

УДК 631:551.3.053

А. В. Іванова, асист.

Одеський національний університет ім. І. І. Мечникова,
кафедра фізичної географії і природокористування
пров. Шампанський, 2, Одеса, 65058, Україна

МЕТОДИКА ОЦІНКИ ЕРОЗІЙНОЇ НЕБЕЗБЕКИ ЗЕМЕЛЬ З УРАХУВАННЯМ ПРОСТОРОВОЇ МІНЛИВОСТІ ФАКТОРІВ ЗЛИВОВОГО ЗМИВУ ҐРУНТУ

Адекватне моделювання та прогноз зливової ерозії ґрунтів являється важливою кроком до оптимізації використання ерозійнонебезпечних земель. Завдяки сучасним технологіям геоінформаційних систем та новим даним з досліджень водно-ерозійного процесу стало можливим враховувати при розрахунках втрат ґрунту просторову диференціацію факторів ерозії. У статті представлені результати ГІС-реалізації моделі зливового змиву ґрунту з урахуванням просторової мінливості всіх параметрів, які входять до складу моделі, та з урахуванням будови схилової струмкової сітки. Модель апробована з використанням невеликої схилової ділянки у межах басейну р. Бутеня (Богуславська польова експериментальна гідрологічна база, Київська область).

Ключові слова: модель змиву-аккумуляції ґрунту, просторовий розподіл факторів, технології ГІС.

Вступ

Відомо, що всі фактори водно-ерозійного процесу — нахили території, форма та експозиція схилу, протиерозійна стійкість ґрунту, гідрометеорологічні умови — значно варіюють у просторі. Урахування цього факту необхідне для найбільш адекватної оцінки втрат ґрунту на території. Але у більшості моделей, які імітують водно-ерозійний процес, вхідні параметри найчастіше приймають незмінними вздовж всієї ділянки досліджень або у межах певних виділів, використовуючи середні їх значення. На межах контурів еродованості або сівозмінних ділянок значення багатьох параметрів змінюються стрибкоподібно, що, звісно, не завжди відповідає природним умовам.

На сьогодні відомо декілька десятків моделей зливового змиву ґрунту, у більшості з яких гідрометеорологічні умови приймаються незмінними вздовж всього схилу, характеристики протиерозійної стійкості ґрунту постійні у межах контуру еродованості або усереднені для типу та підтипу ґрунту, нахили, експозиція та форма схилу усереднюються вздовж прийнятого розрахункового шагу. Використання постійного значення гідрометеорологічних умов по всій площі не має достатньої коректності і призводить до неадекватної оцінки ерозійної небезпеки ґрунту. Прийняття усереднених значень протиерозійної

стійкості ґрунту у межах контуру еродованості без врахування певної поступовості її змін на пограничних територіях призводить до різких стрибкоподібних змін розрахованих величин втрат ґрунту від контуру до контуру. Тому виникає проблема розробки методики, яка дозволила б врахувати просторову неоднорідність всіх факторів зливної ерозії ґрунту.

Матеріали та методи досліджень

Однією з найбільш обґрунтованих моделей змиву ґрунту для умов степу та лісостепу України на даний час вважається логіко-математична модель, розроблена у 70-і роки професором Г. І. Швєбсом [9]. Сучасний модифікований варіант логіко-математичної моделі змиву ґрунту являє собою емпіричну фізико-статистичну модель змиву-акумуляції ґрунту. Ця модель перевірена на основі даних спостережень на стокових ділянках і схилових мікроводозборах Велико-Анадольської водно-балансової станції і Богуславської польової експериментальної гідрометеорологічної бази (БПЕГБ) [5].

