

УДК 504.54.062.4

М. В. КУЦЕНКО, канд. геогр. наук, доц.

*Національний науковий центр "Інститут ґрунтознавства та агрохімії
імені О. Н. Соколовського УААН",
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна*

ГЕОСИСТЕМНІ ЗАСАДИ МОДЕЛЮВАННЯ ТА РЕГУЛЮВАННЯ ЕРОЗІЙНО-АКУМУЛЯТИВНИХ ПРОЦЕСІВ

Запропоновано основні універсальні принципи, математичні рівняння та геоінформаційна основа нової геосистемної методології моделювання ерозійно-аккумулятивних процесів, що дозволяє враховувати не тільки зовнішні фактори, але й внутрішні зв'язки; наведено результат просторового моделювання змиву.

Ключові слова: ерозійні процеси, методологія моделювання, геоінформаційне забезпечення

In the article are offered the basic universal principles, mathematical equations and geoinformation basis of a new geosystem methodology of a modeling of the erosive accumulative processes, that makes it possible take into account not only the external factors, but also the internal connections; is showed the result of the spatial modeling of an ablation.

Key words: erosive processes, methodology of a modeling, geoinformation support

Предложены основные универсальные принципы, математические уравнения и геоинформационная основа новой геосистемной методологии моделирования эрозионно-аккумулятивных процессов, которая позволяет учитывать не только внешние факторы, но и внутренние связи; показан результат пространственного моделирования смыва

Ключевые слова: эрозионные процессы, методология моделирования, геоинформационное обеспечение

Постановка проблеми. Моделі ерозії дають значні похибки при прогнозі змиву ґрунтів, і це перешкоджає їх ефективному практичному використанню. Емпіричне моделювання не виправдало надій через відсутність універсальності та неможливості врахування внутрішніх зв'язків ерозійно-аккумулятивних процесів. Теоретичні моделі, що включають значну кількість випадкових параметрів, втрачають свою універсальність, тому що зі збільшенням кількості параметрів імовірність ерозійних подій швидко зменшується. Для підвищення точності моделювання та надійності управління ерозійно-аккумулятивних процесів необхідно адекватно враховувати закономірності самооргані-

зації ерозійних геосистем. Це змушує розробляти нові засади моделювання ерозійних процесів на геосистемній основі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На сьогоднішній день існує безліч моделей водної ерозії і кількість їх зростає [1 - 2]. Емпіричні моделі як правило представляють собою рівняння регресії, що зв'язують модуль змиву чи витрати наносів з чинниками ерозії ступеневими залежностями. Вони мають вузько локальні, обмежені можливості використання, бо не враховують механізми розвитку ерозійних процесів. З емпіричних моделей до теперішнього часу найбільш широко в світі використовується універсальне рівняння втрат ґрунтів USLE та більш досконалий варіант цієї моделі, відомий під назвою RUSLE [3 - 4]. Теоретичні моделі

складаються на основі формалізації фундаментального закону збереження маси та матерії стосовно водно-грунтових потоків за допомогою диференціальних рівнянь [1]. Їх використання є проблематичним через дискретність ерозійних процесів у просторі та у часі і необхідність врахування багатьох параметрів, що носять імовірнісний характер. Значна увага приділяється інтеграції моделей ерозії в ГІС [5]. Всі формули змиву ґрунту та витрат наносів можна об'єднати у 2 групи. Перша група формул виражається ступеневою залежністю змиву від ухилу, довжини схилу, шорсткості поверхні, ерозійних параметрів ґрунту та рослинності. Другу групу формул [1, 2, 6] можна узагальнити за допомогою рівняння:

$$q = k(R_m - R), \quad (1)$$

де q – в одних випадках витрати наносів, в інших модуль змиву; k – коефіцієнт;

R_m , R – в одних випадках відповідно транспортуюча спроможність потоку та фактичні витрати, в інших – фактична та нерозмивна швидкості потоку. Аналіз структури формули (1) підтверджує її глибоку обґрунтованість. Модуль змиву є лінійною функцією від різниці між транспортуючою спроможністю потоку та фактичними витратами наносів, що в нього надходять. Якщо ця різниця додатна, то відбувається змив, якщо від'ємна – накопичення наносів. Якщо різниця дорівнює нулю, то наноси транспортуються транзитом.

