішує їх розміщення з максимальним покриттям так, щоб було виявлено максимальну кількість реалізацій плями. Цей підхід є неймовірно трудомістким і витратним. Крім того, числові розрахунки призводять до численних похибок, таких як числа дисперсія і штучна осциляція. Невизначеність у параметрах масопереносу робить одержані результати досить неоднозначними. А їх застосування в розрахунках потребує ще більше комп'ютерної пам'яті та розрахункового часу, що робить цей підхід непрактичним у багатьох сферах застосування.

**Визначення місць розташування СТ у застережній зоні.** Ми пропонуємо СТ розміщувати в найбільш чутливих вузлах, які визначаються в процесі моделювання масопереносу забруднювача з урахуванням граничних умов, всіх параметрів фільтрації та масопереносу, в тому числі дисперсії, сорбції, деградації і т. п. При цьому в межах джерела забруднення задається відносна концентрація  $C_d = 1$ , а на границі застережної зони —  $C_3 = 0$ . Тоді одержаний розподіл концентрації забруднювача (в частках одиниці) вкаже на чутливість відповідного вузла до забруднення. Джерело забруднення можна розбити на окремі частини, із яких можливе надходження забруднювача, і промодельовувати чутливість до забруднення всіх вузлів у межах застережної зони. Чутливість кожного вузла ( $W_j$ ) визначається за формулою:

$$W_j = \sum_{i=1}^n C_j, \quad (1)$$

де  $C_j$  — відносна концентрація забруднювача при  $i$ -й реалізації його витоку.

СТ розміщуються у вузлах з найвищою чутливістю. Задача формулюється таким чином:

$$\max z = \sum_{j \in J} W_j x_j \quad \text{при умові} \quad \sum_{j \in J} x_j \geq P, \quad (2)$$

де  $j$  — площовий індекс місць СТ;  $J$  — ряд потенційних місць СТ;  $x_j = (0, 1)$ : 1 — якщо СТ встановлена у вузлі  $j$ , 0 — в протилежному випадку;  $P$  — кількість СТ.

Кількість СТ визначається з виразу:

$$\sum_{j \in J} q_j x_j \geq R, \quad (3)$$

де  $q_j$  — вартість установаження  $j$ -ї СТ;  $R < S + (Q_3 - Q_0)$  — прийнятні грошові ресурси;  $S$  — сума можливого штрафу;  $Q_3$  — вартість відновлення в межах застережної зони;  $Q_0$  — вартість відновлення в межах оптимальної зони.

При великій кількості вузлів і СТ можна застосувати цілочислове програмування.

В якості тестового прикладу розглянуто накопичувач забруднених стоків з відносною концентрацією  $C_d = 1$ , довжиною 120 м і шириною 10 м, розташований перпендикулярно до ліній току ґрунтових вод піщаного водоносного горизонту з уклоном  $i = 0,01$ , потужністю ( $m$ ) від 2 до 5 м і коефіцієнтами

