

УДК 622.268:622.833.001.5

МОДЕЛЬ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ЗАБРУДНЮЮЧИХ РЕЧОВИН ПІД ВПЛИВОМ УХИЛУ ПОВЕРХНЕВОГО СТОКУ ТА СТРУКТУРНОГО ОСЛАБЛЕННЯ ПОРІД

Філатов В. Ф., Селяков Б. І., Д'яченко Н. О., Дуброва Н. О.
(УкрНДМІ НАНУ, м. Донецьк, Україна)

В работе предложена математическая модель распространения загрязняющих веществ под влиянием уклона поверхностного стока, структурного ослабления пород и коэффициента фильтрации, основанная на интерпретации результатов спектрального анализа и разработанных с целью оценки ореолов элементного загрязнения геологического массива по вертикали и латерали геохимических статичных моделей распространения загрязняющих веществ.

We propose mathematical model for propagation of pollutants influenced by the incline of the surface water flow, structural rock loosening and filtration factor based on the interpretation of the results of spectral analysis and geochemical static pollutant-propagation models developed with the aim of evaluation of haloes of element pollution of rock mass vertically and along the strike.

В результаті технологічної діяльності об'єктів промислової агломерації відбувається негативна зміна геохімічного стану геологічного масиву. Особливої уваги заслуговують підприємства хімічної промисловості, що характеризуються різноманітністю сировини, специфічністю технологічних процесів та складуванням відходів виробництва в межах території підприємства. Це надає змогу до розповсюдження забруднюючих речовин (ЗР) в геологічному масиві по вертикалі та латералі.

Проведені нами дослідження та аналіз теоретичних матеріалів [1-3] і натурних геохімічних спостережень за розповсюдженням поллютантів [4] дозволяє констатувати, що основні чинники, які впливають на характер їх міграції - це: фізико-хімічні властивості забруднювача; літолого-мінералогічний склад геологічного масиву наявність органічних залишків; температура; ступінь аерованості; швидкість фільтрації підземних вод і так далі.

Додатковими чинниками, що впливають на характер розповсюдження забруднювачів є: ухил, характер природного і техногенного рельєфу і інтенсивність структурного ослаблення порід.

Мета математичного моделювання – прогноз ореолів розповсюдження забруднювачів в умовах інтенсивного структурного ослаблення порід, з урахуванням особливостей ухилу природного, а в подальшому, техногенного рельєфу.

Задача – отримати математичну модель зміни концентрації ЗР в i -той крапці, з висотною відміткою h у момент часу t .

Моделювання виконувалося на основі даних, що були отримані в результаті проведення досліджень стану геологічного середовища в зоні промвідвалів Горлівського хімзаводу (рис.1).

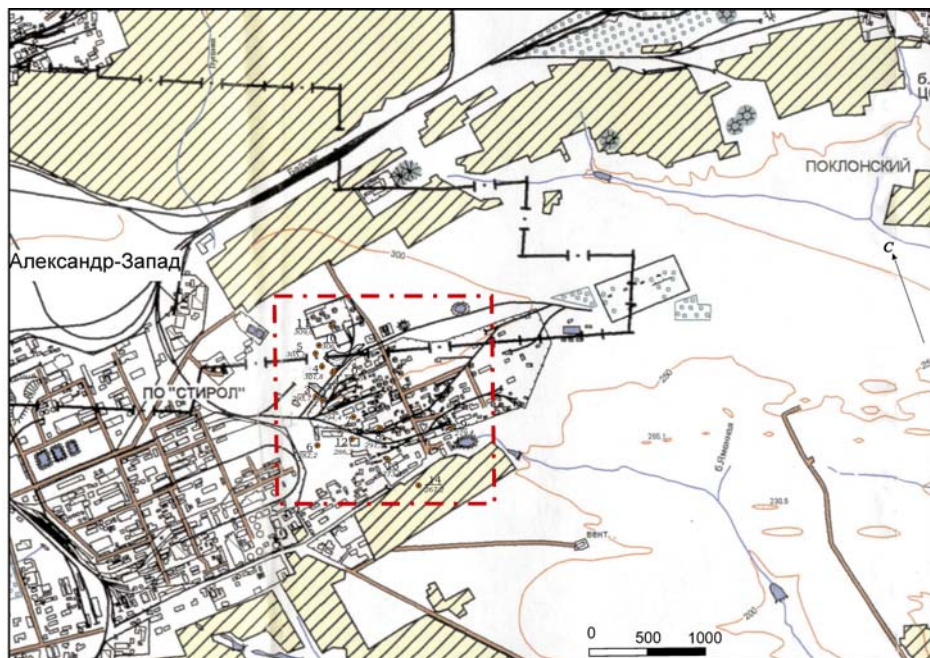


Рис. 1. Ситуаційний план ділянки досліджень та мережі геохімічного моніторингу

Горлівський хімзавод розташовано у Центральному районі Донбасу. Ділянка, на якій розміщені відвали (рис. 2), знаходиться у межах гірничого відводу шахти «Олександр-Захід», що розташована у Північному крилі Головної антикліналі Донбасу.

