

УДК 911.3:[631.4:550.378]:004

МЕТОДОЛОГІЯ ДОСЛІДЖЕНЬ МІГРАЦІЇ РАДІОНУКЛІДІВ У ҐРУНТОВОМУ ПОКРИВІ

В. Мельник, Ю. Бліндер, О. Піскунова

Східноєвропейський національний університет імені Лесі Українки

Ключові слова: вейвлет, фільтрація, бінаризація, растрова електронна мікроскопія, міграція, радіонукліди.

Постановка наукової проблеми та її значення

Проблематика радіоактивного забруднення належить до наукової системи знань, яка називається радіоекологією, що об'єднує біологічні та фізико-математичні напрями. Дослідження структури і трансформації полів радіоактивного забруднення сьогодні перетворилось на актуальну наукову проблему, що вирішує важливе екологічне питання забруднення земельних угідь. Інформація про їх радіоекологічний стан дозволяє розробляти оптимальні структури землекористування, що, на відміну від традиційних, дають можливість зменшувати навантаження на населення. Для цього необхідно встановлювати динаміку горизонтальної та вертикальної міграції цезію-137 у ґрунтового покритті.

Поровий простір ґрунту є важливою діагностичною характеристикою, яка великою мірою визначає його властивості (водний режим, явища тепло- і масопереносу, родючість тощо). Існує тісний зв'язок між пористістю ґрунту та міграцією радіонуклідів (РН). Застосування РЕМ дає змогу проводити дослідження ґрунтів у різних діапазонах та в широкому інтервалі збільшень (від 20 до 10000 крат).

Традиційні методи [4] оцінювання параметрів мікробудови ґрунтів, як правило, дуже трудомісткі, а часто просто непридатні. Особливо актуальне розроблення експрес-методів комплексної оцінки кількісних параметрів мікробудови ґрунтів за їх РЕМ-зображеннями, які дозволяють за зразками невеликого розміру оперативної і достатньо достовірно визначати структурні характеристики ґрунтів на мікрорівні [4]. Знання про мікроструктуру дають змогу змоделювати вертикальну міграцію РН і поєднати радіоізотропний метод горизонтальної міграції в математичній моделі механізму.

Основною метою статті є обґрунтування алгоритму кількісного стереологічного (планіметричного) аналізу порового простору дисперсних ґрунтів за їх РЕМ-зображеннями. Необхідно оптимізувати процедури фільтрації (усунення шумів) та бінаризації; теоретично обґрунтувати моделі вертикальної та горизонтальної міграції радіонуклідів на основі кількісного аналізу мікроструктури порового простору ґрунтів; експериментальними дослідженнями підтвердити ефективність та інформативність стереології РЕМ-зображень дисперсних ґрунтів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій, які стосуються вирішення цієї проблеми

На думку Р. М. Алексахіна, С. К. Гордєєва, Д. А. Маркелова, перспективними і достатньо ефективними є методи, що ґрунтуються на дослідженнях за допомогою растрових електронних мікроскопів (РЕМ) порового простору ґрунтів різної генези [1–3]. За даними G. Gackenheim та Y. Misiti, для цифрової фільтрації доцільно використовувати вейвлетоутворювальні функції Хаара [5; 6]. Алгоритми бінаризації зображення описано в працях В. М. Мельника та статтях В. Н. Соколова [4; 8]. У дослідженнях В. Грабовського, О. Дзедзелюк та Ю. Бліндера представлена математична інтерпретація вертикальної міграції радіонуклідів [9; 10; 13]. Горизонтальну міграцію радіонуклідів І. В. Якімова отримувала за розрахунком змиву або за допомогою штучного дощування [12; 14].

Виклад основного матеріалу

1. Загальні положення 2D-цифрової обробки РЕМ-зображень

Під час розв'язання задач міграції радіонуклідів у дисперсних ґрунтах важливими є питання отримання 2D- та 3D-характеристик. Такі характеристики можна отримати на основі цифрового опрацювання растрово-електронно-мікроскопічних зображень. У процесі такого опрацювання важливим і необхідним є здійснення операції фільтрації, тобто усунення або послаблення шумових факторів. Одним із доволі ефективних варіантів фільтрації є застосування вейвлет-перетворень. На практиці така фільтрація дає змогу застосувати широкий спектр різноманітних вейвлетоутворювальних функцій.

