

УДК 631.559.551.57

А. В. П'яткова, викладач

Одеський національний університет ім. І. І. Мечникова,
кафедра фізичної географії і природокористування,
вул. Дворянська, 2, Одеса-82, 65082, Україна,
E-mail: lady_gis@mail.ru

ПРОСТОРОВА ГІС-РЕАЛІЗОВАНА МОДЕЛЬ ЗЛИВОВОГО ЗМИВУ-АКУМУЛЯЦІЇ ҐРУНТУ

Представлена просторова модель зливового змиву-аккумуляції ґрунту та особливості її реалізації у середовищі геоінформаційного пакету *PCRaster*. Наведена схема функціонування моделі та представлені розрахунки змиву-аккумуляції ґрунту з використанням моделі для тестової ділянки.

Ключові слова: просторова модель зливового змиву-аккумуляції ґрунту, геоінформаційні системи, пакет *PCRaster*, растрова карта, чарунка растру.

Вступ

Ерозія ґрунтів є одним з найнебезпечніших видів їхньої деградації. Цей процес, торкаючись усіх компонентів ландшафту, у кінцевому результаті призводить до спустелювання території. Однією з важливих задач по оптимізації використання ерозійнонебезпечних земель є розробка адекватної моделі змиву ґрунту. Трудність даної задачі полягає у тому, що всі фактори зливової ерозії ґрунту є просторово неоднорідними, що викликає строкатість ґрунтового покриву ерозійнонебезпечних територій і відповідні труднощі їх раціонального використання. Геоінформаційні технології на сьогодні є найбільш зручним інструментом для рішення задач врахування просторової неоднорідності природних та антропогенних характеристик території для оцінки її ерозійної небезпеки. Отже, тема статті *актуальна*.

Метою даної роботи є винайдення моделі змиву ґрунту, яка враховує просторову мінливість всіх факторів зливової ерозії та результатом розрахунків якої є просторовий розподіл ареалів переважаючого змиву та переважаючої аккумуляції ґрунту по площі дослідної території. *Об'єктом* досліджень є просторова неоднорідність прояву схилового ерозійно-аккумуляційного процесу. *Предметом* дослідження є моделювання просторового розподілу змиву-аккумуляції ґрунту із застосуванням геоінформаційних систем (ГІС-реалізація).

Матеріали та методи дослідження

Історія ерозійного моделювання нараховує більше 70 років. На сьогодні відомі декілька десятків математичних моделей змиву ґрунту, які умовно можна поділити на дві групи — теоретичні та емпіричні. Найбільшою

популярністю користуються емпіричні моделі змиву, більшість з яких адаптовані для умов тих регіонів, де вони розроблені. Найбільш адекватною для умов степу та лісостепу України є модифікований варіант логіко-математичної моделі змиву ґрунту, рівняння якої повно представлені у [4, 5]. Структура моделі дозволяє коректувати її рівняння з метою врахування просторової мінливості всіх факторів змиву ґрунту. Застосування сучасних геоінформаційних систем дозволяє вийти на новий рівень дослідження та моделювання просторово неоднорідних природних та антропогенних характеристик.

Результати досліджень та обговорення

Дослідження, аналіз та моделювання просторової мінливості факторів зливого змиву ґрунту — характеристик рельєфу, гідрометеорологічного фактору, протиерозійної стійкості ґрунту, характеристик агрофону, а також структури схилового стікання — представлені у [1, 3, 6 і ін.], надають можливості вирішити задачу розрахунків просторового розподілу втрат ґрунту.

Структура схилового стікання — концентрація або розсіювання схилових тимчасових водотоків — враховується через коефіцієнт форми схилових мікроводозборів у формулі так званої приведенної довжини схилу (x') [3, 5, 7]:

$$x' = 0,5 x (K_c + 1) \quad (1)$$

де x' — приведена довжина схилу, м; x — відстань даної точки простору від місцевого вододілу вздовж ліній току води, м; K_c — коефіцієнт форми схилових мікроводозборів.

При врахуванні просторової мінливості гідрометеорологічних умов (K_{GM}) та структури схилового стікання у рівняннях базової моделі змиву-аккумуляції ґрунту з'являються нові доданки із похідними від гідрометеорологічного фактору ($\frac{dK_{GM}}{dx}$) та від приведенної довжини схилу ($\frac{d(x'^{0,5})}{dx}$).