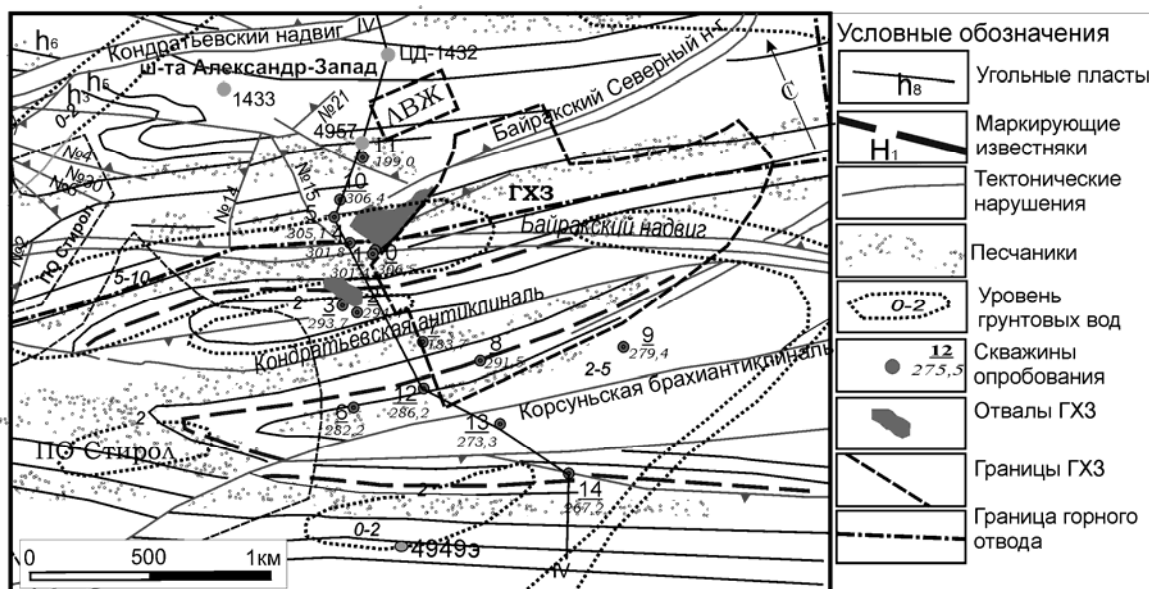


Рис. 2. Деталізація літолого-тектонічної будови ділянки досліджень та мережі геохімічного моніторингу

Для оптимального і коректного просторового аналізу даних геохімічного моніторингу, визначення місць фактичної локалізації забруднення і встановлення їх можливого вертикального проникнення за рахунок міграції по зонах тектонічної тріщинуватості в умовах складної тектонічної будови ділянки, на якій розташовані поверхневі джерела забруднення, виникла необхідність в побудові геологічного розрізу по профільній лінії геохімічного моніторингу (рис. 3, а). Тектонічні тріщини грають найбільш значну роль у формуванні проникності гірських порід. Це зв'язано, головним чином, з тим, що розривні порушення забезпечують інтенсивну циркуляцію ґрунтових вод та ЗР, що в них містяться. Лінія розрізу має орієнтування вхрест простягання основних тектонічних структур, що розташовані як в північному крилі антикліналі, так і в її склепінній частині, з метою оптимального обхвату території геохімічного випробування і максимального стратиграфічного інтервалу.

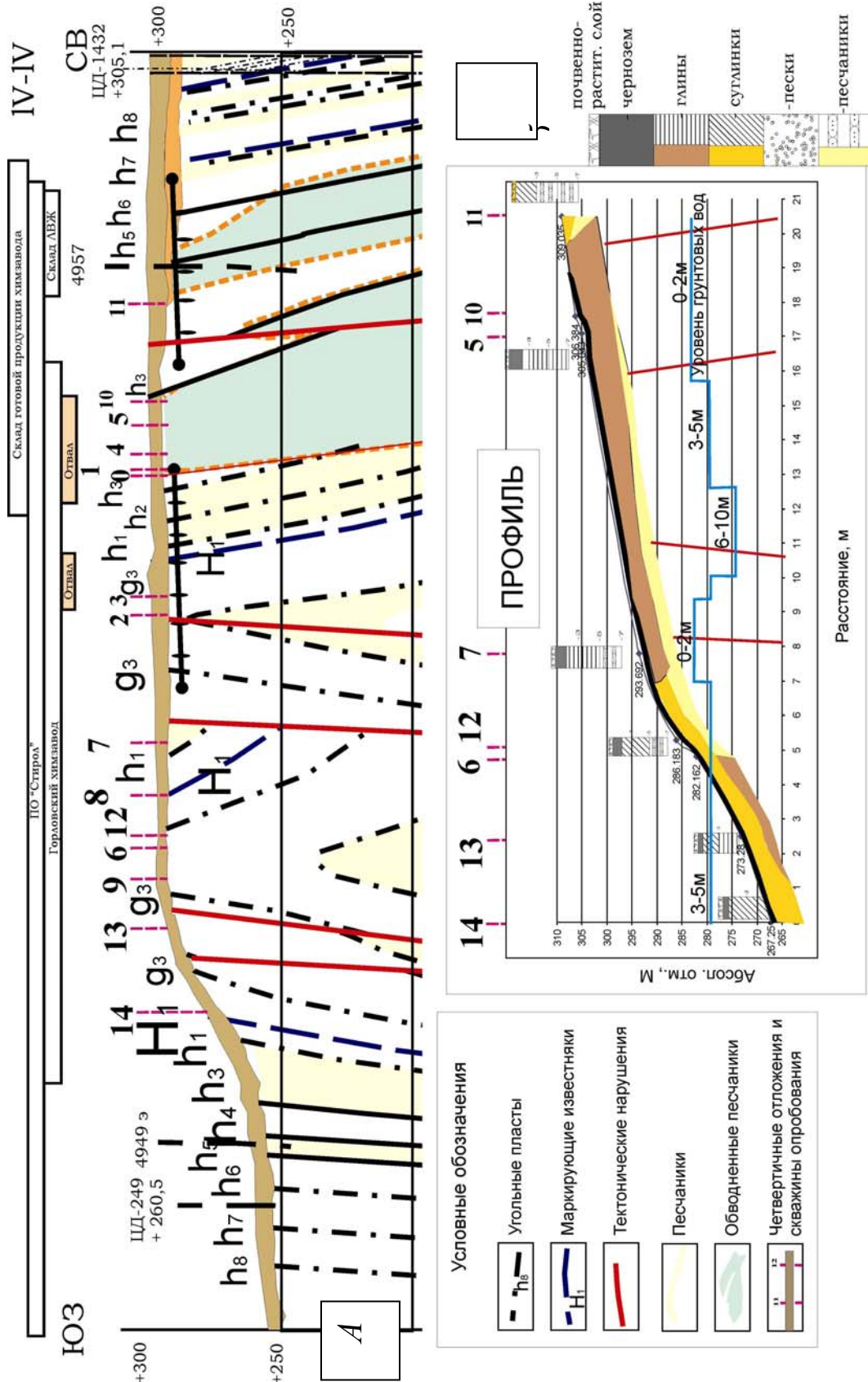


Рис. 3. Геологічний розріз по лінії IV-IV (а) з деталізацією вертикального розповсюдження елювіально-делювіальних суглинку-піщаних літологічних одиниць (б)

Додатково, нами враховувався і рівень ґрунтових вод зони інтенсивного водообміну, який в значній мірі визначає хід міграції забруднювача у вигляді винесення речовини з одного літологічного комплексу в іншій (рис. 3, б).

