

О. Б. Шандиба, к.т.н., доцент

А. О. Курило, аспірант

О. В. Крекотень, ст. викладач

В. О. Сергієнко, ст. викладач

О. В. Семерня, ст. викладач

Сумський національний аграрний університет

В роботі розглядаються питання моделювання міграції рухомих забруднень в ґрунтах сільськогосподарського призначення. Комп'ютерна імітаційна модель стосується визначення гео-гідродинамічних параметрів сільськогосподарських угідь при забрудненні шкідливими речовинами (рис. 3-6). У відповідності з моделлю були проведені чисельні експерименти для визначення стану екологічної безпеки з розвитком у часі та імовірнісним фактором відсутності чи наявності опадів в прогнозований період.

Ключові слова: забруднення, міграція, моделювання, концентраційний фон, опади, рель'єф, навколишнє середовище.

Постановка проблеми. Забруднення навколишнього середовища, яке набуло за останні десятиліття катастрофічних розмірів, нагально потребує розвитку комп'ютерних методів прогнозування міграції забруднюючих речовин в ґрунтово-водних екосистемах сільськогосподарських угідь [1-3]. Це дозволить приймати оперативні рішення щодо безпеки навколишнього середовища і рекомендувати ефективні оперативні заходи із захисту екосистем та населення, яке використовує ці екосистеми для виробництва, проживання та рекреації.

Рухомі компоненти забруднень завдають великої шкоди ґрунтово-водним системам сільськогосподарським угідь та поверхневим водам [2-6]. Найбільшу небезпеку становлять водорозчинні компоненти пестицидів, діоксини, солі важких металів, радіонукліди, деякі біологічні об'єкти (віруси, бактерії, тощо). Їх міграція в ґрунтово-водних системах відбувається в процесі несистематичного природного зволоження інфільтраційного шару ґрунту під впливом рель'єфу, геогідродинамічних та сорбційних факторів, інтенсивності хімічних та біохімічних реакцій, рівня рН та редокс-потенціалу [6-8].

Мета статті. Обґрунтувати елементи екологічного моніторингу міграції забруднень в ґрунтово-водних системах сільськогосподарських угідь.

Необхідність створення мережі польових лізіметричних пунктів для систематичного відбору проб і лабораторного аналізу пов'язані зі значними витратами на організацію та функціонування подібних природоохоронних структур [6]. Крім того, відсутність прийнятних в інженерній практиці моделей з визначеними (табульованими) міграційними характеристиками різних типів ґрунтів виключає можливість довгострокових прогнозів та оцінки екологічної ситуації.

Кінетичні моделі для чисельних оцінок динаміки концентраційного фону забруднення

ґрунтів та ґрунтових вод пропонувались, починаючи з середини минулого століття, та з різних причин реалізованими на практиці залишаються переважно рівняння на основі матеріального балансу [1, 5]. Процес багаторазового несистематичного зволоження інфільтраційного шару ґрунту, який супроводжується явищами масопереносу (міграції) рухомих хімічних компонентів забруднень, досить важко піддається математичній формалізації з прийнятними рішеннями в силу некоректності крайових умов. Але в багатьох практично доцільних випадках можуть бути виправдані спрощені інженерні підходи до прогнозування змін концентраційного фону забруднення на основі мінімальної кількості інтегральних характеристик ґрунтово-водних систем [2].

В роботах [1-2, 8] запропонована двовимір-на аналітична модель міграції розчинних компонентів, що враховує градієнт рель'єфу (гідравлічний нахил) як основну причину руху води в поверхневих шарах ґрунту непромивного або періодично промивного типу:

$$C = C_0 + \frac{C_p - C_0}{B\varepsilon} [1 - \exp(-Bkt)] \exp\left(-\frac{k}{\varepsilon_1} \tau\right) \quad (1)$$

де C - осереднена концентрація забруднення в ґрунтовому розчині інфільтраційного шару; C_0 , C_p - початкові концентрації забруднення відповідно в інфільтраційному потоці та застійних зонах ґрунту; $B = \frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon}$ - структурний параметр ґрунту; ε , ε_1 - відносні об'єми проточних і застійних зон; k - об'ємний коефіцієнт масовіддачі; t - інтегральний час просування (руху) концентраційного фронту забруднення від вододілу до контрольної точки; τ - інтегральний час випадання опадів за контрольний період.