Основні розрахункові рівняння модифікованого варіанту моделі зливної ерозії ґрунту з урахуванням просторової мінливості всіх факторів мають вигляд:

при $L < L_a$

$$\begin{aligned} W_{\lambda}(L) = & 1,5 \bar{J}_R(L_a) \bar{I}^m(L_a) f_a(L_a) K_{\Gamma M}(L_a) L_a^{0,5} + K_{\Gamma M}(L) f_a(L) j_R(L) L^{1,5} \frac{d(I^m(L))}{dL} + \\ & + K_{\Gamma M}(L) f_a(L) I^m(L) L^{1,5} \frac{d(j_R(L))}{dL} + K_{\Gamma M}(L) j_R(L) I^m(L) L^{1,5} \frac{d(f_a(L))}{dL} + \\ & + j_R(L) I^m(L) L^{1,5} \frac{d(K_{\Gamma M}(L))}{dL}, \end{aligned} \quad (1)$$

при $L > L_a$

$$\begin{aligned} W_{\lambda}(L) = & 1,5 \bar{J}_R(L_a) \bar{I}^m(L_a) L_a^{0,5} f_a(L_a) K_{\Gamma M}(L_a) + K_{\Gamma M}(L) f_a(L_a) j_R(L) L \frac{d(I^m(L))}{dL} + \\ & + K_{\Gamma M}(L) f_a(L) I^m(L) L \frac{d(j_R(L))}{dL} + K_{\Gamma M}(L) j_R(L) I^m(L) L \frac{d(f_a(L))}{dL} + \\ & + f_a(L) j_R(L) I^m(L) L \frac{d(K_{\Gamma M}(L))}{dL}, \end{aligned} \quad (2)$$

де $W_a(L)$ — модуль зливогого змиву ґрунту, т/га, на відстані L (м) від вододілу; L_a — довжина "зони активного наносоутворення", яка примикає до вододілу, м; $K_{ГМ}$ — гідрометеорологічний фактор зливогого змиву ґрунту, т/га; $f_a(L)$ — функція, яка відображає рівень агротехніки, рівний видобутку f_n — коефіцієнта ґрунтозахисної дії спеціальних агротехнічних протиерозійних засобів, таких, як лункування, боронування, щілювання, мульчування і т. п., і f_p — коефіцієнту протиерозійної ефективності культур; $j_R(L)$ — функція, яка відображає зміну вздовж схилу характеристики відносної змиваємості ґрунту, причому $j_R(L) = j_{R_0} k_R(L)$, (де j_{R_0} — значення характеристики відносної змиваємості для нееродованої ґрунтової різності (на вододілі), $k_R(L)$ — функція зміни вздовж схилу коефіцієнту, який враховує вплив ступеню еродованості ґрунту); L_Δ — робоча довжина "зони активного наносоутворення", в якості якої з метою врахування зміни факторів ерозійного процесу вздовж схилу приймається ділянка схилу, яка забезпечує максимальне значення першого доданку у квадратних дужках виразів, або привододільна ділянка, яка примикає до розрахункового створу, довжиною L_a , м; $I(L)$ — функція, яка відображає зміну вздовж схилу нахилу території, ‰; m — показник ступеню при нахилі.

Модель (1)–(2) програмно реалізована у комп'ютерній системі "Проектування оптимального агроландшафту", розроблений на кафедрі фізичної географії та природокористування Одеського національного університету ім. І. І. Мечникова [5], де розрахунки змиву та акумуляції ґрунту виконуються вздовж профілів, які відповідають лініям току води, з вільно заданим шагом розрахунків. Для більш адекватної оцінки змиву ґрунту необхідне використання багатьох розрахункових профілів, але на площах між профілями все одно доводиться проводити ручну інтерполяцію результатів, яка частіше призводить до помилок і неточностей. Крім того, така реалізація не дозволяє візуалізувати просторовий розподіл змиву ґрунту.

У середині 90-х років виконана просторова реалізація моделі (1)–(2) [5], спираючись на існуючий на той час рівень вивченості просторової структури ерозійного процесу і розвитку геоінформаційних технологій. Але поточного часу у зв'язку з новими даними про просторову мінливість факторів ерозійного процесу, а також значним прогресом у можливостях комп'ютерної техніки і геоінформаційних технологій, з'явилась можливість більш строгого рішення цієї задачі.