У загальноприйнятих позначеннях безперервне вейвлет-перетворення записується так:

$$W_{\psi}^f(a, b) = |a|^{-1/2} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt, \quad (1)$$

де a – масштаб; b – параметри зсуву; ψ^* – складова компонента перетворення $W_{\psi}^f(a, b)$.

У наших дослідженнях використовувались вейвлетоутворювальні функції Хаара:

$$\psi(t) = \begin{cases} 1 & \text{при } 0 \leq t < 1/2, \\ -1 & \text{при } 1/2 \leq t < 1, \\ 0 & \text{у } \text{peumi випадків.} \end{cases} \quad (2)$$

Повніше та детальніше ці питання висвітлено у спеціальній літературі [5;6].

Таблиця 2

Розподіл пор за розмірами

Глибина відбору зразка, см	Вміст пор, % від загальної пористості			
	Мікропори, мкм			Мезопори, 30–100 мкм
	Тонкі 0,1–1	Середні, 1–10	Грубі 10–30	
Дерново-підзолисті ґрунти				
5	10,1	22,1	24,3	43,5
15	10,4	25,3	32,9	31,4
25	11,2	28,3	37,4	23,1
Сірі лесові ґрунти				
5	9,4	24,2	37	29,4
15	6,9	23,8	28,6	40,7

Сьогодні 2D-інтерпретація РЕМ-зображень має достатньо розвинене програмне забезпечення. В наших дослідженнях використовувався ПП “Stiman” [7]. На відміну від інших програмних продуктів, ПП “Stiman” дозволяє здійснювати об’єднання в одну статистичну вибірку (генеральну) масивів цифрових даних РЕМ-зображень (5 і більше), отриманих за різних збільшень ($100^x-10000^x$).

Інтерпретація РЕМ-зображень дає можливість кількісно оцінювати поровий простір дисперсних ґрунтів. При цьому необхідно розв’язати задачу відокремлення пор від твердої фази (мікрочастинок).

З метою підвищення оперативності розрізнення на цифровому зображенні пор і мікрочастинок доцільно здійснювати бінаризацію зображення за наведеним алгоритмом [4; 8].

На бінарному зображенні світлі піксели відповідають твердій фазі, а темні — порам. З метою усунення (зменшення) шумових перешкод доцільно замість поелементної бінаризації здійснювати цей процес за зонами (окремими ділянками). Для кожного пікселя зображення розглядають окіл розміром b_R , визначаючи мінімальне $G_{B_{min}}$ та максимальне $G_{B_{max}}$ значення інтенсивності та розраховуючи відносно них границю перетворення:

$$L_B = \frac{L_A}{100} (G_{B_{max}} - G_{B_{min}}), \quad (3)$$

де L_A – відносна границя перетворення, %.

Приймається $L_A = 20$ %, а радіус адаптивного вікна – 25 пікселів.

Результатом бінарного перетворення є матриця $B = \{b_i\}$, кожен елемент якої:

$$b_i = \begin{cases} 0, & \text{якщо } g_{Fi} < L_B \\ 1, & \text{якщо } g_{Fi} \geq L_B \end{cases}. \quad (4)$$

Після виконання описаних операцій виконується власне стереолого-планіметрична обробка РЕМ-зображень. Вона передбачає визначення розподілу пор за еквівалентними діаметрами, площею, периметрами, фактором форми, “розою” орієнтації структурних елементів, коефіцієнтів фільтрації. Результати обробки РЕМ-зображень відображено в табл. 1 та 2.

Крім числових характеристик, ПП “Stiman” дозволяє здійснювати різноманітну графічну інтерпретацію у вигляді гістограм тощо.