Розрахунки змиву ґрунту при просторовому моделюванні виконуються для кожної точки простору з координатами (x, y). Але растрова модель формалізації даних при ГІС-реалізації моделі передбачає представлення інформації у вигляді регулярної сітки з заданою величиною чарунки. Чарунка растру має певну протяжність у просторі. Координатами позначається центр чарунки, яка частіше має квадратну форму. Тобто розрахунки виконуються для кожної чарунки растру з координатами (i, j).

Похідні від усіх змінних в рівняннях моделі беруться вздовж ліній току води, довжину яких позначимо через n . Таким чином, система розрахункових рівнянь зливого змиву-аккумуляції набуває наступного вигляду:

$$\text{при } x \leq L_a$$

$$\begin{aligned}
 W_{3Л}(i, j) = & 2,6 \cdot 10^{-6} \left[\left(1 + 0,5 \left(\frac{x'}{x} \right)^{0,5} \right) K_{ГМ}(i, j) j_R(i, j) I^m(i, j) f_a(i, j) x^{0,5} + \right. \\
 & + K_{ГМ}(i, j) j_R(i, j) I^m(i, j) \frac{df_a(i, j)}{dn} x^{1,5} + K_{ГМ}(i, j) j_R(i, j) \frac{dI^m(i, j)}{dn} f_a(i, j) x^{1,5} + \\
 & + K_{ГМ}(i, j) \frac{dj_R(i, j)}{dn} I^m(i, j) f_a(i, j) x^{1,5} + \frac{dK_{ГМ}(i, j)}{dn} j_R(i, j) I^m(i, j) f_a(i, j) x^{1,5} + \\
 & \left. + K_{ГМ}(i, j) j_R(i, j) I^m(i, j) f_a(i, j) x^{1,5} \frac{d(x'^{0,5})}{dn} \right]
 \end{aligned} \quad (2)$$

при $x > L_a$

$$\begin{aligned}
 W_{3Л}(i, j) = & 2,6 \cdot 10^{-6} \left[\left(1 + 0,5 \left(\frac{x'}{x} \right)^{0,5} \right) K_{ГМ}(i, j) j_R(i, j) I^m(i, j) f_a(i, j) L_{\Delta}^{0,5} + \right. \\
 & + K_{ГМ}(i, j) j_R(i, j) I^m(i, j) \frac{df_a(i, j)}{dn} x + K_{ГМ}(i, j) j_R(i, j) \frac{dI^m(i, j)}{dn} f_a(i, j) x + \\
 & + K_{ГМ}(i, j) \frac{dj_R(i, j)}{dn} I^m(i, j) f_a(i, j) x + \frac{dK_{ГМ}(i, j)}{dn} j_R(i, j) I^m(i, j) f_a(i, j) x + \\
 & \left. + K_{ГМ}(i, j) j_R(i, j) I^m(i, j) f_a(i, j) x \frac{d(x'^{0,5})}{dn} \right]
 \end{aligned} \quad (3)$$

де $W_{3Л}(i, j)$ — середньобогаторічний зливовий змив ґрунту, т/га/рік, у точці простору (чарунці растру) с координатами (i, j) ; x — відстань від вододілу до чарунки (i, j) вздовж ліній току води, м; x' — приведена відстань від вододілу до чарунки (i, j) вздовж ліній току води, м, $x' = 0,5x (K_c(i, j) + 1)$, де K_c — коефіцієнт форми схилових мікродозборів, безрозм.; L_a — довжина зони зростання інтенсивності активного наносоутворення, яка примикає до вододілу, м; $K_{ГМ}(i, j)$ — середнє у межах схилового мікродозбору до точки (i, j) значення гідрометеорологічного фактору зливогого змиву ґрунту; $f_a(i, j)$ — середнє у межах схилового мікродозбору до точки (i, j) значення фактору агротехніки, безрозм.; $j_R(i, j)$ — середнє у межах схилового мікродозбору до точки (i, j) значення характеристики відносної змиваємості ґрунту, безрозм.; L_{Δ} — робоча довжина «зони активного наносоутворення», в якості якої згідно з (Св., 2004) з метою врахування зміни факторів ерозійного процесу вздовж схилу приймається ділянка схилу, яка забезпечує максимальне значення першого доданку у виразах (4.8)-(4.9), або привододільна, або така, що примикає до розрахункового створу, довжиною L_a , м; $I(i, j)$ — середній у межах схилового мікродозбору до точки (i, j) ухил схилу, ‰; m — показник ступеню при нахилі.