Дослідження показали значну просторову неоднорідність гідрометеорологічних умов зливогого змиву ґрунту в залежності від мінливості вологості верхнього шару ґрунту. У відповідності з [10] гідрометеорологічний фактор зливогого змиву ґрунту у скороченій формі можна записати у вигляді формули:

$$k_{ГМ} = \sum_{j=r}^N \left(1 + 17,0 A \frac{\Delta x_j}{\Delta t_j} \right) (i_j - i_{CTj})^{2,7} \Delta t_j, \quad (3)$$

де $k_{ГМ}$ — гідрометеорологічний фактор зливогого змиву ґрунту для конкретної зливи, т/га; Δx — шар опадів у мм протягом часу Δt , для якого виконана умова $i_j > i_{CTj}$, (i — фактична інтенсивність зливи протягом j -го інтервалу часу, мм/хв., а i_{CT} — змивоутворююча інтенсивність зливи на початок цього інтервалу часу, мм/хв.); N — кількість розрахункових інтервалів дощу, для яких $i_j > i_{CTj}$; A — коефіцієнт, який враховує захисний вплив рослинності.

Значення змивоутворюючої інтенсивності зливи розраховується за формулою:

$$i_{CTj} = 0,08 + 5,92 \exp \left[-0,151 \left(B_0 + \sum_{j=1}^N \Delta x_0 \right) \right], \quad (4)$$

де $\sum_{j=1}^N \Delta x_0$ — сума опадів від початку зливи до розрахункового інтервалу, мм; B_0 — індекс попереднього зволоження Н. Ф. Бефані [3] на початок дощу.

Якщо вважати, що характеристики зливи у межах схилу не змінюються, то просторова мінливість норми $K_{ГМ}$ повністю визначається змінами вологості верхнього шару ґрунту, яка у формулі (4) характеризується індексом попереднього зволоження B_0 . Дослідження залежності норми гідрометеорологічного фактору зливогого змиву ґрунту від індексу попереднього зволоження Н. Ф. Бефані B_0 , виконані з використанням даних спостережень за вологістю ґрунту на агрометеорологічних станціях степової та лісостепової зон України [5, 8], а також матеріалів спостережень Богуславської польової експериментальної гідрологічної бази УкрНДГМІ, дозволили отримати уніфіковану аналітичну модель залежності норми гідрометеорологічного фактору зливогого змиву ґрунту від індексу попереднього зволоження B_0 , та від вологозапасів верхнього півметрового шару ґрунту — характеристики ступеню зволоження ґрунту, яка більше фізично визначена та виміряна. Аналітичні вирази, які відображають цей зв'язок мають вигляд [6]:

$$K_{ГМ} = K_{ГМЗ} (B_0 / B_{03})^{0,3}, \quad (5)$$

$$B_0 = 59,2 \left(\frac{W - W_{МГ}}{W_{HB} - W_{МГ}} \right)^2 + \frac{71,3 - W_{МГ}}{4,08}, \quad (6)$$

$$B_{03} = 59,2 \left(\frac{W_3 - W_{МГ_3}}{W_{HB_3} - W_{МГ_3}} \right)^2 + \frac{71,3 - W_{МГ_3}}{4,08}, \quad (7)$$

де $K_{ГМЗ}$ — зональні значення норми гідрометеорологічного фактору зливогого змиву ґрунту, визначене на метеорологічних станціях, т/га; B — індекс попереднього зволоження території; W — вологість вер-

хнього півметрового шару ґрунту, мм; W_{HB} — найменша польова вологості ґрунту; W_{MG} — максимальна гігроскопічність; нижній індекс "з" при параметрі означає зональне значення даного параметру.