Просування забруднення вздовж градієнта рель'єфу буде прискорюватись на більш крутому схилі. При цьому концентраційний фронт, спускаючись до підшви схилу, проходитиме спочатку

через геодезично вище розташовані точки. Вважаючи ліву частину виразу (1) функцією інтегрального часу випадання опадів (дощу), можна спрогнозувати динаміку зниження забрудненості в будь-якій контрольній точці, розташованій на відстані l від вододілу.

Запропонована комп'ютерна реалізація моделі в системі екологічного моніторингу забруднення сільськогосподарських земель рухомими формами шкідливих речовин прогнозує зміни концентраційного фону як наслідок техногенного впливу на стан земельних угідь.

Комп'ютерна модель передбачає оцінку початкового екологічного стану системи, дані інтенсивності окремого або величину сумарного техногенного навантаження, а також час експозиції забруднення відповідно інтегральному часу випадання опадів (дощу), і прогноз зміни стану екосистеми під впливом техногенного навантаження.

Візуалізацію початкового стану забруднення сільськогосподарських угідь та одержаних результатів, тобто комп'ютерної імітаційної моделі загалом, проведемо засобами табличного

редактора Excel. Програма Excel – сучасна комп'ютерна технологія, що дозволяє поєднати графічне зображення з інформацією табличного типу (різноманітні статистичні дані, розрахунки, списки, економічні показники тощо). Конкретніше, це комп'ютерна система, що забезпечує можливість використання, збереження, редагування, аналізу, прогнозування та відображення різноманітних даних.

На сьогоднішній день найбільш простою мовою програмування в галузі моделювання є мова Visual Basic. Спрощену версію Visual Basic вбудовано фірмою-розробником в табличний редактор MS Excel з метою надання користувачеві права розширювати можливості через написання макрокоманд, і саме її використано нами у своїх дослідженнях.

Реалізована комп'ютерна імітаційна модель ілюструється наступними скриншотами, що представлені для пояснення опису, а саме:

На рис. 1 представлено загальний вигляд робочого вікна з таблицею та командними кнопками; на рис. 2 графічно подано розподіл концентраційного фону забруднення.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
5						Початковий стан забруднення, Ср									
6	t, дні	8		Дош, години	Час, дні	0,2	0,19	0,23	0,27	0,31	0,27	0,32	0,3	0,3	0,25
7	C ₀ (< Ср)=				0,5	0,206	0,195	0,236	0,277	0,319	0,277	0,329	0,308	0,308	0,257
8					1	0,322	0,306	0,371	0,435	0,500	0,435	0,516	0,484	0,484	0,403
9				Очистити від дощу	1,5	0,389	0,369	0,447	0,525	0,603	0,525	0,622	0,583	0,583	0,486
10					2	0,426	0,405	0,490	0,576	0,661	0,576	0,682	0,640	0,640	0,533
11					2,5	0,448	0,426	0,515	0,605	0,694	0,605	0,717	0,672	0,672	0,560
12					3	0,460	0,437	0,529	0,621	0,713	0,621	0,736	0,690	0,690	0,575
13					3,5	0,467	0,444	0,537	0,631	0,724	0,631	0,747	0,701	0,701	0,584
14					4	0,471	0,447	0,542	0,636	0,730	0,636	0,754	0,707	0,707	0,589
15					4,5	0,473	0,450	0,544	0,639	0,734	0,639	0,757	0,710	0,710	0,592
16					5	0,475	0,451	0,546	0,641	0,735	0,641	0,759	0,712	0,712	0,593
17					5,5	0,475	0,451	0,547	0,642	0,737	0,642	0,760	0,713	0,713	0,594
18					6	0,476	0,452	0,547	0,642	0,737	0,642	0,761	0,713	0,713	0,595
19					6,5	0,476	0,452	0,547	0,642	0,738	0,642	0,761	0,714	0,714	0,595
20					7	0,476	0,452	0,547	0,643	0,738	0,643	0,762	0,714	0,714	0,595
21					7,5	0,476	0,452	0,548	0,643	0,738	0,643	0,762	0,714	0,714	0,595
22					8	0,476	0,452	0,548	0,643	0,738	0,643	0,762	0,714	0,714	0,595
23															