Таблиця 1

Морфометричні показники зразка ґрунту (чорнозем)

№ проби	К-ть пор, N	Характерні діаметри, мкм		
		D_{mid}	D_{max}	D_{min}
1	9327	0,911	46,31	0,28
2	17430	0,737	38,07	0,26
3	30388	0,364	49,23	0,13
Середнє значення	15715	0,663	44,54	0,22
№ проби		Пористість, %	K_a %	K_f
1		28,18	5,6	0,395
2		26,86	11	0,418
3		38,43	4	0,549
Середнє значення		31,16	6,86	0,454

2. Концепція міграції радіонуклідів у ґрунтовому покриві.

Міграцію радіонуклідів (РН) у ґрунтовому покриві можна описати на основі таких чотирьох процесів: конвекції, яка відображає направлене перенесення потоку маси; дисперсійно-дифузійний процес; сорбція–адсорбція із повним спектром можливих фізико-хімічних взаємодій між РН та ґрунтом і механічне перенесення РН, сорбованих на інертних носіях.

Така спрощена механіко-детерміністична концепція ґрунтується на припущенні, що всі фізико-хімічні процеси, що керують міграцією РН в ґрунті, можна строго описати. Також передбачається знання або наявність інформації про властивості порового середовища або порового простору ґрунту. Достатньо коректно, як в якісному, так і в кількісному аспекті, поровий простір ґрунту можна оцінити методами растрової електронної мікроскопії (РЕМ). При цьому можливі два режими роботи РЕМ: режим вторинної електронної емісії та катодолюмінесценції. Режим катодолюмінесценції передбачає спеціальне препарування зразків (насичення люмінофором). Ми розглядаємо цей метод як допоміжний до методу цифрової обробки РЕМ-зображень.

Для математичної інтерпретації вертикальної міграції РН у поровому середовищі необхідно зробити певні припущення [9; 10].

Припустимо, що порожнинний простір ґрунту – це ізометричні за формою пори, з’єднані мікроканалчиками. Останні фактично контролюють проникність ґрунту. Зважаючи на таку просторову геометрію, для розрахунку значення проникності ґрунту, очевидно, справедлива така адитивна формула:

$$K = \sum_{i=1}^{i_{cr}} K_{ki} + \sum_{i=i_{cr}}^n K_{pi}, \quad (5)$$

де K_{ki} і K_{pi} – проникність мікроканалчиків і пор відповідно з i_{cr} – інтервалом розмірів, що відповідають границі між мікроканалчиками і порами. Проникність мікроканалчиків (K_k) можна оцінити за формулою Котяхова [11]:

$$K_k = \alpha \sum_{i=1}^{i_{cr}} D_i^2 m_i^{2,1}, \quad (6)$$

де D_i і m_i – еквівалентний діаметр мікроканалчика та його пористість; α – емпіричний коефіцієнт.

Крім цього, порожнинний простір ґрунту можна розглядати як аналог сіткової моделі. Останнє дає змогу застосувати стереометричне перетворення плоских параметрів структури на об'ємні:

$$K_{ps} = \sum_{i=i_{cr}}^n \left\{ K_{km} L_{pi} \left[\frac{D_i}{L} K_{km} + \frac{1}{\beta} \left(1 - \frac{D_i}{L} \right) K_{pi} \right]^{-1} - K_{km} \right\}, \quad (7)$$

де K_{km} – середня проникність мікроканалчиків; K_{pi} – проникність пор, розрахована, як і для мікроканалчиків, також за формулою Котяхова; D_i – діаметр i пор; L – лінійний розмір досліджуваної ділянки; β – координаційне число.