Важливе значення для моделювання ерозійно-аккумулятивних процесів мають дослідження транспортуючої спроможності потоку, яку в одних випадках розуміють як витрати наносів у стані насичення водного потоку, в інших – як мутність потоку в стані його насичення. Найбільш обґрунтованою та надійно перевіреною вважається формула С.Т. Алтуніна для мутності, що відповідає транспортуючій спроможності потоку [7]:

$$S_m = A \frac{V^3}{gHw} \quad (2),$$

де S_m – мутність; A – коефіцієнт; V – середня швидкість; g – прискорення вільного падіння; H – середня глибина потоку; w – середня гідравлічна крупність наносів.

З аналізу останніх досліджень та публікацій зроблено такі висновки:

- приріст витрат наносів в ерозійно-аккумулятивних процесах залежить не тільки від зовнішніх факторів, а, в першу чергу, - від властивостей потоку, які формувались на всьому протязі його течії, тому для підвищення надійності моделювання та регулювання ерозійно-аккумулятивних процесів необхідно враховувати їх внутрішні системні закономірності;

- для адекватного моделювання ерозійно-аккумулятивних процесів необхідно розробити таку систему впорядкування географічної інформації, яка б дозволяла швидко, з довільним кроком просторової дискретизації, автоматично простежувати площі контактів водних потоків з земною поверхнею.

Постановка завдання. Метою роботи є визначення головних принципів підвищення адекватності моделювання та ефективності регулювання ерозійно-аккумулятивних процесів, за рахунок урахуванням їх системної природи.

Виклад основного матеріалу. В основу геосистемної методології моделювання ерозійно-аккумулятивних процесів нами покладено наступні положення:

1. Під ерозійною геосистемою ми розуміємо цілісну єдність двохфазного водно-грунтового потоку та створюваного їм рельєфу. Такі геосистеми формуються завдяки взаємодії рельєфу й потоку, що регулюється внутрішніми зв'язками і спрямована на досягнення максимально стійкого стану. Розвиток ерозійних геосистем визначається внутрішніми системоутворюючими зв'язками.

2. Ерозійний процес є істотно нелінійним по двох причинах: а) по ходу руху потік насичується наносами, а його мутність впливає на ерозію; б) зміна рельєфу в ході ерозії впливає на енергію потоку. Отже, для адекватного моделювання процесу ерозії необхідне диференційоване врахування змін самого потоку та рельєфу на всьому протязі його формування. На основі формули (1) для приросту наносів одержимо формулу [8]:

$$\Delta r_{i-1,i} = U(R_{mi-1,i} - r_{i-1}), \quad (3)$$

В цій формулі коефіцієнт U залежить від співвідношень транспортуючої спроможності та фактичних витрат наносів, а також фак-

тичної та розмивної швидкостей потоку і визначається як (4):

де $\Delta l_{i-1,i}$ – просторовий крок дискретної моделі за довжиною потоку; $V_{i-1,i}, V_{pi-1,i}$ –

$$U = \begin{cases} 0 & \text{Якщо } R_{mi-1,i} > r_{i-1} \text{ та } V_{i-1,i} < V_{pi-1,i} \\ \Delta l_{i-1,i} / \Delta x & \text{Якщо } R_{mi-1,i} > r_{i-1}, V_{i-1,i} > V_{pi-1,i} \text{ та } \Delta x > \Delta l_{i-1,i} \\ 1 & \text{Якщо } R_{mi-1,i} > r_{i-1}, V_{i-1,i} > V_{pi-1,i} \text{ та } \Delta x \leq \Delta l_{i-1,i} \\ \Delta l_{i-1,i} / \Delta x' & \text{Якщо } R_{mi-1,i} < r_{i-1} \text{ та } \Delta x' > \Delta l_{i-1,i} \\ 1 & \text{Якщо } R_{mi-1,i} < r_{i-1} \text{ та } \Delta x' \leq \Delta l_{i-1,i} \end{cases} \quad (4),$$