Для просторового моделювання вологості ґрунту у межах схилу використана модель, розроблена для умов України на кафедрі фізичної географії ОНУ ім. І. І. Мечникова у рамках проекту SPARTACUS [2]. В основу її покладена методика розрахунків середньобагаторічної вологості верхнього шару ґрунту для літнього періоду в залежності від форми, експозиції схилу та віддаленості даної точки від вододілу [4] із поправками, виконаними на основі польових досліджень просторового розподілу вологи на Балтському фізико-географічному стаціонарі ОНУ ім. І. І. Мечникова, проведених О. Ю. Степовою [7].

Польові дослідження однієї з характеристик протиерозійної стійкості ґрунту — механічного зціплення — показали значну просторову неоднорідність цієї величини, обумовлену багатьма причинами, зокрема, неоднорідністю ґрунтового покриву, вологості ґрунту, рослинного покриву та засобів сільськогосподарської обробки поверхні. У моделі (1)–(2) просторова неоднорідність відносної змиваємості ґрунту j_R , враховується за допомогою перекодування карти ґрунтів у карту протиерозійної стійкості на основі таблиць з даними про змиваємість по контурах еродованості ґрунту.

Важливим параметром моделі (1)–(2) є довжина зони наростання інтенсивності нумулоутворення L_a . Величина L_a розраховується за рівнянням [5]:

$$L_a = 0,854 m_c^{3/2} (r_{10,p\%} \phi b_c I_a)^{1/2} \quad (8)$$

де $r_{10,p\%}$ — максимальна середня інтенсивність зливи розрахункової забезпеченості $P\%$ протягом десятихвилинного інтервалу часу, мм/хв.; m_c — коефіцієнт шорсткості поверхні; ϕ — коефіцієнт стоку; b_c — середня ширина водозборів тимчасової струмкової сітки, м; I_a — середній нахил схилу, ‰. Для кожної чарунки можна перевірити умову нерівності $L < L_a$ чи навпаки і відповідно до цього виконувати розрахунки за рівнянням (1) чи (2).

Аналіз рівняння (1) показує, що практично усі його складові також мають яскраво виражену просторову мінливість. Але це — згладжена мінливість, тому що значення параметрів у першому доданку цієї формули усереднюються у межах довжини L_a . При просторовій (двохмірній) реалізації моделі для кожного розрахункового елемента поверхні (чарунки растрової сітки) усереднення має виконуватись у межах мікродозбору довжиною L_a , з якого даний елемент отримує водне живлення.

Підкреслимо також, що при двухмірній реалізації і всі інші просторово розподілені параметри моделі (1)–(2) — гідрометеорологічний фактор зливогого змиву ґрунту, нахили схилу, протиерозійна стійкість ґрунту та довжина зони активного нумулоутворення — на кожному кроці розрахунків повинні розглядатися як середні значення в межах часткового водозбору елементарної ділянки.

Таким чином, просторова реалізація модифікованого варіанту логіко-математичної моделі зливого змиву (1)–(2) окрім рішення задачі моделювання просторового розподілу факторів змиву-аккумуляції потребує забезпечення на кожному кроці розрахунків реалізації ітераційної процедури розрахунку довжини L_a з використанням усереднених значень параметрів, а також усереднення всіх інших параметрів моделі у межах елементарного водозбору довжиною L_a . Тобто для виконання поставленої задачі необхідне залучення розрахункових процедур, які виходять за межі можливостей сучасних ГІС-пакетів.

Результати та їх аналіз

Враховуючи усе вище сказане, для просторової реалізації моделі (1)–(2) використані аналітичні та мовні можливості пакету просторового моделювання PCRaster у сполученні з можливостями програмної мови вищого рівня Visual Basic. Просторова реалізація складається з декількох програмних модулів (рис. 1). У кожному наступному модулі використовуються дані, отримані у попередньому. Основними вхідними даними для розрахунків ерозійних втрат ґрунту є цифрова модель рельєфу (ЦМР) дослідної території, ґрунтова карта, карта землекористування, а також карта просторового розподілу вологості верхнього півметрового шару ґрунту.