Враховуючи формули (1) і (3), математичний вираз для оцінки істинної проникності ґрунту остаточно матиме вигляд:

$$K = \sum_{i=1}^{i_{cr}} k_{ki} + \left\{ K_{km} K_{pi} \left[\frac{D_i}{L} K_{km} + \frac{1}{\beta} \left(1 - \frac{D_i}{L} \right) K_{pi} \right]^{-1} - K_{km} \right\}. \quad (8)$$

Розроблений за таких припущень алгоритм дає змогу розпізнавати та виділяти на РЕМ-зображенні порожнинного простору ґрунту пори і мікроканалчики та будувати фільтраційну криву, яка враховує критичний діаметр мікроканалчиків D_{cr} , що диференціює пори і мікроканалчики. В результаті аналізу розраховують перелічені кількісні параметри структури порового простору, а також координаційне число β , що відповідає відношенню мікроканалчиків N_k до кількості пор N_p , проникність ґрунту, об'ємний вміст мікроканалчиків (χ_k) у порожнинному просторі.

Як приклад, на рис. 1 показана РЕМ-мікрофотографія зразка ґрунту, отримана в режимі катодолумінесценції. З міркувань репрезентативності результатів кількісного аналізу досліджуваних зразків проводився за серією зображень, отриманих в обох режимах в діапазоні збільшень від 250 до 1000 разів (рис. 2, а-в), що, отже, перекривали весь спектр наявних розмірів пор.

Результати виконаного аналізу наведено в табл. 3.

Таблиця 3

Збільшення (M) та розмір елемента розбиття (L)	
M	L, мкм
250	1,38
500	0,69
1000	0,34
Підсумкові дані структурного аналізу	
Кількість пор	167806
Пористість	30,44
Загальна площа пор, мкм ²	26674
Загальний периметр пор, мкм	173364
Середній діаметр, мкм	0,143157
Середня площа, мкм ²	0,158962
Середній периметр, мкм	1,03312
Питома поверхня, мкм ⁻¹	1,39918
Фільтраційний коефіцієнт (MD)	0,140256



Рис. 1. РЕМ-мікрофотографія зразка ґрунту (режим катодолумінесценції Мкрат = 80)

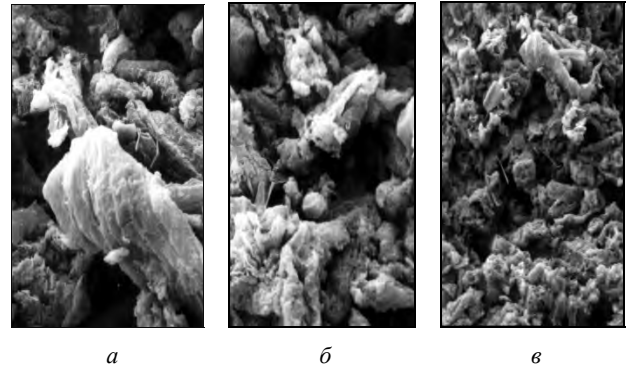


Рис. 2. Мікроструктура зразка ґрунту (а, б, в) режим вторинної електронної емісії; відповідно Мкрат= 1000, 500, 250

Поділ порожнинного простору на пори і мікроканалчики програма здійснює автоматично для вибраного критичного діаметра $D_{cr} = 1,3032$ мкм. Пустоти більшого розміру оцінювалися як пори, а меншого – як мікроканалчики. В процесі аналізу визначено пайову участь пор і мікроканалчиків у фільтрації, на основі якої розраховано координаційне число, яке в нашому випадку дорівнює $\beta = 8$, та фільтраційний коефіцієнт ($K = 0,14$ мД).

Таблиця 4

Результати радіологічних досліджень типових зразків ґрунту на вміст цезію-137 (контрольована зона Волинської області)

№ проби	Глибина горизонту, см	Щільність ґрунту, кг/м ³	Активність	
			Бк/кг	Кі/км ²
Розріз № 1 13 мкР/год. Пасовище Торфувато-болотний ґрунт				
1	0–2	0,8	119,0	0,51
2	2–5	0,9	99,7	0,48
3	5–10	0,9	103,0	0,48
4	10–15	1,0	9,3	0,05
Розріз № 2 15 мкР/год. Рілля Дерново-підзолистий глинисто-піщаний ґрунт				
1	0–5	1,3	91,0	0,65
2	5–15	1,2	93,0	0,63
3	15–30	1,3	161,0	1,11
Розріз № 3 15 мкР/год. Сінокіс Лучно-болотний ґрунт				
1	0–5	1,2	84,5	0,56
2	5–10	1,2	44,7	0,27
3	10–20	1,2	16,8	0,09
4	20–30	1,2	8,5	0,02