Рис. 1. Загальний вигляд робочого вікна з таблицею та командними кнопками.

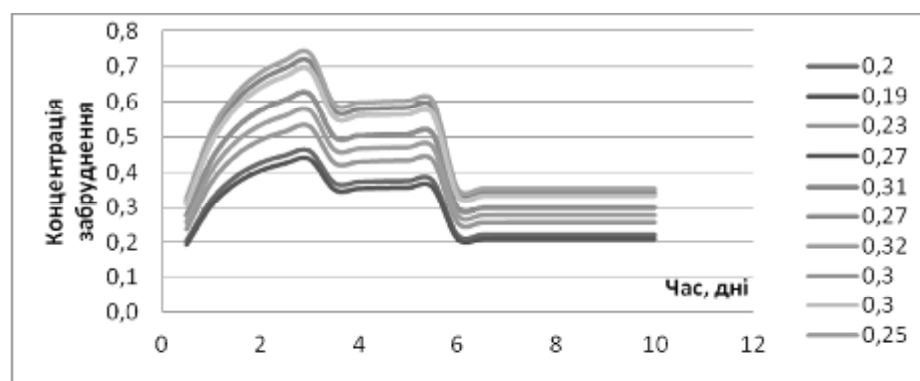


Рис. 2. Розподіл концентраційного фону забруднення через 8 днів.

Далі представимо програмний код кнопки | керування процесом введення дальності прогно-

зу таким чином:

```
Sub Час()
k = 7
For i = 0.5 To Cells(6, 2) Step 0.5
Cells(k, 5) = i
k = k + 1
Next
For i = Cells(6, 2) + 0.5 To 30 Step 0.5
Cells(k, 5) = ""
k = k + 1
Next
End Sub.
```

Програмний код кнопки керування проце-

сом введення інтегрального часу дощу має вигляд:

```
Sub Дощ()
For i = 7 To Cells(6, 2) * 2 + 5
If Cells(i, 4) > 0 Then Cells(i + 1, 4) = Cells(i + 1, 4) + Cells(i, 4)
Next
k = Cells(6, 2) * 2 + 7
For i = Cells(6, 2) + 0.5 To 30 Step 0.5
Cells(k, 4) = ""
k = k + 1
Next
End Sub.
```

Очищення таблиці робочого вікна від результатів попереднього варіанту імітаційної мо-

делі (підготовку IMM до нового експерименту)

здійснює кнопка керування , програмний код якої виглядає наступним чином:

```
Sub Очистити()
For i = 7 To 46
Cells(i, 4) = ""
Next
End Sub.
```

За допомогою побудованої імітаційної моделі забруднення досліджуваної земельної ділянки можна швидко спрогнозувати можливі його зміни в різних сценаріях та ризикових ситуаціях.