Величина L_a згідно з [5] розраховується за рівнянням:

$$L_a = 0,854 k_v m_c^{3/2} (r_{\tau, p\%} \phi b_c I_a)^{1/2} \quad (4)$$

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, ‰; k_v — коефіцієнт форсування, який враховує відмінність швидкостей добігання хвилі стоку та руху матеріальної точки. Середнє значення коефіцієнту k_v може бути прийняте рівним 1,5. Перемінні m_c , ϕ , b_c , I_a у виразі (4) відносяться до частини схилу довжиною L_a .

Для просторової реалізації моделі (2)-(4) використані аналітичні та мовні можливості пакету просторового моделювання *PCRaster* у сполученні з програмною мовою високого рівня *Visual Basic*. Просторова реалізація складається з декількох програмних модулів. Кожний модуль поетапно розраховує окремі перемінні рівнянь моделі — гідрометеорологічного фактору, ухилів та довжини ліній току, протиерозійної стійкості ґрунту, факторів рослинності та агротехніки, коефіцієнту концентрації, а також похідних від усіх перемінних рівнянь (2)-(3) (рис.1). Окремим модулем розраховується просторовий розподіл вологості верхнього шару ґрунту, необхідний для розрахунків гідрометеорологічного фактору. У кожному наступному модулі використовуються дані, отримані у попередньому. Основними вхідними даними для розрахунків ерозійних втрат ґрунту є цифрова модель рельєфу (ЦМР) території, електронні ґрунтова карта та карта землекористування. Крім того, для розрахунків потрібні значення: гідрометеорологічного фактору зливого змиву ґрунту та вологості верхнього півметрового шару ґрунту на вододілі.

Кожна чарунка растру розглядається як самостійний територіальний об'єкт (гирло мікродозбору при поточному розрахунку), якому притаманна певна кількість накопиченого або втраченого матеріалу з урахуванням усереднених по площі її мікродозбору всіх факторів ерозії. Тому просторово розподілені параметри змиву-аккумуляції ґрунту розглядаються як середні значення по місцевих мікродозборах у кожній точці простору.

Таким чином, в основі ГІС-реалізованої просторової (двохмірної) емпіричної моделі змиву-аккумуляції лежить система рівнянь (2)-(4), яка застосовується до кожної чарунки растру (елементу території) з урахуванням просторових розподілів усіх внутрішніх і зовнішніх факторів формування ерозійного процесу саме на цьому елементі території.

Результатом розрахунків за розробленою моделлю є растрова карта ділянки з величинами просторового розподілу зливого змиву-аккумуляції ґрунту у т/га у середньому за рік.

Для перевірки моделі використана тестова ділянка улоговина Плоска, яка є верхньою безруською частиною балки Довжик. Площа улоговини складає 8,5 г., середній ухил $1,4^\circ$. Максимальний ухил сягає $3,2^\circ$. Довжина ділянки — близько 500 метрів. Експозиція північна. Ґрунти — темно-сірі лісові середньосуглинкові, на більшій частині улоговини незмиті, а у нижній — слабко- та середньозмиті. Поверхня улоговини Плоска повністю розорюється та використовується для вирощування сільськогосподарських культур у польовій шестипільній сівозміні [2]. Обрання ділянки поясню-

ється, по-перше, наявністю даних про виміряний змив у замикаючому створі водозбору ділянки, з яким можна порівняти отримані результати, по-друге, наявністю гідрологічно коректної цифрової моделі рельєфу. Просторова мінливість факторів зливогого змиву представлена на рис. 2.