Поінтервальна проникність мікроканалчиків зростає зі зростанням їх діаметрів, тоді як внесок у проникність більших пор є незначним і становить всього 7 %. Загалом дані, одержані за допомогою кількісного аналізу РЕМ-зображень, добре корелюють з результатами радіологічних визначень вертикальної міграції РН, виконаних за стандартними методиками (табл. 4).

Проте очевидно, що запропонований підхід цифрової обробки РЕМ-зображень має значно ширший спектр застосування. Зокрема, він може бути використаний в задачах масопереносу, для проведення ґрунтово-екологічного моніторингу складних агроландшафтів тощо [12–14].

3. Горизонтальна міграція радіонуклідів

Існує низка методів визначення горизонтальної міграції радіонуклідів. Серед них окреме місце займає фізичний, оснований на процесі розпаду цезію-137.

Цезій-137 – один з компонентів глобальних радіоактивних випадань після початку випробувань ядерної зброї в атмосфері в період з 1954 р. Цей ізотоп надходить з атмосфери разом з опадами, сорбується ґрунтом за типом обмінно-іонного поглинання і практично не мігрує по вертикальному профілю. Тому на цілих землях значна частина цезію-137, що надійшов з атмосфери, зосереджена у верхньому 5-сантиметровому шарі. На оброблюваних землях ізотоп розподіляється рівномірно по всьому орному горизонті, а його горизонтальна міграція можлива тільки з ґрунтовими частками.

Отже, особливості накопичення, розподілу і міграції цезію-137 у ґрунтах дають змогу використовувати динаміку цих процесів в оцінці його вмісту на значному проміжку часу.

У зарубіжних дослідженнях не робились спроби переходу від відносних концентрацій цезію-137 до модулів змиву ґрунту, проте були спроби за допомогою рівнянь регресії пов'язати зміну його концентрації в орному шарі з даними щодо інтенсивності змиву, отриманими іншими способами, зокрема розрахунком змиву за універсальним рівнянням [12] чи за допомогою штучного дощування [12]. Виявлені залежності мають доволі високі коефіцієнти кореляції.

У статті ми пропонуємо розрахунковий метод переходу від відносних концентрацій ізотопу до абсолютних величин змиву. Припустимо, що щорічно змивається деякий шар ґрунту Δh , що за весь період, з 1955 р. до року вимірювань, утворив шар h см. Концентрація ізотопу в орному горизонті змінюється щороку за рахунок привнесення цезію-137 з атмосфери, змиву шару ґрунту Δh і підорювання такого ж за потужністю шару ґрунту, що не містить цього ізотопу. Оскільки концентрація ізотопу в ґрунті весь час збільшувалася, причому особливо швидко в період з 1955 до 1964 р., та у 1986 р. у зв'язку із аварією на Чорнобильській АЕС, і випадіння відрізнялися великою часовою неоднорідністю, то за того самого шару змиву в різні роки зі схилив видалялась неоднакова частка цезію-137. Крім того, необхідно враховувати і річні варіації інтенсивності змиву, тому варто знати хоча б відносний розподіл змиву за

роками. Критерієм частки загального шару змиву h , що припадає на конкретний рік у зонах з перевагою зливового змиву, може слугувати розподіл за роками ерозійного індексу опадів. Ерозійний індекс опадів являє собою добуток максимальної тридцятихвилинної інтенсивності опадів на їхню кінетичну енергію. У цьому випадку не враховується розподіл за роками талого змиву. На жаль, поки що не існує універсального показника, що оцінює інтенсивність змиву за конкретний рік.