Комп'ютерна імітаційна модель описується далі наступними прикладами, що ілюструють її варіативність та стосуються визначення параметрів екологічної безпеки сільськогосподарських угідь при забрудненні шкідливими речовинами (рис. 3-6). Згідно з описаною моделлю були проведені експерименти для визначення параметрів стану екологічної безпеки з розвитком у часі та таким ймовірнісним фактором як відсутність/наявність опадів (дощу) в прогнозований період. Реалізовані імітації ілюструються наступними скриншотами:

Рис. 3 представляє загальний вигляд робочого вікна з таблицею та прогнозом на 10 днів з дощем ($C_0=0,06$) на 6-ту ніч тривалістю 8 годин;

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
4															
5				Дощ, години	Час, дні	Початковий стан забруднення, Ср									
6	t, дні	10				0,2	0,19	0,23	0,27	0,31	0,27	0,32	0,3	0,3	0,25
7		$C_0 (< C_p) =$	0,06		0,5	0,204	0,194	0,235	0,276	0,317	0,276	0,327	0,307	0,307	0,255
8					1	0,286	0,270	0,334	0,398	0,463	0,398	0,479	0,447	0,447	0,366
9			Очистити від дощу		1,5	0,332	0,313	0,390	0,468	0,546	0,468	0,565	0,527	0,527	0,429
10					2	0,359	0,337	0,423	0,508	0,593	0,508	0,614	0,572	0,572	0,465
11					2,5	0,374	0,351	0,441	0,530	0,620	0,530	0,642	0,598	0,598	0,486
12					3	0,382	0,359	0,451	0,543	0,635	0,543	0,658	0,612	0,612	0,497
13					3,5	0,387	0,364	0,457	0,550	0,644	0,550	0,667	0,620	0,620	0,504
14					4	0,390	0,366	0,460	0,555	0,649	0,555	0,672	0,625	0,625	0,507
15					4,5	0,391	0,368	0,462	0,557	0,652	0,557	0,675	0,628	0,628	0,510
16					5	0,392	0,368	0,463	0,558	0,653	0,558	0,677	0,629	0,629	0,511
17					5,5	0,393	0,369	0,464	0,559	0,654	0,559	0,678	0,630	0,630	0,511
18					6	0,256	0,242	0,298	0,354	0,410	0,354	0,424	0,396	0,396	0,326
19					6,5	0,256	0,242	0,298	0,354	0,410	0,354	0,424	0,396	0,396	0,326
20					7	0,256	0,242	0,298	0,354	0,410	0,354	0,424	0,396	0,396	0,326
21					7,5	0,256	0,242	0,298	0,354	0,410	0,354	0,424	0,396	0,396	0,326
22					8	0,256	0,242	0,298	0,354	0,410	0,354	0,424	0,396	0,396	0,326
23					8,5	0,256	0,242	0,298	0,354	0,410	0,354	0,424	0,396	0,396	0,326
24					9	0,256	0,242	0,298	0,354	0,410	0,354	0,424	0,396	0,396	0,326
25					9,5	0,256	0,242	0,298	0,354	0,410	0,354	0,424	0,396	0,396	0,326
26					10	0,256	0,242	0,298	0,354	0,410	0,354	0,424	0,396	0,396	0,326

Рис. 3. Загальний вигляд робочого вікна з таблицею та прогнозом на 10 днів з дощем ($C_0=0,06$) на 6-ту ніч тривалістю 8 годин.

Рис. 4 графічно представляє розподіл концентраційного фону забруднення за 10 днів з дощем ($C_0=0,06$) на 6-ту ніч тривалістю 8 годин;

Рис. 5 представляє загальний вигляд робочого вікна з таблицею та прогнозом на 10 днів з дощем ($C_0=0,06$) на 4-ий день тривалістю 3,5

години й 6-ту ніч тривалістю 8 годин;

Рис. 6 графічно представляє розподіл концентраційного фону забруднення за 10 днів з дощем ($C_0=0,06$) на 4-ий день тривалістю 3,5 години й 6-ту ніч тривалістю 8 годин.