Рис. 1. Блок-схема просторової реалізації моделі зливого змиву ґрунту

Перший модуль розробленої методики є реалізацію моделі просторового розподілу КГМ за рівняннями (5)–(7). Другий програмний модуль виконує розрахунки просторового розподілу таких параметрів, як нахили схилу, лінії току води, протиерозійна стійкість ґрунту, параметри рослинності та обробки ґрунту. Вхідними даними є ЦМР та карта ґрунтів.

Результатом розрахунків третього модулю являється параметр рівняння (2) "довжина зони активного намулоутворення". У модулі виконуються циклічні розрахунки даного параметру послідовно для кожної чарунки растру реалізовані за допомогою програмної мови Visual Basic. Вхідними даними являються карти рельєфу, ґрунтів та землекористування.

У четвертому модулі розраховуються карти осереднених по мікродозборах схилу параметрів (протиерозійна стійкість ґрунту, гідрометеорологічний фактор зливового змиву ґрунту, нахили території). Розрахунки виконуються у циклах послідовно для кожної чарунки растру, яка на кожному кроці циклу розглядається як замикаючий створ даного мікродозбору, із залученням програмної мови Visual Basic. Модуль 5 розраховує карти похідних від параметрів вздовж схилу (протиерозійна стійкість ґрунту, гідрометеорологічний фактор зливового змиву ґрунту, нахили території).

У останньому модулі з використанням отриманих у попередніх модулях карт параметрів та рівнянь (1)–(2) виконуються розрахунки змиву та акумуляції ґрунту.

Для перевірки розробленої методики використана тестова ділянка — мікродозбір улоговина Плоска, яка є верхньою безруською частиною балки Довжик у басейні ріки Бутені на півдні Київської області у межах БПЕГБ. Середній нахил схилу — 0,025. Ґрунти — темно-сірі лісові незмиті, слабо- та середньозмиті у нижній частині (рис. 2). Ділянка розорюється. При розрахунках вважалося, що протиерозійні заходи на даній території не вживаються.

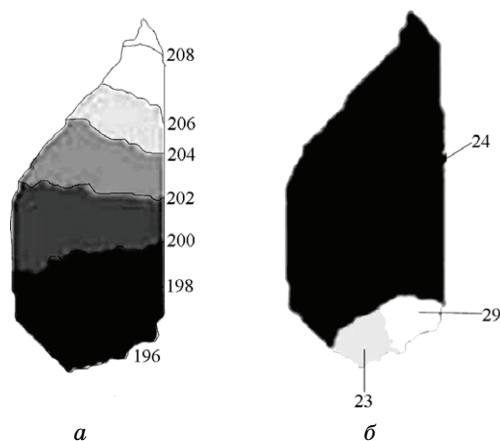


Рис. 2. Мікродозбір улоговина Плоска: *а* — рельєф, *б* — ґрунтовий покрив (24 — ґрунти темно-сірі лісові незмиті, 23 — слабкозмиті, 29 — середньо- та слабкозмиті)

Виконані розрахунки показали значну просторову мінливість всіх факторів водної ерозії ґрунту та значень змиву-аккумуляції по площі дослідної ділянки — улоговини Пласкої (рис. 3, 4). Різниця між максимальними та мінімальними значеннями основних параметрів моделі (1)–(2) сягає 100% і більше (рис. 3).