Підземні води є у всіх відкладах і утворюють ряд водоносних горизонтів, що знаходяться в складному гідравлічному зв'язку між собою і поверхневими водами. Живлення горизонтів відбувається за рахунок інфільтрації атмосферних опадів і паводкових вод. Горизонти є незахищеним від хімічного забруднення унаслідок малої потужності зони аерації і тісного гідравлічного зв'язку з поверхневими водами. Зони підвищеної тріщинуватості також сприяють водообміну між ізольованими горизонтами і забезпечують міграцію ЗР.

Побудова геохімічної статичної моделі забруднення важкими металами та неметалами, наприклад, сіркою, проводилося за даними результатів спектральних аналізів відібраних проб, що були нормовані у ГДК з урахуванням фонових концентрацій (табл. 1).

Нами проведена оцінка вертикального розподілу нормованих концентрацій всіх виявлених хімічних елементів за допомогою аналізу графіків залежності величин концентрацій ЗР від глибини їх виявлення (рис. 4).

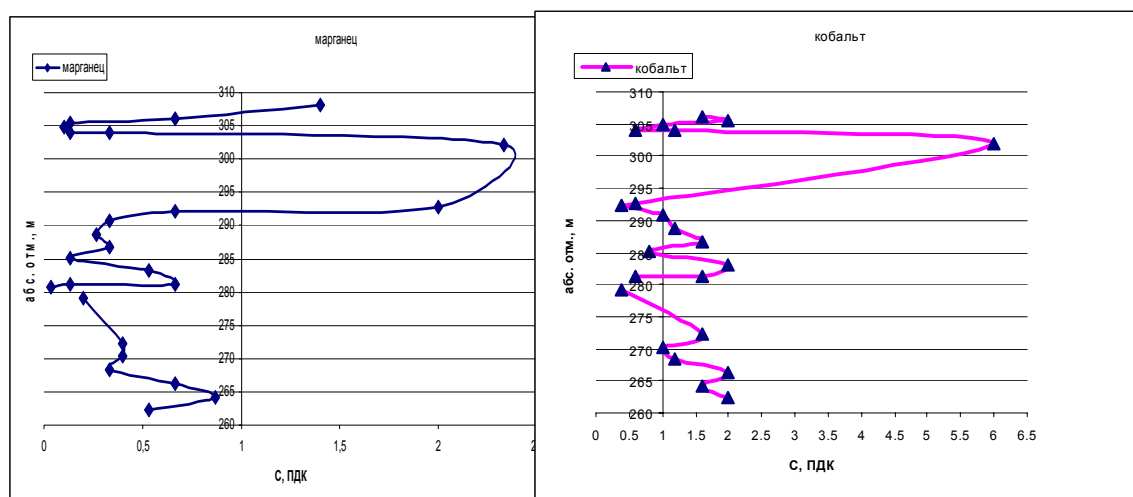


Рис. 4. Графіки вертикального розподілу приведених до ГДК концентрацій марганцю (Mn) та кобальту (Co) в ґрунтах (за даними спектрального аналізу)

Таблиця 1
 Концентрація хімічних елементів, що нормовані в ГДК, (1-3 ступені небезпеки) за даними
 спектрального аналізу