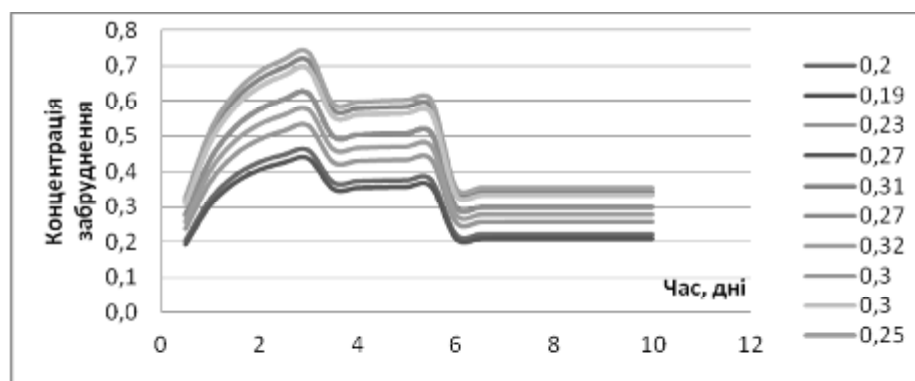


Рис. 4. Розподіл концентраційного фону забруднення за 10 днів з дощем ($C_0=0,06$) на 6-ту ніч тривалістю 8 годин.

t, дні	Дощ, години	Час, дні	Початковий стан забруднення, Ср											
			0,2	0,19	0,23	0,27	0,31	0,27	0,32	0,3	0,3	0,25		
7	$C_0 (< C_p) = 0,06$	0,5	0,204	0,194	0,235	0,276	0,317	0,276	0,327	0,307	0,307	0,255		
8		1	0,286	0,270	0,334	0,398	0,463	0,398	0,479	0,447	0,447	0,366		
9	Очистити від дощу	1,5	0,332	0,313	0,390	0,468	0,546	0,468	0,565	0,527	0,527	0,429		
10		2	0,359	0,337	0,423	0,508	0,593	0,508	0,614	0,572	0,572	0,465		
11		2,5	0,374	0,351	0,441	0,530	0,620	0,530	0,642	0,598	0,598	0,486		
12		3	0,382	0,359	0,451	0,543	0,635	0,543	0,658	0,612	0,612	0,497		
13		3,5	0,319	0,301	0,375	0,449	0,523	0,449	0,542	0,504	0,504	0,412		
14		3,5	0,321	0,303	0,377	0,452	0,527	0,452	0,546	0,508	0,508	0,415		
15		3,5	0,323	0,304	0,379	0,454	0,529	0,454	0,548	0,510	0,510	0,417		
16		3,5	0,323	0,305	0,380	0,455	0,530	0,455	0,549	0,512	0,512	0,417		
17		3,5	0,324	0,305	0,380	0,456	0,531	0,456	0,550	0,512	0,512	0,418		
18		11,5	0,215	0,204	0,249	0,293	0,338	0,293	0,349	0,326	0,326	0,271		
19		11,5	0,215	0,204	0,249	0,293	0,338	0,293	0,349	0,327	0,327	0,271		
20		11,5	0,216	0,204	0,249	0,293	0,338	0,293	0,349	0,327	0,327	0,271		
21		11,5	0,216	0,204	0,249	0,293	0,338	0,293	0,349	0,327	0,327	0,271		
22		11,5	0,216	0,204	0,249	0,293	0,338	0,293	0,349	0,327	0,327	0,271		
23		11,5	0,216	0,204	0,249	0,293	0,338	0,293	0,349	0,327	0,327	0,271		
24		11,5	0,216	0,204	0,249	0,293	0,338	0,293	0,349	0,327	0,327	0,271		
25		11,5	0,216	0,204	0,249	0,293	0,338	0,293	0,349	0,327	0,327	0,271		
26		11,5	0,216	0,204	0,249	0,293	0,338	0,293	0,349	0,327	0,327	0,271		
27		11,5	0,216	0,204	0,249	0,293	0,338	0,293	0,349	0,327	0,327	0,271		

Рис. 5. Загальний вигляд робочого вікна з таблицею та прогнозом на 10 днів з дощем ($C_0=0,06$) на 4-ий день тривалістю 3,5 години та на 6-ту ніч тривалістю 8 годин.