відповідно середня фактична та розмивна швидкості потоку на відрізку $\Delta l_{i-1,i}$; Δx – відстань, протягом якої потік з транспортуючою спроможністю $R_{mi-1,i}$ та кількістю наносів r_{i-1} , що надходять через верхній створ відрізку $\Delta l_{i-1,i}$ повністю насичується наносами; $\Delta x'$ – відстань, протягом якої відбувається повне осадження частини наносів, що перевищує $R_{mi-1,i}$. $\Delta r_{i-1,i}$ – приріст витрат наносів на ділянці $\Delta l_{i-1,i}$ векторної трубки потоку наносів; $R_{mi-1,i}$ – середнє значення транспортуючої здатності потоку на цій ділянці, що розраховується за формулою (2); r_{i-1} – витрати наносів через верхній створ ділянки $\Delta l_{i-1,i}$:

$$r_{i-1} = \sum_{j=2}^i \Delta r_{j-1,j}, \quad (5)$$

де i та j – створи дискретної моделі. Інші позначення залишилися без змін.

3. Для врахування взаємодій водно-грутового потоку з рельєфом необхідно, використовуючи закон збереження маси, визначити витрати наносів через зміни висот рельєфу та швидкість тектонічних рухів:

$$r_{i-1} = - \sum_{k=2}^{i-1} \left\{ \Delta F \rho \left[\frac{H_1 - H_0}{\Delta t} + v_m \right] \right\}_{k-1,k}, \quad (6)$$

де i, k – номери створів; ΔF – площа проєкції ділянки векторної трубки потоку між створами $k-1, k$, м²; Δt – відрізок часу, що розглядається, рік; H_0, H_1 – середні для цієї ді-

лянки висоти рельєфу – відповідно на початковий та кінцевий моменти відрізка часу Δt , м; ρ – середня щільність ґрунту верхнього шару ($H_1 - H_0$), кг/м³; v_m – швидкість тектонічних рухів, м/рік.

4. Детермінований прогноз ерозії можливий тільки в рамках імітаційного моделювання саморозвитку ерозійних геосистем, за принципом: якщо умови будуть заданими певним чином, то результат буде детермінованим.

5. Взаємодія рельєфу з потоком наносів підкоряється принципу мінімуму дисипації енергії та приводить до узгодження співвідношень характеристик елементів ерозійної геосистеми. Ці співвідношення відбиваються в рельєфі як стійкі пропорції між його елементами, являють собою структуру геосистеми та управляють її функціонуванням.

6. Зміни ухилів річкового русла визначаються співвідношенням приросту наносів і транспортуючої здатності потоку за рахунок відповідних ділянок водозбору. Якщо приріст наносів більше ніж приріст транспортуючої здатності потоку, відбувається акумуляція, що веде до позитивного збільшення ухилів. При зворотному співвідношенні цих показників відбувається ерозія, і збільшення ухилів стає від'ємним. На основі таких міркувань було виведено рівняння, що зв'язує руслові процеси з ерозією ґрунтів:

$$\Delta J_i = K(\Delta r_i - \Delta R_{mi}) \quad (7)$$

де ΔJ_i – приріст поздовжнього ухилу русла річки на ділянці i ; Δr_i – приріст витрат наносів, а ΔR_{mi} – приріст транспортуючої здатності потоку за рахунок водозбору на цій ділянці; K – коефіцієнт пропорційності. Виразивши Δr_i та ΔR_{mi} через морфометричні показники рельєфу, ми вивели рівняння, що зв'язує висоти динамічно рівноважного профілю річки з характеристиками структурних елементів її водозбору:

$$H_j = \sum_{i=1}^j l_{i-1,i} \left\{ J_0 + \sum_{v=1}^p l_v z_v - b_v (S_v - S_{v-1}) J_{v-1} \right\} \quad (8)$$

де H_j – висота профілю в створі j ; $l_{i-1,i}$ – відстань між створами $i-1, i$; i – номер створу, починаючи від гирла; J_0 – ухил на верхньому відрізку профілю річки; p – кількість елементів водозбору дискретної моделі (схилів між створами, балок та ярів), розташованих вище створу j ; a_v, b_v – коефіцієнти, які виражаються рівняннями:

$$a = AU \frac{(kI)^{1,6}}{gWn^{2,4}}; \quad b = Ag^{-1} W^{-1} n^{-2,4},$$

де A, g – константи; U – параметр, що обчислюється за формулою (4); l – середня довжина схилу; k – коефіцієнт стоку; W – гідралічна крупність наносів; n – коефіцієнт шорсткості; v – номер ділянки долини, починаючи від джерела; p – кількість структурних елементів водозбору до створу j ; J_{v-1} – ухил попереднього відрізка профілю долини.