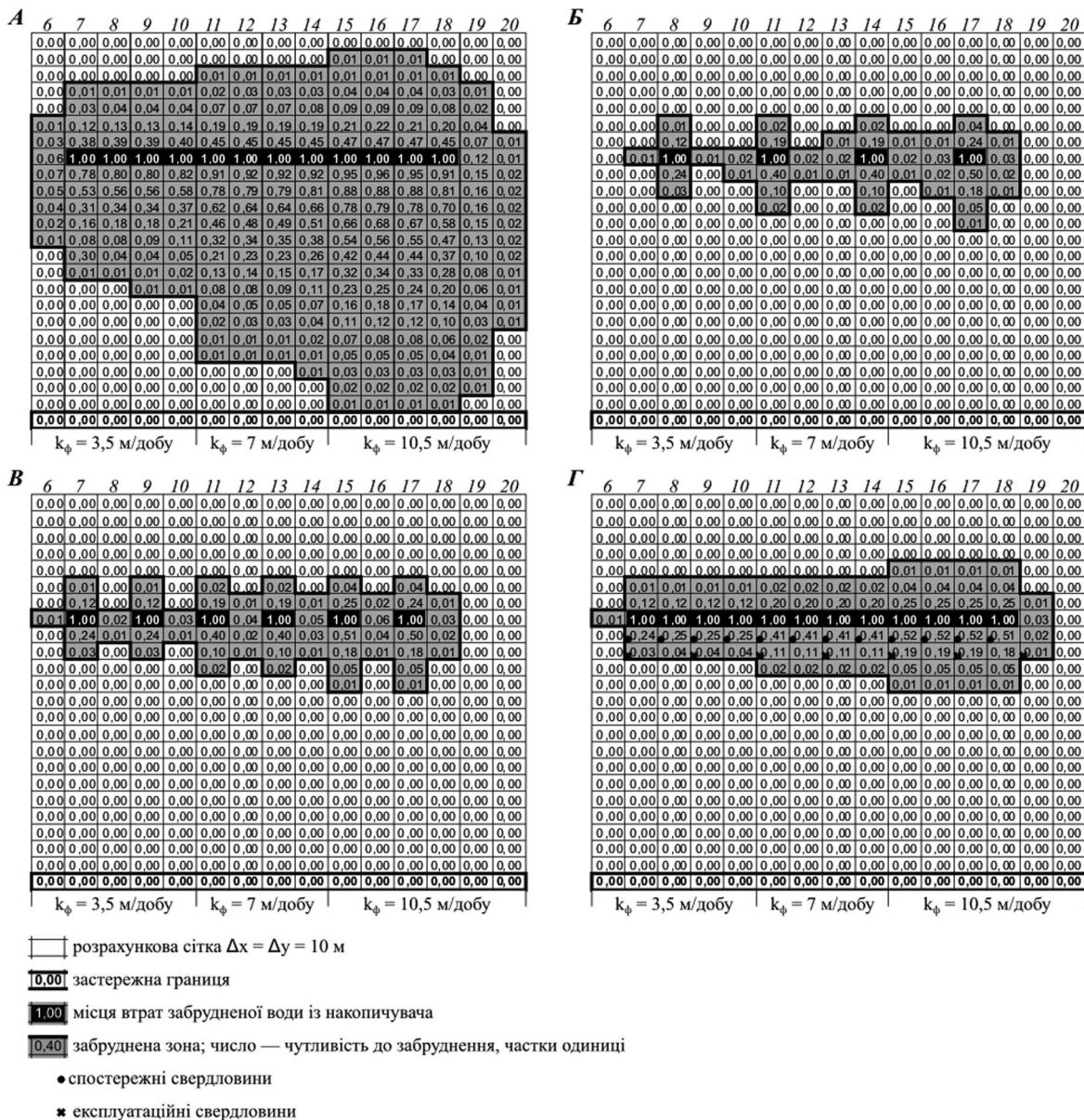


Рис. 2. Варіанти моделювання розповсюдження забруднювача: при суцільних втратах протягом 90 діб (А); протягом 10 діб при втратах із джерела забруднення через 20 м (Б); протягом 10 діб при втратах із джерела забруднення через 10 м (В); при суцільних втратах упродовж 10 діб (Г)

фільтрації, що змінюються через 40 м від 3,5 до 10,5 м/добу; враховано поздовжню дисперсію  $D_{\ell} = 10 \text{ м}^2/\text{добу}$  та активну пористість  $n_a = 0,25$ .

Границя застережної зони розташована вниз за потоком на відстані 150 м. Припускається, що в межах джерела забруднення відбуваються втрати забруднених стоків із швидкістю 100 мм/добу. Моделювання розповсюдження забруднення з дискретизацією  $\Delta x = \Delta y = 10 \text{ м}$  за програмою МТЗД

показало, що воно досягне застережної границі через 90 діб в зоні, де  $k_{\phi} = 10,5 \text{ м/добу}$ , через 130 діб, де  $k_{\phi} = 7 \text{ м/добу}$ , і через 240 діб, де  $k_{\phi} = 3,5 \text{ м/добу}$  (рис. 2, А). Збільшення  $k_{\phi}$  на 30% (5—15 м/добу) зменшило тільки термін досягнення границі застережної зони (70—190 діб). В обох випадках найбільш чутливим був перший ряд вузлів від накопичувача, в якому чутливість падала від 0,95 до 0,78 в напрямку зменшення  $k_{\phi}$  (рис. 2, А). Промодельовано розповсюд-