| абс. відм. свердл., м | абс. відм. отб. проб., м | № свердл. (глиб.), м | С (Mn), ГДК | С (S), ГДК | С (Co), ГДК | С (V), ГДК | С (Ni), ГДК | С (Cr), ГДК | С (Mo), ГДК | С O, ГДК | С (Cu), ГДК | С (Pb), ГДК | С (Se), ГДК | С (У), ПДК |
|-----------------------|--------------------------|----------------------|-------------|------------|-------------|------------|-------------|-------------|-------------|----------|-------------|-------------|-------------|------------|
| 309.035 | 308.035 | 11 (1) | 1.4 | 1.875 | | 1.333 | 1.11765 | 1 | 7.1429 | 2.5381 | 0.5455 | 1 | 13.3333 | 3 |
| | 306.035 | 11 (3) | 0.666667 | 2.5 | 1.6 | 2 | 0.706 | 2 | 2.8571 | 2.2843 | 1.0909 | 1.6667 | 20 | 1.5 |
| 306.384 | 305.384 | 10 (1) | 0.133333 | 1.25 | 2 | 0.266 | 0.1176 | 0.3 | 1.4286 | 0.5076 | 0.1091 | 0.3333 | 3.3333 | 5 |
| | 304.884 | 10 (1.5) | 0.1 | 1.25 | 1 | 0.2 | 0.0588 | 0.2 | 2.1429 | 1.5228 | 0.0727 | 0.2666 | 3.3333 | 0.5 |
| 305.043 | 304.043 | 5 (1) | 0.133333 | 1.25 | 0.6 | 0.266 | 0.2353 | 0.1 | 4.2857 | 0.5076 | 0.1819 | 0.3333 | 4 | 0.4 |
| | 304.035 | 11 (5) | 0.333333 | 3.125 | 1.2 | 2 | 0.9412 | | 14.2857 | 1.5228 | 1.0909 | 1.6666 | 26.6666 | 3 |
| | 302.035 | 11 (7) | 2.333333 | 1.25 | 6 | 3.333 | 2.353 | | 21.4286 | 0.5076 | 1.4545 | 10 | 13.3333 | 2 |
| 293.692 | 292.692 | 7 (1) | 2 | | 0.6 | 0.333 | 1.29 | 0.2 | 2.8571 | 4.069 | 0.9091 | 0.6666 | 5.3333 | 1 |
| | 292.192 | 7 (1.5) | 0.666667 | | 0.4 | 0.2 | 0.1176 | 0.2 | 2.1429 | | 0.1818 | 0.1666 | 5.3333 | 1 |
| | 290.692 | 7 (3) | 0.333333 | 6.25 | 1 | 0.266 | 0.3529 | 0.2 | 3.5714 | 4.0609 | 0.1818 | 0.3333 | 4 | 1 |
| | 288.692 | 7 (5) | 0.266667 | 4.375 | 1.2 | 0.533 | 0.9412 | 0.4 | 2.1429 | 1.5228 | 0.1818 | 0.6666 | 6.6666 | 1.5 |
| | 286.692 | 7 (7) | 0.333333 | 4.375 | 1.6 | 0.666 | 0.9412 | 0.6 | 1.4286 | 2.0305 | | 0.6666 | 6.6666 | 1 |
| 286.183 | 285.183 | 12 (1) | 0.133333 | 1.25 | 0.8 | 0.666 | 0.1176 | 1 | 14.2857 | 1.0152 | 0.5455 | 1.3333 | 6.6666 | 1.5 |
| | 283.183 | 12 (3) | 0.533333 | 1.875 | 2 | 1.333 | 1.7647 | 2 | 3.5714 | 2.0305 | 1.8182 | 1.3333 | 20 | 2.5 |
| | 281.183 | 12 (5) | 0.666667 | 3.125 | 1.6 | 1.333 | 1.1765 | | 4.2857 | 1.0152 | | 2 | 20 | 2 |
| 282.162 | 281.162 | 6 (1) | 0.133333 | 1.875 | 0.6 | 0.333 | 0.2353 | 0.35 | 5.714 | 2.0305 | 0.1818 | 0.6666 | 4 | 0.5 |
| | 280.662 | 6 (1.5) | 0.033333 | 1.25 | | 0.266 | 0.0588 | 0.4 | 3.5714 | 1.0152 | 0.1818 | 0.3333 | 3.3333 | 0.3 |
| | 279.183 | 12 (7) | | 1.25 | | 1.733 | | 2.5 | 1.4286 | 1.5228 | | 2.6666 | | 1.5 |
| | 279.162 | 6 (3) | 0.2 | 1.25 | 0.4 | 0.4 | 0.1176 | 0.35 | 5.7143 | 4.0609 | 0.1818 | 0.3333 | 4.6666 | 0.5 |
| | 272.28 | 13 (1) | 0.4 | 3.75 | 1.6 | 1.666 | 1.1765 | | 3.5714 | 2.0305 | 0.5454 | 1.6666 | 20 | 3 |
| 273.28 | 270.28 | 13 (3) | 0.4 | 3.75 | 1 | 1 | 0.2353 | 1 | 2.8571 | 1.5228 | 0.9091 | 1 | 20 | 2 |
| | 268.28 | 13 (5) | 0.333333 | 1.25 | 1.2 | 2 | 1.2941 | 3 | 5.7143 | 2.5381 | 0.7273 | 0.6666 | | 2.5 |
| 267.251 | 266.251 | 14 (1) | 0.666667 | 2.5 | 2 | 1.666 | 1.7647 | 2 | 3.5714 | 2.2843 | 0.9091 | 1.6666 | 26.6666 | 4 |
| | 264.251 | 14 (3) | 0.866667 | 2.5 | 1.6 | 1 | 1.1765 | | 2.8571 | 1.5228 | 1.0909 | 3.3333 | 26.6666 | 2 |
| | 262.251 | 14 (5) | 0.533333 | 2.5 | 2 | | 1.1765 | | 5.7143 | 1.5228 | | 6.6666 | 13.3333 | 2 |

Для вивчення впливу рельєфу земної поверхні на напрям природного стоку водного потоку, що містить ЗР, до аналізу побудована картограма коефіцієнтів ухилу рельєфу земної поверхні (рис. 5).

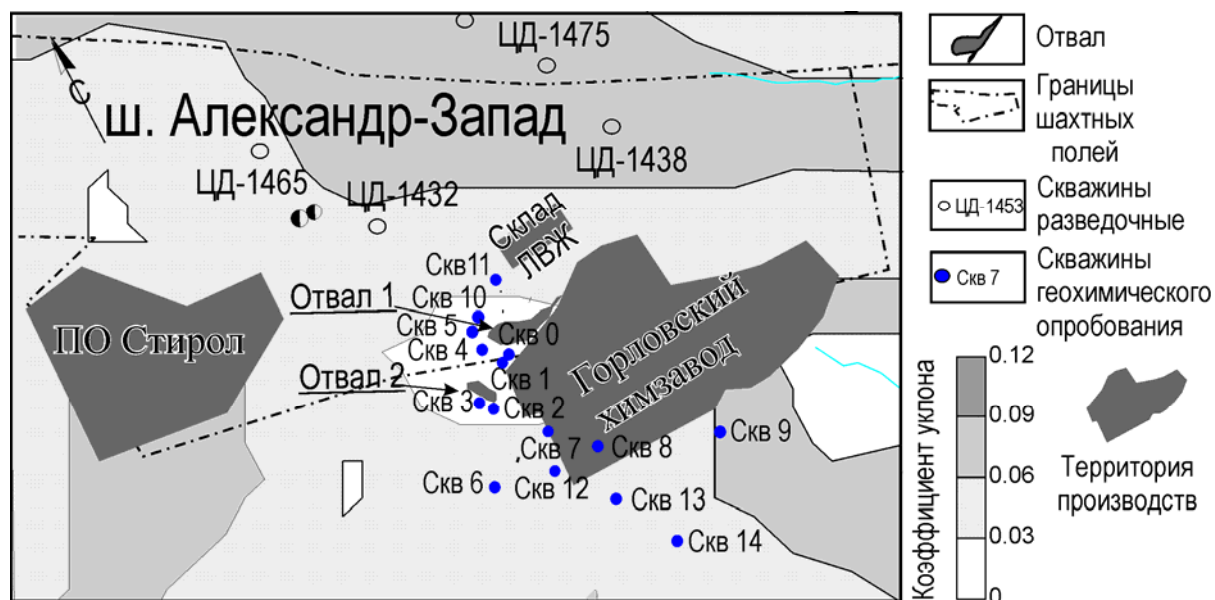


Рис. 5. Карта розподілу коефіцієнту ухилу рельєфу земної поверхні території дослідження