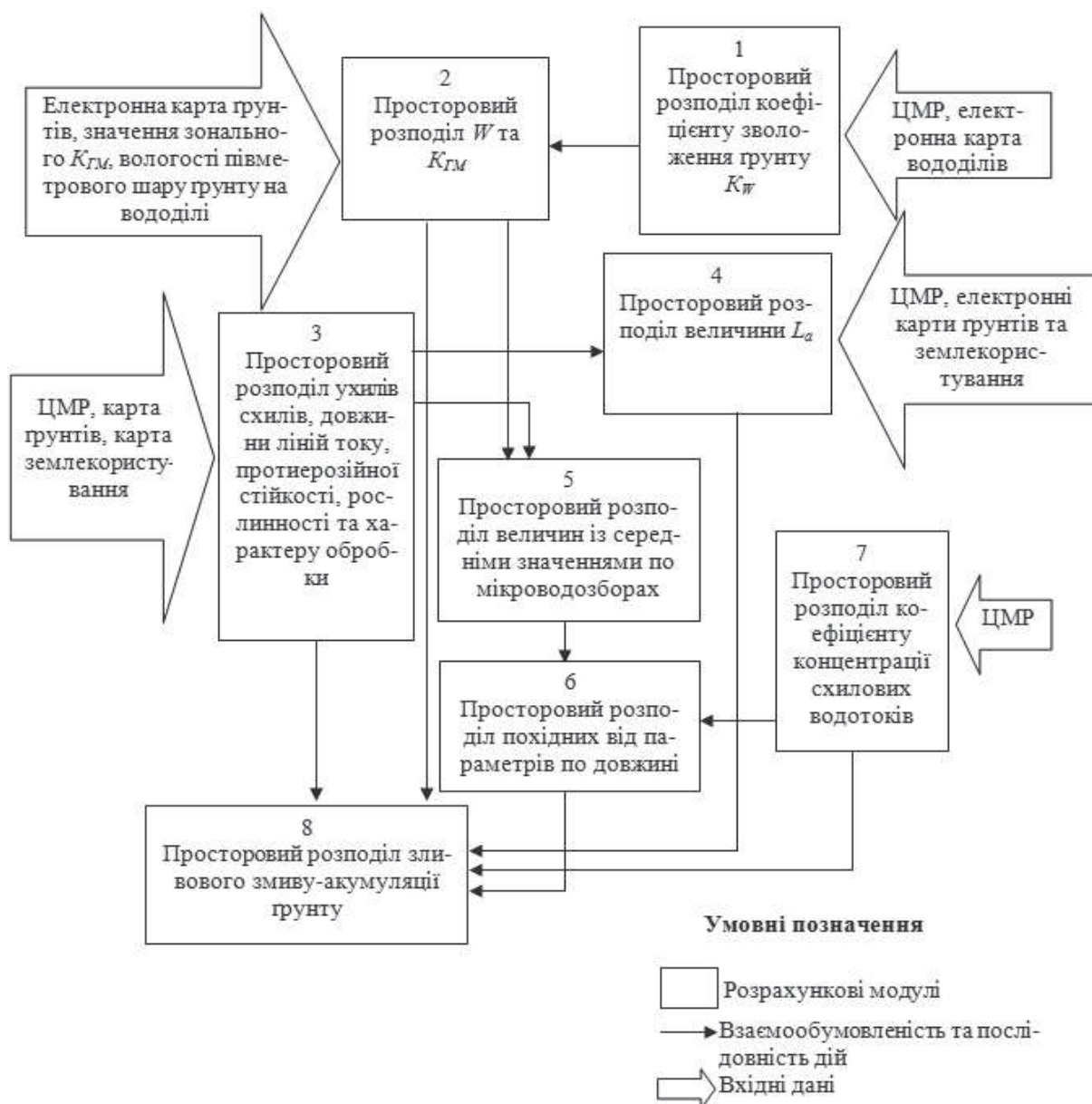


Рис. 1. Блок-схема функціонування просторової моделі зливогого змиву-акумуляції ґрунту

Територія в цілому характеризується низькими значеннями розрахованого змиву, що можна пояснити невеликими ухилами (у середньому до 2°), спрощеною структурою стікання і ґрунтовим покривом — слабо- та середньозмиті ґрунти зустрічаються лише у нижній частині схилу. Як дозволяє судити карта розрахованого зливогого змиву ґрунту (рис. 3), він має значну просторову мінливість, змінюючись від 0 до майже 7,5 т/га/рік (максимальне значення — 7,26 т/га/рік). Найбільшу площу території займа-

ють значення змиву від 0 до 0,5 т/га/рік (71,6 %), найменшу — значення більше 3,0 т/га/рік (2,3 %). Значення розрахованого змиву ґрунту від 0,5 до 3,0 т/га/рік займають решту території, що складає майже 26 %. При цьому максимальні значення розрахованого змиву характерні для ділянок, де спостерігається поперечна концентрація схилових водотоків ($K_c \gg 1$) та де ґрунтовий покрив характеризується середнім ступенем змитості.