ження забруднення через 10 діб (рис. 2, Г), яке показало, що забруднення розшириться тільки на два вузли, тобто на 20 м, з чутливістю 0,52—0,24. Виявлена чутливість вузлів першого ряду, коли втрати в накопичувачі будуть не по всій довжині, моделюванням їх через один—два блоки (рис. 2, Б, В). Було встановлено, що сусідні блоки реагують на забруднення тільки при  $K_{\phi} = 10,5$  м/добу. При втратах через два блоки сусідні блоки практично не реагують. Тому, щоб виявити втрати забруднювача, які можуть бути в будь-якому місці, треба, щоб СТ знаходились у кожному блоці, тобто через 10 м. Всього необхідно побудувати 12 СТ, що коштуватиме

$$R = 12 \times 10\,000 = 120\,000 \text{ грн,}$$

де  $q_j = 10\,000$  грн — вартість обладнання однієї моніторингової свердловини глибиною 10 м в піщаному водоносному горизонті [3].

Якщо контролюючий моніторинг не буде встановлено, то забруднювач через 90 діб досягне застережної границі, і користувач заплатить штраф, припустимо,  $S = 100\,000$  грн. Крім того, йому доведеться відкачати і очистити об'єм води ( $V$ ), що знаходиться в межах площі застережної зони ( $F$ ):

$$F = 140 \times 140 = 19\,600 \text{ м}^2,$$

$$V = F \times m \times n_a = 14\,700 \text{ м}^3,$$

де  $m = 3$  м — середня потужність водоносного горизонту;  $n_a = 0,25$  — активна пористість.

Для відкачування води необхідно побудувати 31 експлуатаційну свердловину (одна експлуатаційна свердловина в піщаному водоносному горизонті обслуговує близько  $625 \text{ м}^2$  [3]), а вартість однієї експлуатаційної свердловини глибиною 10 м разом з трубопроводами, насосом та електропроводкою становить майже  $32\,000$  грн [3]. Отже, побудова 31 експлуатаційної свердловини обійдеться у  $992\,000$  грн. Крім того, потрібно очистити  $14\,700 \text{ м}^3$  відкачаної забрудненої води по  $125\,000$  грн за  $100 \text{ м}^3/\text{добу}$ , що потребує  $18\,375\,000$  грн. Таким чином, вартість відновлення в межах застережної зони становитиме:

$$Q_3 = 18\,375\,000 + 992\,000 = 19\,367\,000 \text{ грн.}$$

При своєчасному виявленні забруднення доведеться очищати зону завширшки не більше 30 м, а також відкачати та очистити  $3150 \text{ м}^3$  забрудненої води. Для цього необхідно побудувати сім експлуатаційних

свердловин, що коштуватиме  $224\,000$  грн, а очистка води обійдеться у  $3\,937\,500$  грн. Відновлення в оптимальній зоні становитиме  $Q_0 = 4\,161\,500$  грн.

Таким чином, збитки користувача від несвоєчасного виявлення забруднення ґрунтових вод будуть такими:

$$S + (Q_3 - Q_0) = 100\,000 + (19\,367\,000 - 4\,161\,500) = 15\,305\,500 \text{ грн,}$$

що набагато більше, ніж він витратить на облаштування і проведення контролюючого моніторингу ( $120\,000$  грн) і на відновлення в оптимальній зоні шириною 30 м ( $4\,161\,500$  грн).

## Висновки

На підставі викладеного можна стверджувати таке.

1. Проведення контролюючого моніторингу забрудненої плями дасть змогу визначити швидкість її розповсюдження і попередити настання високого ризику для об'єкта-сприймача.

2. Контролюючий моніторинг в зоні потенційних джерел забруднення забезпечить своєчасне виявлення забруднювача у ГС.

3. Контролюючий моніторинг на потенційних об'єктах-забруднювачах повинен проектуватись і будуватись разом з об'єктом.

4. Встановлення застережної зони навколо об'єктів-забруднювачів необхідно законодавчо регламентувати. Її величина і розташування повинні мати наукове обґрунтування.

5. Проведення контролюючого моніторингу в межах застережної зони і недопущення надзвичайних ситуацій економічно вигідно як користувачу, так і державі.