На основі даних спектрального аналізу була виконана кількісна оцінка ореолів забруднення по вертикалі і латералі для хімічних забруднювачів, наприклад, марганцю (Mn) та сірки (S), концентрація яких перевищила ГДК в 2-6 разів, побудовані статичні моделі вертикального і площадкового розподілу забруднювачів (рис. 6 -7).

Отриманий аналітичний матеріал, що ґрунтується на експериментальних польових геохімічних дослідженнях фактичного рівня забруднення геологічного масиву і його зміни з глибиною, дозволив нам розробити тривимірні моделі розповсюдження забруднюючих речовин за площею досліджень і прилеглих територій, де були відсутні свердловини геохімічного випробування, наприклад (рис. 8), та побудувати модель розповсюдження забруднюючих речовин під впливом схилу поверхневого стоку і структурного послаблення порід.

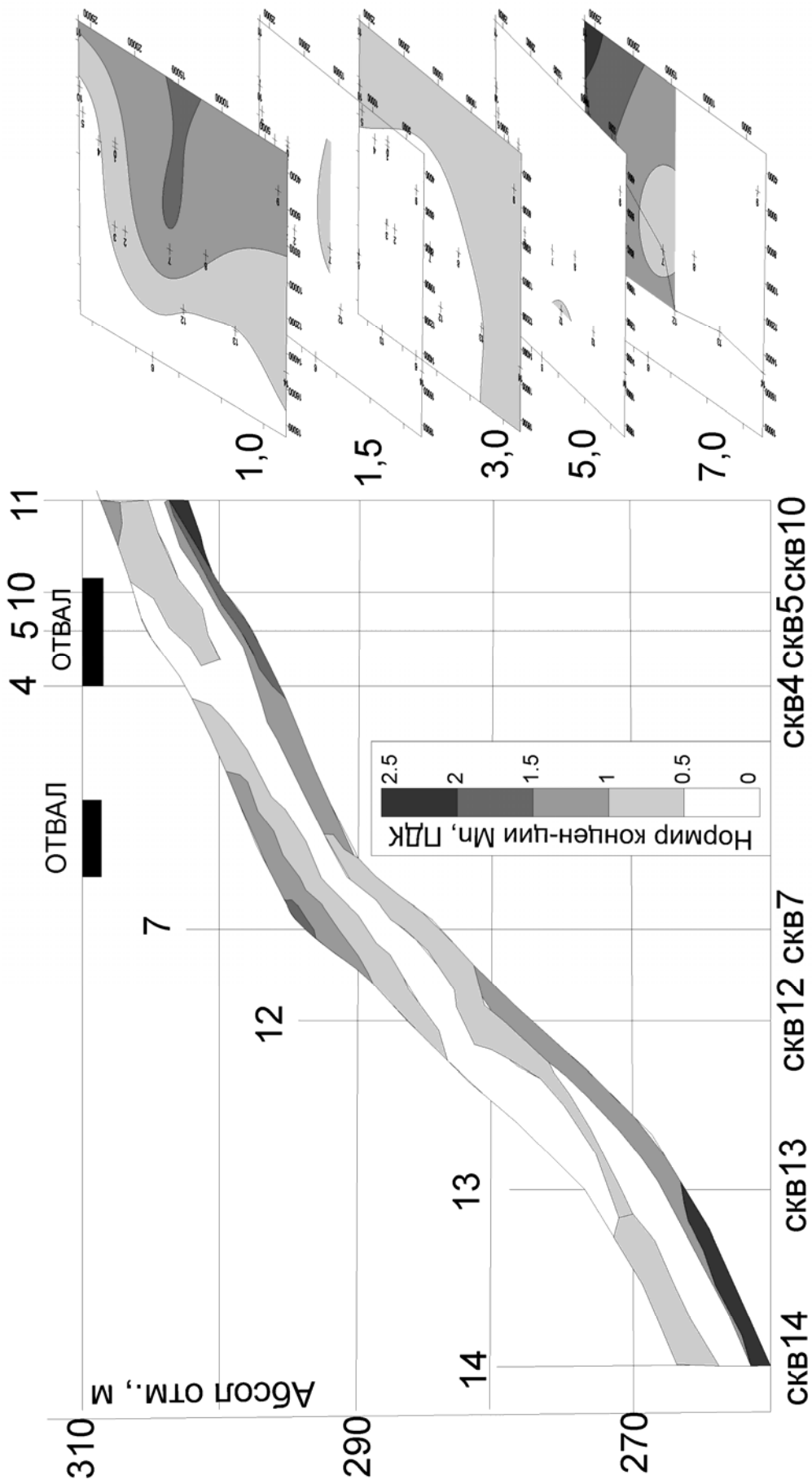


Рис. 6. Кількісна оцінка і візуалізація ореолів забруднення Mn по вертикалі та латералі