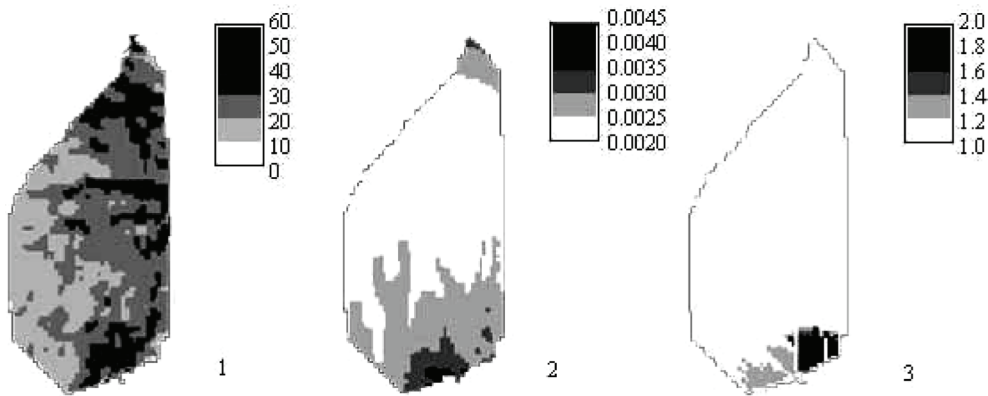


Рис. 3. Просторова мінливість факторів водної ерозії ґрунту: 1 — нахил схилу (‰); 2 — гідрометеорологічний фактор (т/га); 3 — змиваємість ґрунту (безрозм.)

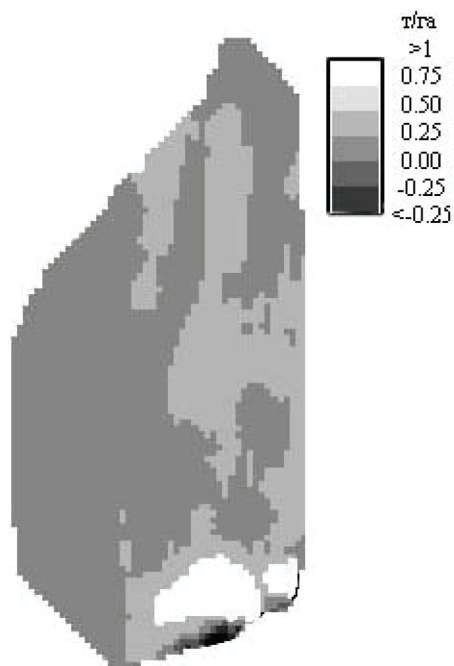


Рис. 4. Просторовий розподіл змиву-аккумуляції ґрунту, т/га

Максимальні значення змиву ґрунту за розрахунками складають 13,02 т/га, мінімальні дорівнюють 0. Максимум змиву характерний для невеликих за розміром ділянок у нижній частині схилу, де зафіксовані також збільшення нахилу схилу (до 55‰) (рис. 4), відносно великі значення гідрометеорологічного фактору (0,0043 т/га) та відносної змиваємості ґрунту (2,0) (рис. 3). Для більшої частини площі дослідної території характерні значення змиву від 1 до 2 т/га. Середній змив ґрунту складає 2,23 т/га.

Висновки

Таким чином, з використанням можливостей сучасних ГІС-технологій виконана просторова реалізація моделі зливогого змиву ґрунту, яка дає можливість врахувати просторову мінливість всіх основних факторів ерозії ґрунту та отримати у результаті просторовий розподіл величин змиву та акумуляції ґрунту.

Розрахунки проведені на тестовій ділянці показали просторову мінливість значень змиву ґрунту навіть на невеликій, простій за рельєфом ділянці, що безумовно необхідно враховувати при оцінці ерозійної небезпеки території та плануванні протиерозійних заходів.