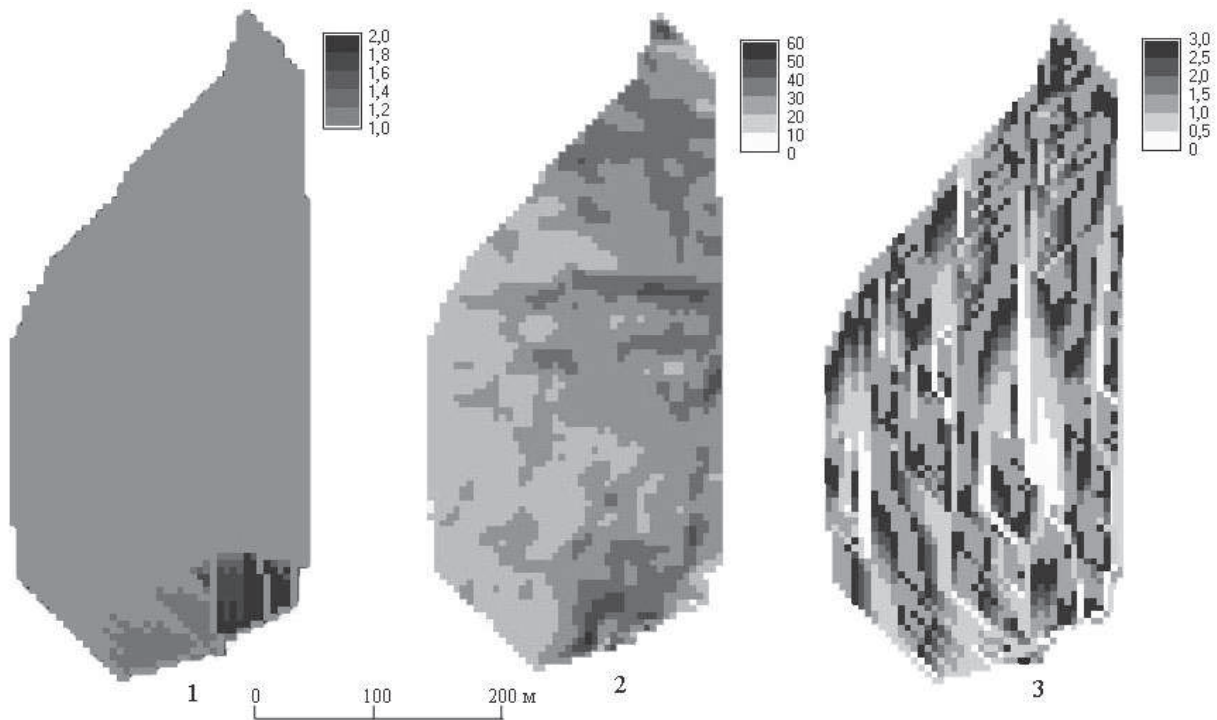


Рис. 2. Просторова мінливість деяких факторів водної ерозії ґрунту: 1 – відносної змиваємості ґрунту (безрозм.); 2 – ухилів поверхні (‰); 3 – коефіцієнту форми схилових мікродозборів (безрозм.)

Адекватність розрахунків з використанням просторової ГІС-реалізованої моделі змиву-аккумуляції ґрунту можна перевірити, використавши значення виміряного у натурі змиву ґрунту. Для цього скористаємось даними по найбільш інтенсивних зливах, що спостерігались у межах ділянки улоговина Плоска протягом 1970–1987 рр. за [2]. Отримано, що розрахований середній по площі змив дорівнює 0,223 т/га/рік. Це лише на 17,7 % менше виміряного змиву (0,271 т/га/рік), що знаходиться у межах похибки вимірювання змиву.

Адекватність просторового розподілу розрахованого змиву ґрунту можна оцінити за: 1) розподілом контурів змитих ґрунтів — максимальний розрахований змив відповідає контурам середньо змитих ґрунтів; 2) структурою гідрографічної сітки схилу — значення змиву збільшується в місцях концентрації водотоків і зменшується вздовж монотонно текучих водотоків; 3) ухилами схилу — чим крутіший схил, тим інтенсивніше відбувається змив ґрунту.