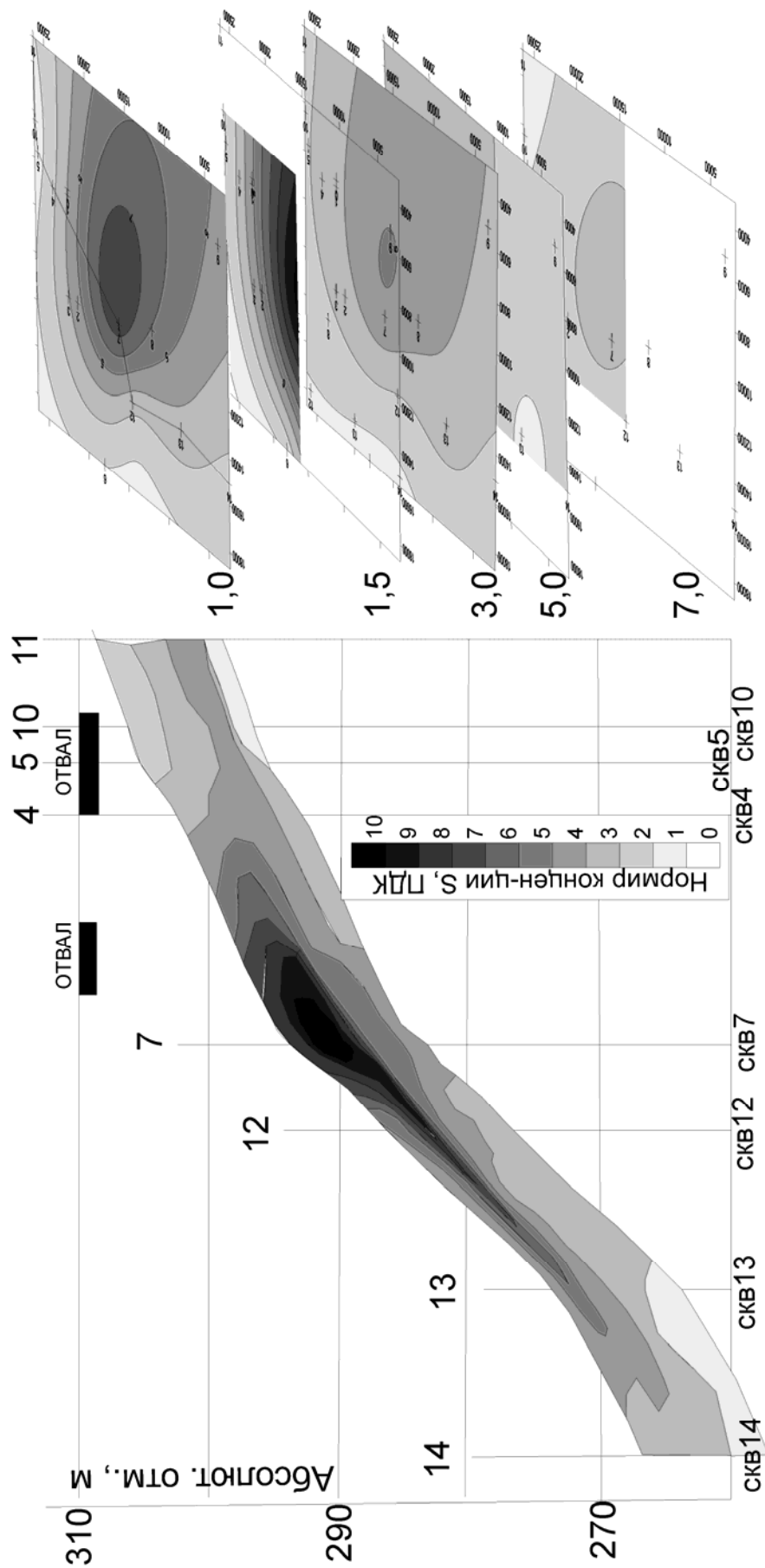


Рис. 7. Кількісна оцінка і візуалізація ореолів забруднення S по вертикалі та літералі