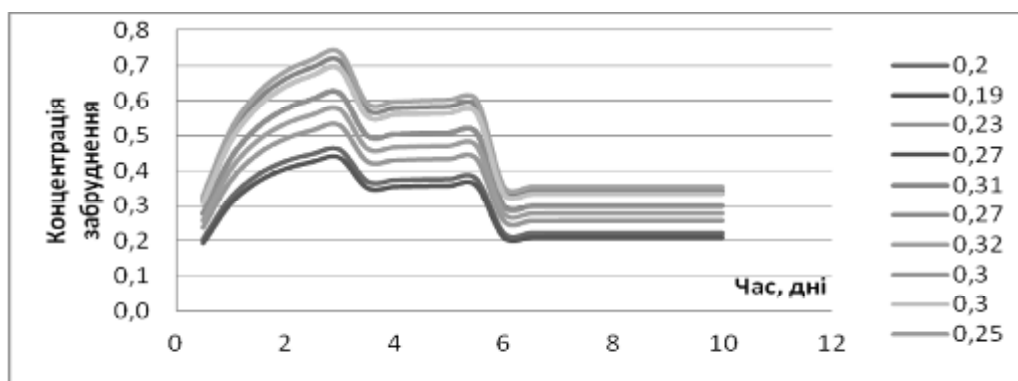


Рис. 6. Розподіл концентраційного фону забруднення за 10 днів з дощем ($C_0=0,06$) на 4-ий день тривалістю 3,5 години та на 6-ту ніч тривалістю 8 годин.

Отримані результати дозволяють оцінювати та прогнозувати екологічну безпеку типової сільськогосподарської ділянки для використання її людиною. Побачивши на моделі наслідки того чи іншого сценарію, можна вибрати менш небезпечний і більш корисний для досліджуваної системи.

Таким чином, імітаційне моделювання дозволяє імітувати в часі поведінку системи, що включає стохастичні фактори. Причому плюсом є

те, що часом в моделі можна управляти: уповільнювати у випадку з швидкоплинними процесами і прискорювати для моделювання систем з повільною мінливістю.

Висновки. В статті запропоновано методику розрахунку геогідродинамічної характеристики ґрунтово-водних систем з метою оцінювання й прогнозування процесу міграції рухомих форм техногенних забруднень та реалізовано відповідну комп'ютерну імітаційну модель.

Головним плюсом моделювання при створенні та виборі сценарію господарювання є те, що за допомогою моделей можна досить швидко прогнозувати наслідки спрямованих дій на багато часу вперед (днів, місяців, років, й навіть століть).

Другим плюсом імітаційного моделювання, не менш важливим від отримання швидких відповідей, є брак негативних або навіть катастрофічних наслідків експериментування на навколишньому середовищі.

Діапазон застосування імітаційного моделювання надзвичайно високий у зв'язку з можливостями варіації параметрів і факторів моделі без будь-яких обмежень на їх значення, адаптації до

появи нової інформації, аналізу проміжних результатів та необхідного корегування управляючих параметрів. Крім того, використання імітаційних моделей дозволяє урахувати стохастичний характер досліджуваних процесів від прогнозування розвитку національної економіки до розробки і впровадження інформаційних систем управління. Дослідження впливу результатів функціонування майбутніх виробництв на екологію навколишнього середовища, машинне моделювання в автоматизованих навчальних системах тощо є також прерогативою імітаційного моделювання.

Список використаних літератури:

1. Веригин Н.Н. Основы теории растворения и вымыва солей при фильтрации воды в горных породах и грунтах.- В кн.: Инженерно-геологические свойства горных пород и методы их изучения.- М.: Изд-во АН СССР, 1962, С.59-70.
2. Біоенергетичний потенціал лісостепової і поліської зон України та перспективи його використання : Монографія / за заг. ред. чл.-кор. УААН В.І. Ладики.- Суми: Університетська книга, 2009.- 304 с.
3. Ляшенко І.М., Коробова М.В., Столяр А.М. Основи математичного моделювання економічних, екологічних та соціальних процесів Навч. пос. – Тернопіль: Навчальна книга - Богдан, 2006. – 304 с.
4. Мистецкий Г.Е. Автоматизация расчета массопереноса в почвогрунтах.- К.: Будівельник, 1985.- 136 с.
5. Олейник А.Я. Геогидродинамика дренажа.- К.: Наукова думка, 1981.- 283 с.
6. Шандиба О.Б., Варламов М.К., Мартиненко О.П., Бороzeneць Н.С. Екологічний моніторинг міграції хімічних речовин на забруднених територіях. - Вісник СДАУ, №5, сер. "Механізація та автоматизація технологічних процесів".- Суми: Козацький Вал, 2000.- С.69-71.
7. Klekowski R., Menshutkin V. Modelowanie komputerowe ekologii. Lublin, 2002.
8. Shandyba A.B. Ecology Forecast for Migration of the Chemical Substances into Ground and Surface Water.- Fresenius Environ. Bulletin., vol.4, Basel, Switzerland, 1995.- pp.80-85.

Шандиба О.Б., Курило А.О., Крекотень О.В., Сергиенко В.О., Семерня Е.В. Моделирование миграционных процессов в грунтово-водных системах

В работе рассматриваются вопросы моделирования миграции подвижных загрязнений в почвах сельскохозяйственного назначения. Компьютерная имитационная модель касается определения геогидродинамических параметров сельскохозяйственных угодий при загрязнении вредными веществами (рис. 3-6). В соответствии с моделью были проведены численные эксперименты для определения состояния экологической безопасности с развитием во времени и вероятностным фактором отсутствия или наличия осадков в прогнозируемый период.

Ключевые слова:загрязнение, миграция, моделирование, концентрационный фон, осадки, рельеф, окружающая среда

Shandyba A.B., Kurilo A.O., Krekoten O.V., Sergienko V.O., Semernja O.V. Pollution migration forecast for soil-water system

The migration of the moving dangerous chemicals in soil-water systems represents significant risk to public health and environment. At the present time there is growing scientific concern about the available predicting procedures for environmental assessment of contaminated sites and chemical spills. After consideration the various approaches and geodata that may be involved, the stagnate zones model was recognized. The key problem to be considered here deals with the surface concentration distribution, risk evaluation and allowable residue levels for chemicals. It is possible to make forecast and ecology monitoring based on the proposed mathematical model with tabulated migration parameters of the contaminants and soils. The cosidered method can complement experimental work on the contaminated sites and assist with soil-geochemistry mapping.

The hydraulic concept of contaminant migration is empirically based on observations of interrupted infiltration and soil drying under weather conditions. The two-dimentional migration model was the preferable way to calculate concentration fields of soil-water upper zone above vadoze zone. The one-dimensional model which describes infiltration and vertical movement of water into aquifer cannot be used for episodic

up-and-down mass-transfer in the upper layer of soil because there is persistent trend of movement along relief gradient from source of contamination or watershed/

Having received numerous experimental correlations of the interrupted migration under native hydro-geological and weather conditions we can see prevailing share of hydraulic transfer process along a relief gradient in accordance with the relief slope. Also it is possible to produce good numerical assessment of the technical issues involved for the matters pertaining to the environment, agriculture and landscape planning. At the same time we have only limited development of geodata management for linking attribute data to initial and border conditions of soil-water systems. The hydraulic simulation model with stagnate zones utilization applied to mass-transfer in porous media was described

Although there may be theoretical reasons for preference of one model over another, the choice is often made on much more pragmatic grounds. For example, application of the mass-balance model Winglass requires an adjustment of the leaching number to provide the best correspondence to experimental data but it is not directly usable for the unregulated migration.

Contaminant migration modelling are limited to persistent (conservative) substances, i.e. those which do not undergo any reactions or adsorption in the soil-water system. The development of simulation models for reactive substances is still in progress.

Keywords: *pollution, migration, modeling, concentrationdistribution, precipitation, relief, environment.*

Дата надходження до редакції: 01.03.2016

Рецензент: д.т.н., проф. Павлюченко А.М.