1. Демьохін Г. А. Моніторинг вод у системі їх охорони від забруднення (в умовах техногенного впливу підприємств нафтопереробної промисловості): Автореф. дис. ... канд. геогр. наук: 11.00.11. — Харків, 2001. — 19 с.
2. Крайнюков О. М. Особливості функціонування моніторингу на територіях, прилеглих до нафтогазовидобувних та переробних комплексів (на прикладі Харківської області) // Зб. матеріалів наук.-практ. конф. "Моніторинг навколишнього середовища: науково-методичне, нормативне, технічне, програмне забезпечення", 18—22 верес. 2006 р., м. Коктебель. — К.: НПЦ "Екологія. Наука. Техніка", 2006. — С. 68—70.

3. *Ліквідація* наслідків забруднення підземних та поверхневих вод і ґрунтів на території державного дендропарку "Олександрія" в м. Біла Церква Київської обл.: Робочий проект природно-відновлювальних робіт / НВЦ "Інгеоком"; керівник В.Г. Максимов. — Інв. № IV-08/206-РП. — К., 2006. — 120 с.
4. *Огняник М. С., Парамонова Н. К., Загородній Ю. В.* Основні напрямки та задачі моніторингу територій, забруднених легкими нафтопродуктами // *Матеріали наук.-практ. конф. "Екологічна безпека техногенно-перевантажених регіонів та раціональне використання надр"*, 4—8 черв. 2007 р., м. Коктебель. — К.: НПЦ, "Екологія. Наука. Техніка", 2007. — С. 97—99.
5. *Рудько Г. І., Адаменко О. М.* Екологічний моніторинг геологічного середовища: Підручник. — Львів: Вид. центр ЛНУ ім. Івана Франка, 2001. — 260 с.
6. *Постанова* № 175 КМ України "Про затвердження Методики оцінки збитків від наслідків надзвичайних ситуацій техногенного і природного характеру" від 15 лютого 2002 р. (із змінами, внесеними згідно з Постановою КМ № 862 (862-2003-п) від 04.06.2003 р.). — <http://zakon.rada.gov.ua/cgi-bin/laws/main.cgi?nreg=175-2002-%EF>.
7. *Dupont R. R., Sorensen D. L., Kembrowski M. et al.* Monitoring and assessment of in-situ biocontainment of petroleum contaminated groundwater plumes // EPA/600/SR-98/020. — 1998. — <http://www.p2pays.org/ref/07/06450.pdf>
8. *Handbook of suggested practices for the design and installation of groundwater monitoring wells* // U.S. EPA 16 0014-89 1034, 1991. — 210 p.
9. *Hinchee R. E., Ong S. K., Miller R. N. et al.* Test Plan and Technical Protocol for a Field Treatability Test for Bioventing // Rev. 2 U.S. Air Force Center for Environmental Excellence. Brooks Air Force Base, Texas. — 1992. — <http://www.afcee.af.mil/shared/media/document/AFD-070927-092.pdf>
10. *Loaiciga H. A., Charbeneau R. J., Everett L. G. et al.* Review of groundwater quality monitoring network design // *J. Hydraul. Eng.* — 1992. — № 1. — P. 11—37.
11. *Massmann J., Freeze R. A.* Groundwater contamination from waste management sites: The interaction between risk based engineering design and regulatory policy // *Water Resour. Res.* — 1987. — № 2. — P. 351—380.
12. Meyer P.D., Brill E.D. A method for location wells in a groundwater monitoring network under conditions of uncertainty // *Ibid.* — 1988. — № 8. — P. 1277—1282.
13. *Methods for Determining Inputs to Environmental Petroleum Hydrocarbon Mobility and Recovery Models* // API Publication, № 4711. July 2001. — <http://www.api.org/ehs/groundwater/upload/4711.pdf>
14. *Wiedemeier T., Wilson J. T., Kampbell D. H. et al.* Technical protocol for implementing intrinsic remediation with long-term monitoring for natural attenuation of fuel contamination dissolved in groundwater // Air Force Center for Environmental Excellence Technology Transfer Division Brooks Air Force Base, Texas. — Vol. 1. — 1991. — 323 p. — <http://www.afcee.af.mil/shared/media/document/AFD-071211-039.pdf>

Ін-т геол. наук НАН України,  
Київ  
E-mail: gwp\_ign@gwp.org.ua

Стаття надійшла  
26.01.10