Враховуючи вказані особливості зміни концентрації цезію-137 за роками, загальний шар змиву розрахуємо через систему рівнянь виду:

$$x_{n-1} + a_n - b_n \cdot x_{n-1} \cdot h \cdot H^{-1} = x_n \quad (9)$$

де H – потужність орного горизонту; (a_1, a_2, \dots, a_n) – величини щорічної зміни концентрації цезію-137 за рахунок його надходження і розпаду в частках від суми за весь період; b_1, b_2, \dots, b_n – компоненти ерозійного індексу дощу; x_1, x_2, \dots, x_{n-1} – концентрація ізотопу цезію-137 в ґрунті; n – кількість років спостереження.

Така модель справедлива для інтеграції двох процесів – ерозійного змиву орного шару ґрунту та змін інтенсивності цезію-137.

Математично така залежність описується рівнянням:

$$x_n = (1 - \Delta h \cdot H^{-1})^n \quad (10)$$

де x_n – концентрація ізотопу в досліджуваному зразку; Δh – величина змиву.

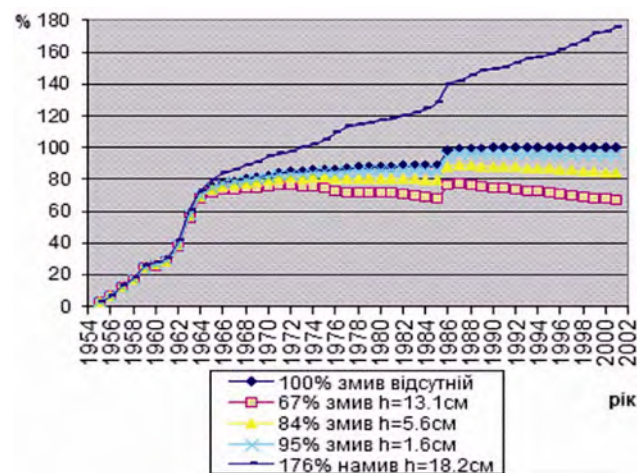


Рис. 3. Зміна концентрації цезію-137 в орному горизонті за різного шару змиву ґрунту

За вказаною методикою виконано відповідні розрахунки змін концентрації цезію-137 в орному шарі досліджуваної ділянки площею 100 га (рис. 3).

Висновки

1. Обґрунтовано оригінальні алгоритми фільтрації бінаризації та кількісного стереолого-планіметричного аналізу РЕМ-зображень дисперсних ґрунтів. За такими характеристиками можна оцінювати динаміку вертикальної міграції радіонуклідів.

2. Розроблено та математично обґрунтовано метод дослідження вертикальної міграції радіонуклідів на основі кількісного аналізу мікроструктури порового простору ґрунту, який здійснюється в результаті цифрової обробки РЕМ-зображень.

3. Запропонована змішана модель інтеграції звичного радіоізотропного методу (розпад цезію-137), поверхневого змиву ґрунту (ерозії) та його параметризації за еквівалентними діаметрами, площею, фактором форми тощо.

4. Розроблена методика оцінки динаміки горизонтальної та вертикальної міграції радіонуклідів може бути успішно застосована в режимних моніторингових дослідженнях радіоактивної ураженості тих чи інших територій.