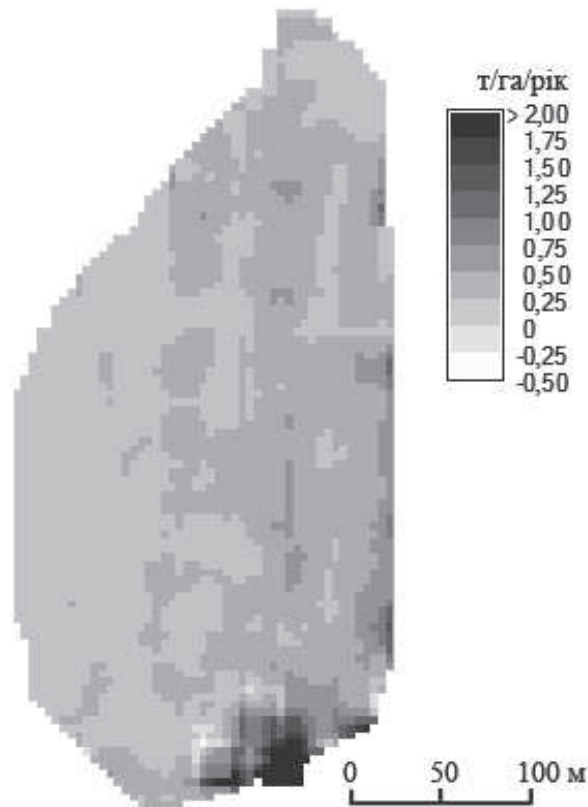


Рис. 3. Просторовий розподіл розрахованого зливогого змиву ґрунту

Висновки

У результаті виконаної роботи отримано:

1. Розроблена просторова модель зливогого змиву-аккумуляції на базі модифікованого варіанту логіко-математичної моделі змиву ґрунту з урахуванням просторової мінливості всіх факторів водної ерозії.
2. Виконана ГІС-реалізація моделі у середовищі пакету *PCRaster*.
3. Модель апробована на прикладі схилової ділянки улоговина Плоска (зона лісостепу України). Показана відповідність моделі реальним величинам та просторовому розподілу змиву ґрунту.

Література

1. Иванова А. В. Пространственные закономерности характеристик противоэрозионной стойкости почв // Ученые записки Таврического национального университета им. В. И. Вернадского. Серия география. — 2003. — Т. 16. — № 1. — С. 81–85
2. Материалы наблюдений Богуславской полевой экспериментальной гидрологической базы. — Киев, 1970–1987. — Вып. 5–22.
3. Пяткова А. В. Особенности моделирования пространственной изменчивости факторов водной эрозии почв // Вісник ОНУ. Географічні та геологічні науки. — Том 13. — Вип. 6. — 2008. — С. 156–163.
4. Светличный А. А. Принципы совершенствования эмпирических моделей смыва почвы // Почвоведение. — № 8. — 1999. — С. 1015–1023
5. Светличный А. А., Черный С. Г., Швебс Г. И. Эрозиоведение: теоретические и прикладные аспекты. — Сумы: Университетская книга, 2004. — 410 с.

6. Світличний О. О., Іванова А. В. Принципи просторового моделювання гідрометеорологічних умов зливогого змиву ґрунту // Вісник ОНУ. Географічні та геологічні науки — Том 8. — Вип. 5. — 2004. — С. 77–82
7. Швєбс Г. И. Теоретические основы эрозиоведения. — Киев–Одесса: Выща школа, 1981. — 223 с.

А. В. Пяткова, преподаватель

Одесский национальный университет им. И. И. Мечникова,
кафедра физической географии и природопользования,
пер. Шампанский, 2, Одесса, 65058, Украина, E-mail: lady_gis@mail.ru

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ГИС-РЕАЛИЗОВАННАЯ МОДЕЛЬ ЛИВНЕВОГО СМЫВА-АККУМУЛЯЦИИ ПОЧВЫ

Резюме

Представлена пространственная модель ливневого смыва-аккумуляции почвы и особенности ее реализации в среде геоинформационного пакета *PCRaster*. Приведена схема функционирования модели и представлены расчеты смыва-аккумуляции с использованием модели для тестового участка.

Ключевые слова: пространственная модель ливневого смыва-аккумуляции почвы, геоинформационные системы, пакет *PCRaster*, растровая карта, ячейка растра.

A. V. Pyatkova, teacher

Odessa national I. I. Mechnikov's university
department of physical geography and nature use
Shampanskiy lane, 2, Odessa, 65058, Ukraine

SPATIAL GIS-REALIZED MODEL OF WATER EROSION LOSSES AND ACCUMULATION OF SOIL

Summary

A spatial model of water erosion losses and accumulation of soil is presented and feature of its realization in the environment of *PCRaster* geoinformatinal package. The scheme of functioning of model is resulted and the calculations of washing-accumulation are presented with the use of model for a test area.

Key words: spatial model of water erosion losses and accumulation of soil, geographic information systems, *PCRaster* package, raster map, cell of raster.