Параметри z_v, S_v у формулі (8) визначаються за допомогою рівнянь:

$$z_v = (B^{-0,6} F^{1,6} J^{1,2})_k; \quad S_v = (B^{-0,6} F^{1,24})_k,$$

де B – ширина потоку річки забезпеченістю 10 %; F – площа водозбору, що замикається даним створом; J – поздовжній ухил русла. У формулі (8) $b_v (S_v - S_{v-1}) J_{v-1}$ – приріст транспортуючої здатності потоку за рахунок v -го елемента структури водозбору.

7. Розроблено нову, структурно-сфокусовану комп'ютерну технологію просторового моделювання ерозійно-аккумулятивних процесів (скорочено структурно-сфокусована технологія просторового моделювання – ССТПМ), в якій просторова ідентифікація факторів, що впливають на ерозійно-аккумулятивні процеси, полягає в автоматич-

ному визначенні належності довільної точки певному полігону з відповідною атрибутивною інформацією. Ми розробили алгоритм такої ідентифікації для полігонів будь-якої складності та підпорядкованості.

З метою ефективного визначення параметрів рельєфу розроблено принципово нову векторну структурну цифрову модель рельєфу (ВСЦМР), що дозволяє швидко та ефективно визначати будь-які параметри рельєфу. Географічна інформація про рельєф зберігається у вигляді координат точок підпорядкованих полігонів 3-х ієрархічних рівнів. Така ієрархічна мережа будується автоматично на основі ліній стоку, введених у Mapinfo за певними правилами. 1-й її рівень – ділянки водозбірних басейнів (ДВБ), кількість яких залежить від складності рельєфу та розміщення ділянок досліджуваної території; 2-й – ділянки схилів між сусідніми лініями стоку, тобто елементарні схили (ЕС) у межах полігонів 1-го рівня, 3-й – елементарні інформаційні чарунки (ЕЧ), що представляють собою чотириохкутники, вершинами яких є точки перетинання сусідніх ліній стоку з горизонталями.

Така інформаційна технологія дає змогу швидко і точно розраховувати не тільки ерозійні чинники, а й просторові системні взаємодії ерозійно-аккумулятивних процесів шляхом розрахунків рекурентних залежностей типу (4) та (6). Параметри ерозійних чинників та протиерозійних заходів вводяться, а результати моделювання виводяться у вигляді електронних карт та легенд за допомогою MIF – та MID-файлів Mapinfo. На рисунку показано результат прогнозування змиву ґрунту за технологією ССТ із застосуванням моделі USLE.

Висновки

1. Для адекватного моделювання ерозійно-аккумулятивних процесів необхідно враховувати не тільки зовнішні фактори, а й внутрішні системні зв'язки цих процесів, які виражаються в певних пропорціях між елементами ерозійних геосистем.
2. Розроблено структурно-сфокусовану комп'ютерну технологію просторової ідентифікації факторів та зв'язків в ерозійних геосистемах, в основу якої покладено дискретну ієрархічну мережу полігонів.
3. Така технологія значно підвищує адекватність і швидкість моделювання ерозійно-аккумулятивних процесів та ефективність проектування протиерозійних заходів.