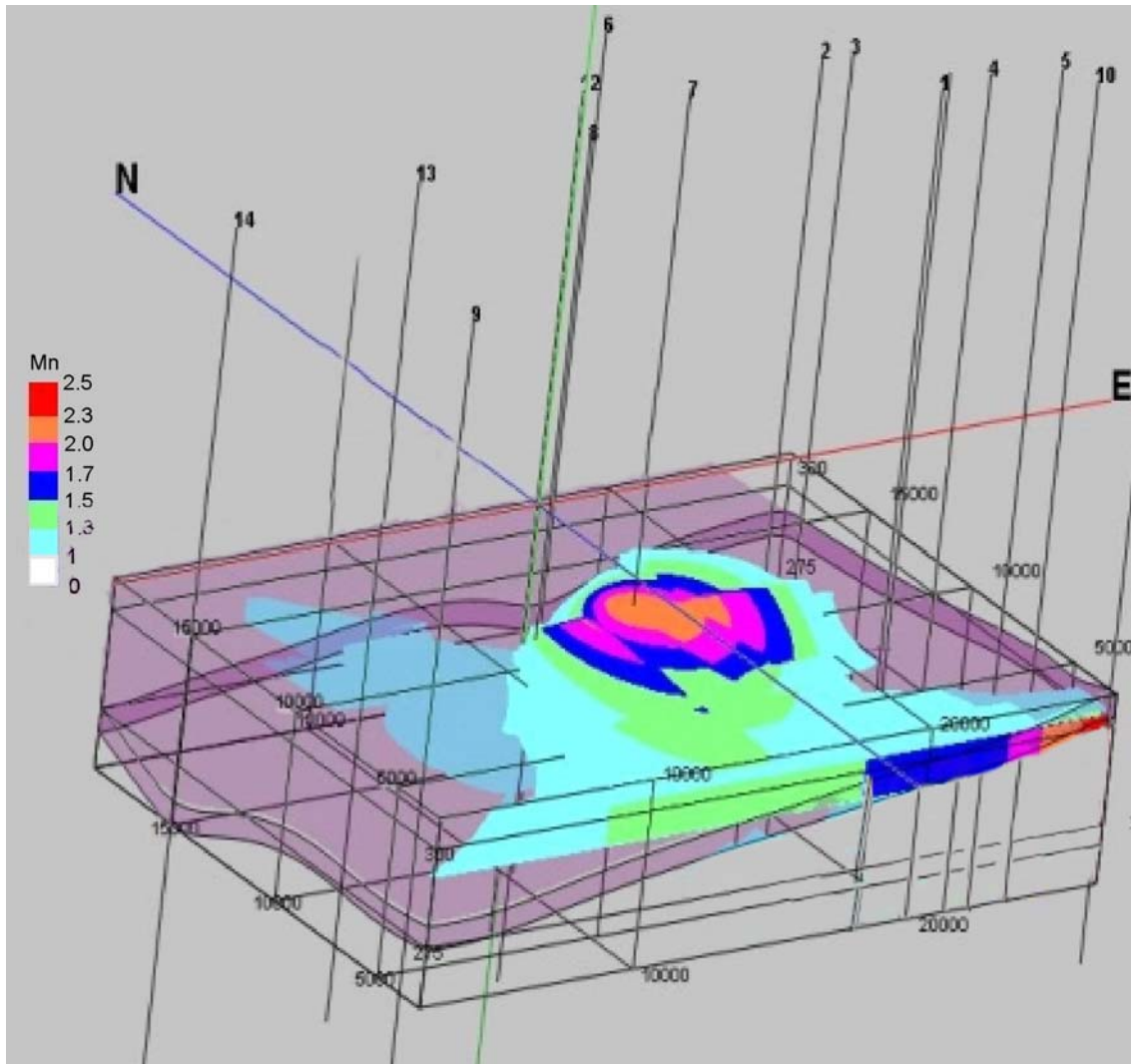


Рис. 8. Тривимірна модель розповсюдження марганцю (Mn) на ділянці досліджень та прилеглої території

Побудова математичної моделі розповсюдження забруднюючих речовин під впливом схилу поверхневого стоку і структурного послаблення порід.

Розіб'ємо тривимірний гірничий масив на систему паралелепіпедів, в яких кожна точка моніторингу буде мати координати i, j, k . Прогнозну зміну в часі концентрації забруднювача в i, j, k -й точці геологічного масиву слід розраховувати користуючись рівнянням нерозривності [5]:

$$\frac{\partial C_{i,j,k}}{\partial t} + \text{div}(C_{i,j,k} \cdot \vec{u}) = K_1(C_{i,j,k}) + K_2(C_{i,j,k}) + K_3(C_{i,j,k}) + K_4(C_{i,j,k}) + \sum_{ij} I_{ij}(C_i, C_j), (1)$$

де $C_{i,j,k}$ – концентрація забруднюючої речовини в i, j, k -й точці екосистеми, мг/дм³;

t – час, д;

u – швидкість переміщення речовини у розглядуваній системі, м/д.;

$K_1(C_i), K_2(C_i), K_3(C_i), K_4(C_i)$ – кореляційні складні функції, що залежать від природно-кліматичних умов та рельєфу місцевості. Вони створюють основу для вивчення напрямів потоків речовини і енергії в екосистемі;

I_{ij} – критерій, враховуючий параметри, що не піддаються регулюванню;

K_1 – кількість речовини, що вимивається з відвалів;

K_2 – коефіцієнт, що враховує вплив рельєфу;

K_3 – коефіцієнт впливання ухилу земної поверхні на процес міграції важких металів;

K_4 – коефіцієнт структурного ослаблення.

Кількість речовини, що вимивається з відвалів поверхневими водами, K_1 слід розраховувати по формулі:

$$K_1 = \sum_{i=1}^n \frac{(C_{\phi} - C_{\phi+1})}{n} V_{\phi}, \quad (2)$$

де C_{ϕ} – фактичний зміст речовини (концентрація) в i точці відвала на момент попереднього спостереження;

$C_{\phi+1}$ – фактичний зміст речовини в i точці відвала на момент подальшого моніторингу;

V_{ϕ} – об'єм відвала;

n – кількість спостережень.

Вплив рельєфу місцевості на значення максимальної концентрації C від одиночного точкового джерела враховується безрозмірним коефіцієнтом K_2 .

Значення K_2 встановлюється на основі аналізу картографічного матеріалу рельєфу місцевості в радіусі до 50 висот найбільш високого з розміщуваних джерела, але не менше чим до 2 км [6].

У решті випадків розрахунок K_2 проводиться шляхом аналізу картографічного матеріалу за допомогою таблиці 2.

Таблиця 2

Значення коефіцієнта впливу рельєфу місцевості

| Ухил | K_2 |
|-------------|-------|
| 0,05 - 0,1 | 0,8 |
| 0,1 - 0,15 | 0,7 |
| 0,15 - 0,25 | 0,5 |
| > 0,25 | 0,4 |

Коефіцієнт впливання ухилу земної поверхні на процес міграції важких металів (тангенс кута нахилу), K_3 розраховувати за формулою:

$$K_3 = i E_p, \quad (3)$$

де i – ухил;

E_p – енергія рельєфу (табл. 3) – розмах рельєфу, ступінь розчленованого рельєфу, морфометричний показник потенційної інтенсивності або можливого прояву тих або інших рельєфоутворюючих процесів, що враховує відстань по вертикалі між вищими і нижчими точками рельєфу даного регіону і його горизонтальна розчленування.

Таблиця 3

Категорії місцевості по енергії рельєфу

| Категорії місцевості | Характеристика | E_p |
|---------------------------|---|-------|
| 1. Плоскорівнинна | Ухили 2-6 %. Енергія рельєфу незначна (від 20 м на 5 км до 10 м на 100 м). | 0.1 |
| 2. Пересічена рівнина | Ухили скатів від 20-30 до 60 %. Енергія рельєфу (від 175 м на 5 км до 40 м на 100 м). | 0.4 |
| 3. Передгірська і гірська | Енергія рельєфу (від 500-900 м на 5 км. до 500-700 м на 1 км). | 0.7 |
| 4. Високогірна | Енергія рельєфу (від 3000 м на 5 км до 1000 м на 1 км.). | 1 |

Наявність дрібно блокової тріщинуватості знижує і міцність порід. Для оцінки цього ефекту можна користуватися коефіцієнтом структурного ослаблення I_{ij} , який залежить від ступеня інтенсивності тріщинуватості таким чином (табл.. 4):

Таблиця 4

Значення коефіцієнта структурного ослаблення

| Категорії порід по інтенсивності тріщинуватості | Значення коефіцієнта структурного ослаблення K_4 |
|---|--|
| 1 | 1 |
| 2 | 0,9-1 |
| 3 | 0,7 - 0,9 |
| 4 | 0,5 – 0,7 |
| 5 | 0,3 – 0,5 |

По інтенсивності тріщинуватості виділяють п'ять категорій порід (табл.. 5).