Література

1. Алексахин Р. М. Авария на ЧАЭС и радиологические проблемы / Р. М. Алексахин // Медицинская радиология. – 1992. – № 1. – С. 40–43.
2. Гордеев С. К. Моделирование процессов миграции радионуклидов чернобыльского происхождения в различных почвенно-ландшафтных условиях / С. К. Гордеев, М. В. Глебов, А. И. Ермаков, С. С. Киров, А. А. Хилев // Научно-технический сборник. – № 9. – 1997. – С. 145–151.
3. Маркелов Д. А. [и др.] Радионуклиды в биосфере / Д. А. Маркелов // Природный радиационный фон. – М.: Prondo.ru, 2011. – С. 49–108.
4. Мельник В. М. Растрово-электронная стереографическая: монография / В. М. Мельник, А. В. Шостак. – Луцк: ПВВ “Вежа” ВНУ ім. Лесі України, 2009. – 469 с.
5. Gackenhaimer C. Analysis of scanning probe microscope images wavelet / G. Gackenhaimer, L. Cayon, R. Reifbergen // Ultramicroscopy. – № 4. – 2006. – P. 389–397.
6. Misiti Y. Matlab – Wavelet Toolbox Unser’s Guide / Y. Misiti, G. Oppenheim, M. Misiti, J.-M. Poggi/ – Natick, MA, USA: The MathWorks Inc, 2000. – Version 2. – 572 p.
7. Соколов В. Н. Метод количественного анализа микроструктуры твердых тел по РЭМ-изображениям / В. Н. Соколов, Д. И. Юрковец, О. В. Разгулина, В. Н. Мельник // Зав. лаб. – 1997. – № 9, Т. 63. – С. 5–35.
8. Соколов В. Н. Программно-аппаратный комплекс для исследования микроморфологии поверхности твердых тел по РЕМ-изображениям / В. Н. Соколов, Д. И. Юрковец, О. В. Разгулина // Поверхность. – 1998. – № 1. – С. 33–41.
9. Грабовський В., Дзендзелюк О. Дослідження вертикальної міграції радіоцезію в ґрунтах різних типів / В. Грабовський, О. Дзендзелюк // Вісник Львів. ун-ту. – 1999. – Вип. 25. – С. 118–119.
10. Блиндер Ю. С. Математичне моделювання вертикальної міграції радіонуклідів у ґрунті / Ю. С. Блиндер // Геодезія, картографія і аерофотознімання. – 2003. – № 63. – С. 25–28.
11. Ромм Е. С. Структурные модели порового пространства горных пород / Е. С. Ромм. – М.: Недра, 1985. – 240 с.
12. Якимова И. В. Количественная оценка рельефа при картографировании эрозионно опасных земель: автореф. дис. канд. геогр. наук: 11.00.04 / И. В. Якимова. – М., 1998. – 24 с.
13. Блиндер Ю. С. Оцінка багаторічної інтенсивності ерозійно-аккумулятивних процесів по вмісту в ґрунті цезію-137 / Ю. С. Блиндер // Науковий вісник ВДУ. – № 3. – 2002. – С. 138–144.
14. Якимова И. В. Методика расчета распределения поверхностного смыва на склонах / И. В. Якимова // Эрозионно-аккумулятивные процессы и народное хозяйство. Деп. ВИНТИ № 8087-В61.

Методологія досліджень міграції радіонуклідів у ґрунтовому покриві

В. Мельник, Ю. Блиндер, О. Піскунова

Охарактеризовано алгоритми цифрової фільтрації із застосуванням вейвлет-перетворень і бінаризації для цифрової обробки РЕМ-зображень Розроблена оригінальна математична модель вертикальної міграції радіонуклідів у ґрунтах різної генези, а для дослідження горизонтальної міграції радіонуклідів запропоновано підхід на основі інтеграції стереології порового простору поверхневого змиву та періоду розпаду радіоактивного ізотопу цезію-137.

Методология исследований миграции радионуклидов в почвенном покрове

В. Мельник, Ю. Блиндер, О. Пискунова

Охарактеризованы алгоритмы цифровой фильтрации с применением вейвлет-преобразований и бинаризации для цифровой обработки РЕМ-изображений. Разработана оригинальная математическая модель вертикальной миграции радионуклидов в почвах различного генезиса, а для исследования горизонтальной миграции радионуклидов предложен подход на основе интеграции стереологии порового пространства поверхностного смыва и периода распада радиоактивного изотопа цезия-137.

Research methodology migration of radionuclides in soil cover

V. Melnyk, J. Blinder, O. Piskunova

Characterized algorithms for digital filtering using wavelet-transformation and binarization for digital processing of REM-images The original mathematical model of vertical migration of radionuclides in soils of different genesis, and to study the migration of radionuclides horizontal an approach based on integration stereology pore space and surface run-off period decay of the radioactive isotope Cesium-137.