Література

1. Svetlichny A. A., Plotnitskiy S. V., Stepovaya O. Y. Spatial distribution of soil moisture content within catchments and its modeling on the basis of topographic data // *Journal of Hydrology* 277 — 2003. — P. 50–60.
2. SPARTACUS: Spatial redistribution of radionuclides within catchments: development of GIS-based models for decision support systems. EC Contract No. IC15-CT98-0215. Final Report. M. Van der Perk, A. A. Svetlichnyi, J. W. den Besten and A. Wielinga (eds). — Utrecht Centre for Environmental and Landscape Dynamics Faculty of Geographical Sciences, Utrecht University, The Netherlands. — 2000. — 165 p.
3. Бефани Н. Ф., Калинин Г. П. Упражнения и методические разработки по гидрологическим прогнозам. — Л.: Гидрометеиздат, 1983. — 390 с.
4. Романова Е. Н. Микроклиматическая изменчивость основных элементов климата. — Л.: Гидрометеиздат, 1977. — 288 с.
5. Світличний О. О. Кількісна оцінка характеристик схилового ерозійного процесу і питання оптимізації використання ерозійно-небезпечних земель. — Автореф. дис... д-ра геогр. наук. — Одеса, 1995. — 47 с.
6. Світличний О. О., Іванова А. В. Принципи просторового моделювання гідрометеорологічних умов зливогого змиву ґрунту // *Вісник ОНУ. Том 8. — Вип. 5. — Географічні та геологічні науки.* — 2003. — С. 77–82
7. Степовая О. Ю. Пространственное распределение элементов теплового и водного баланса в ландшафтах: методы оценки с использованием ГИС // *Ученые записки Таврического национального университета им. В. И. Вернадского, серия "География".* — Т. 14. — № 1. — 2001. — С. 117–120.
8. Чорний С. Г. Схилів зрощувані агроландшафти: ерозія, ґрунтоутворення, раціональне використання. — Херсон: Борисфен, 1996. — 170 с.
9. Швейс Г. И. Теоретические основы эрозиоведения. — К.; Одесса: Выща школа, 1981. — 223 с.
10. Швейс Г. И., Светличный А. А., Черный С. Г. Гидрометеорологические условия формирования ливневой эрозии почв. / *Деп. ГНТБ Украины. — Деп. 24.02.93, № 261-Ук93.* — 11 с.

А. В. Иванова

Одесский национальный университет им. И. И. Мечникова,
кафедра физической географии и природопользования
пер. Шампанский, 2, Одесса, 65058, Украина

**МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЭРОЗИОННОЙ ОПАСНОСТИ ЗЕМЕЛЬ
С УЧЕТОМ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ФАКТОРОВ
ЛИВНЕВОГО СМЫВА ПОЧВЫ**

Резюме

Адекватное моделирование и прогноз ливневой эрозии почв является важным шагом к оптимизации использования эрозионноопасных земель. Благодаря современным технологиям геоинформационных систем и новым данным по исследованиям водно-эрозионного процесса стало возможным учитывать при расчетах потерь почвы пространственную дифференциацию факторов эрозии. В статье представлены результаты ГИС-реализации модели ливневого смыва почвы с учетом пространственной изменчивости всех параметров, которые входят в состав модели, и с учетом строения склоновой ручейной сетки. Модель апробирована с использованием небольшого склонового участка в пределах бассейна р. Бутеня (Богуславская полевая экспериментальная гидрологическая база, Киевская область).

Ключевые слова: модель смыва-аккумуляции почвы, пространственное распределение факторов, технологии ГИС.

A. V. Ivanova

National Mechnicov's university of Odessa,
physical geography and nature use department
Shampansky lane, 2, Odessa, 65058, Ukraine

**THE METHOD OF ESTIMATION OF EROSION DANGER OF LANDS
TAKING INTO ACCOUNT THE SPATIAL CHANGEABILITY OF
FACTORS OF THE THUNDERSHOWER WASHING OF SOIL**

Summary

The modelling and prognosis of thundershower erosion of soils is an important step to optimization of the use of the lands. Due to modern technologies of the geoinformation systems and new data on researches of thundershower erosion it became possible to take into account spatial differentiation of factors of erosion at the calculations of losses of soil. In the article there are the results of GIS-realization of model of the thundershower washing off soil taking into account spatial changeability of all parameters which enter in the complement of model, and taking into account the structure of slope rill net. A model is approved with the use of small slope area within the limits of pool of Butenya-river (Boguslav's field experimental hydrological base, Kiev region).

Keywords: model of washing-accumulation of soil, spatial distributing of factors, the GIS technology.