Таблиця 5

Класифікація порід по інтенсивності тріщинуватості

| Категорія порід по інтенсивності тріщинуватості | Якісна характеристика порід | Інтенсивність тріщинуватості |
|---|-----------------------------|------------------------------|
| 1 | Монолітні | до 1 |
| 2 | Слаботріщинуваті | 2-5 |
| 3 | Середньотріщинуваті | 6-10 |
| 4 | Сильнотріщинуваті | 10-15 |
| 5 | Роздроблені і перем'яті | > 15 |

Швидкість перенесення маси в системі (u) визначається двома процесами: конвективним перенесенням і дифузією. Як впливає з геологічного розрізу під глинистими відкладеннями над зоною вивітрених порід розташовується шар, що є легкопроникним для вологи піщаного ґрунту. Отже, швидкість перенесення маси визначається в основному конвективним перенесенням й

її слід обчислювати із закону Дарсі з урахуванням гідравлічного ухилу [7]:

$$u = K_{\phi} \frac{\Delta P}{l \cdot \mu}, \quad (4)$$

де ΔP – перепад тиску на ділянці довжиною l , Па;

μ – коефіцієнт в'язкості фільтруючої речовини, Па·с;

K_{ϕ} – коефіцієнт фільтрації геологічного масиву в i -й точці.

Для піщаного ґрунту коефіцієнт фільтрації слід розраховувати по формулі Козені-Кармана:

$$K_{\phi} = \frac{n^3}{120(1-n)^2} d_e^2, \quad (5)$$

де n – пористість ґрунту;

d_e – ефективний діаметр часток ґрунту, м.

$$d_e = \sum d_i m_i, \quad (6)$$

де d_i – середній розмір часток в i -той фракції, м;

m_i – масова доля i -тої фракції.

Замінюючи рівняння (1) кінцево-різницевих співвідношеннями в точках масиву, де проводилися виміри концентрації забруднюючих речовин, обчислимо I_{ij} – критерій, який враховує параметри, що не піддаються регулюванню. Апроксимація набутих значень дозволяє обчислити I_{ij} для всіх точок масиву і для них записати систему кінцево-різницевих рівнянь замість рівняння (1). Вирішення отриманих рівнянь дозволяє описати процес розповсюдження поллютантів в динаміці у першому наближенні.

Висновки.

1. Проведене нами комп'ютерне моделювання статичного стану геологічного масиву дало можливість:

- виконати комплексний аналіз основних параметрів транспореноса забруднювачів;
- провести оцінку екрануючої ролі геохімічних бар'єрів;
- виявити точки найбільшої концентрації забруднення;
- оцінити ступінь рухливості ЗВ з урахуванням напряму ухилу поверхні і літолого-тектонічної будови досліджуваної ді-

лянки; та експериментально виявити основні тенденції вертикальної і латеральної міграції забруднюючих елементів.

2. Запропонована математична модель дозволяє проводити прогностичний розрахунок динамічної зміни концентрації забруднювачів в умовах інтенсивного структурного ослаблення порід, з урахуванням особливостей рельєфу земної поверхні в конкретній точці на конкретний період часу і на підставі набутих значень будувати прогностичні геохімічні моделі.

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Люта Н. Г. Методичне та інформаційне забезпечення моніторингу геохімічного стану ландшафтів України / Н. Г. Люта, В. В. Поліновський // Друга міжнародна науково-практична конференція "Моніторинг навколишнього середовища: науково-методичне, нормативне, технічне, програмне забезпечення": збірник матеріалів конференції, Коктебель 2007 р. - Вид. Кримське відділення УкрДГРІ, 2007. – С. 97–112.
2. Люта Н.Г. Регіональне та середньомасштабне еколого-геохімічне картування та картографування в Україні: основні проблеми та шляхи їх подолання / Н.Г. Люта // Вісник Київського національного університету ім. Т. Шевченка: серія геологія. – К.: Вид. "Київський університет", 2006. – Вип. 38. – С. 77–79.
3. Білявський Г.О. Проблеми формування екологічної мережі України в контексті збалансованого розвитку / Г.О. Білявський, О.В. Мудрак // Вісник ЖНАЕУ: Загальна екологія та радіологія. – Житомир: РИК ЖНАЕУ, 2009. - № 1. С. 117–129
4. Кавецький В. М. Міграція важких металів за профілем дерново-підзолістого ґрунту в умовах полісся України / В. М. Кавецький, Т. С. Кіщак // Міжнародна конференція „Сучасні проблеми біології, екології та хімії”: збірка матеріалів конференції, Запоріжжя 2007 р. - Вид. ЗНУ, 2007. – Ч. 2.– С. 338–344.
5. Родионов А.А. Подходы к рассмотрению диффузии вредных веществ для оценки их воздействия на человека / А.А. Родионов, И.Е. Шилова // Материалы международной научно-практической конференции «Экология речных бассейнов»,

- Владимир, 1999 – Изд. ИВПС, 1999. – С. 98-99.
6. Методика расчета вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий [Текст]. – Л.: Гидрометеоиздат, 1987 – 48 с.
 7. Прокопович Л.В. Закон Дарси в экосистеме литейных отвалов / Л.В. Прокопович // Тр. Одесского политехнического университета. – Одесса: Изд. ОПУ, 2001. – Вып. 1. – С. 7-9.