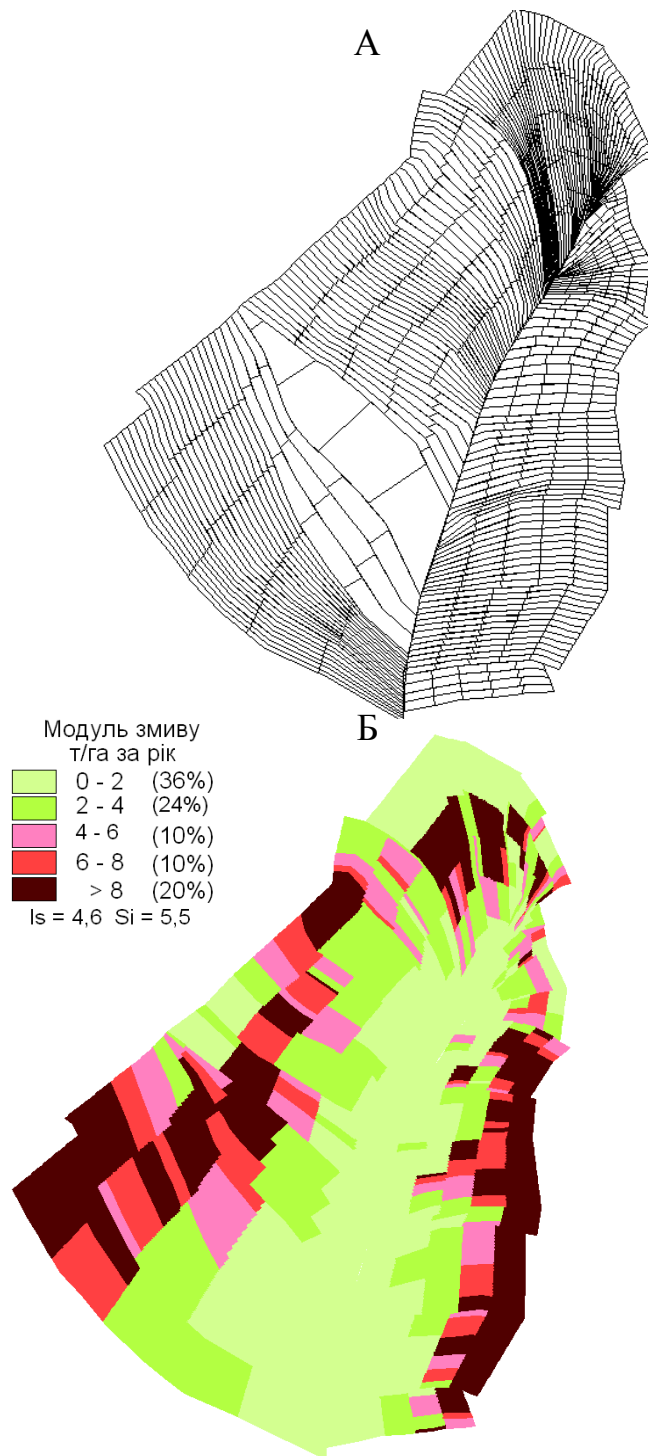


Рисунок – Результат автоматизованої оцінки ерозійної небезпеки земель за ССТПМ:
А – просторова інформаційна мережа; Б – прогнозування змиву за USLE

ЛІТЕРАТУРА

1. Наукові та прикладні основи захисту ґрунтів від ерозії в Україні / [Балюк С. А., Тимченко Д. О., Гічка М. Н. та ін.] за ред. С. А. Балюка та Л. Л. ТОВАЖНЯНСЬКОГО. – Харків: НТУ «ХПІ», 2010. – 460 с.
2. Ларионов Г. А. Определение гидрофизических параметров почвы в модели эрозии / Г. А. Ларионов, О. Г. Бушуева, Н. Г. Добровольская [и др.] // Почвоведение. - 2010. - № 4. - С. 488 – 494.
3. Van Rompaey Anton J. J. Validation of Soil Erosion Risk Assessments in Italy / [Anton J. J. Van Rompaey Paolo Bazzoffi, Robert J.A. Jones, Luca Montanarella, Gerard Govers.] // European Soil Bureau Research

Report. EUR 20676 EN. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg. - 2003. - No.12 - 25 p.

4. Montanarella G. Toth, L. Treats to soil quality in Europe / G. Toth, L. Montanarella, E. Russo. - Luxembourg: Office for official publications of the European communities. - 2008. - 151 p. Черваньов І. Г. Флювіальні геоморфосистеми / Черваньов І. Г, Костріков С. В., Воробйов Б. Н. – Харків: РВВ ХНУ ім. В. Н. Каразіна, 2006. – 322 с.

5. Куценко М. В. Науково-методологічні засади формування ґрунтозахисних та водоохоронних агроландшафтів / Куценко М. В. – Харків, 2006. – 90 с.

6. Куценко М. В. Оцінка ерозійної небезпеки земель за різних напрямків обробітку схилів. / Куценко М. В. // Збірник наукових праць ННЦ «Інститут землеробства» УААН. - 2009. - Вип. 3. - С. 8 – 17.

7. Куценко М.В. Геосистемна модель ерозії / Куценко М.В. // Екологія і раціональне природокористування: Зб. наук. праць Сумського державного педагогічного університету ім. А.С. Макаренка. – Суми, 2006. – С. 8 – 16.

Надійшла до редколегії 7.10.2010