

УДК 910.26: 911.52

## ГЕОІНФОРМАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ СХИЛОВОЇ ЕРОЗІЇ

О. Мкртчян

*Львівський національний університет імені Івана Франка,  
вул. Дорошенка, 41, м. Львів, 79000, Україна*

Аналіз теоретичних праць вітчизняних та зарубіжних дослідників у галузі кількісного моделювання схилової ерозії дав змогу визначити оптимальний за сучасних умов підхід до оцінки поширення та інтенсивності площинного змивання, який передбачає моделювання у середовищі растрової географічної інформаційної системи (ГІС) із використанням моделей RUSLE та USPED. Обидві моделі характеризують сукупний вплив на змивання факторів рельєфу, опадів, ґрунту, рослинного покриву та протиерозійних заходів, проте ґрунтуються на різних припущеннях щодо головного обмежувального чинника схилової ерозії. Обидві методики застосовано на прикладі ділянки басейну верхнього Дністра у межах Українських Карпат із використанням програмного пакета ARC/INFO.

*Ключові слова:* ерозія, площинне змивання, ГІС, геоінформаційне моделювання, цифрова модель рельєфу.

Головним чинником втрати ґрунту, особливо його найціннішого верхнього шару, в умовах помірного вологого клімату є процеси водної ерозії (змивання). Окрім втрат ґрунту, ерозія сприяє замуленню водойм, надходженню в них забруднювальних речовин та іншим негативним явищам.

Ми використали можливості геоінформаційних систем (ГІС) для моделювання поширеності площинної ерозії на тестовій ділянці розмірами 4,0 x 2,5 км, розташованій в околицях сіл Верхній Лужок та Бусовисько (Верхньодністерські Beskidi, Львівська область). Головна проблема в цьому випадку полягає у кількісному визначенні впливу головних чинників ерозії, що дасть змогу ефективно прогнозувати розвиток ерозійних процесів та обґрунтовувати заходи щодо їхнього регулювання. З цією метою доцільно звернутись до багатого досвіду зарубіжних науковців та природоохоронців.

Детальні експериментальні дослідження кількісного впливу чинників ерозії виконано в середині ХХ ст. у США. На підставі аналізу дослідних даних понад 10 000 ділянок-років для 49 місцеположень у США В. Вішмайер та Д. Сміт розробили *універсальне рівняння втрат ґрунту* (USLE) [7], яке швидко стало загальновизнаним інструментом аналізу в США (використовують у природоохоронному плануванні) та багатьох інших країнах. Воно призначене для моделювання ефектів площинного змивання та струменистої ерозії без урахування процесів лінійного розмивання. Таку модель можна застосовувати за наявності мінімальної інформації про місцеві параметри та з мінімальним досвідом [1]. Рівняння має такий вигляд:

$$E = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P, \quad (1)$$

де  $E$  – втрати ґрунту за рік на одиницю площі;  $R, K, L, S, C, P$  – фактори, пов'язані, відповідно, з ерозійністю опадів, стійкістю ґрунту до ерозії, довжиною схилу, розміром

ухилу, наземним покривом і способом вирощування культур, та характером заходів з охорони ґрунту. Показник  $K$  визначають як відношення втрат ґрунту до рівня ерозійності опадів для заданого ґрунту за “стандартних” умов (ділянка завдовжки 22,1 м і крутістю  $5,16^\circ$  під чорним паром, розорана вздовж схилу);  $L$ ,  $S$ ,  $C$  та  $P$  – як відношення втрат ґрунту за умови відхилення значень відповідних факторів від “стандартних” до його втрат за “стандартних” умов.

Подальші дослідження та аналіз додаткової інформації дали змогу вдосконалити цю модель. Нова модель (RUSLE) містить низку уточнень до базової формули [6]. Наприклад, замість довжини схилу запропоновано визначати значення акумуляції стоку (розмір площі, з якої надходить стік у дане місце), яке враховує ефект конвергенції стоку [4].

Розвиток водної ерозії контрольований та лімітований двома чинниками – здатністю води відділяти частинки ґрунту і втягувати їх у потік та транспортувальною здатністю потоку [3]. Оскільки моделювання сукупної дії цих чинників дуже складне, то наявні моделі та методи розрахунку інтенсивності ерозії поділяють на перший та другий типи. Моделі першого типу ґрунтуються на припущенні про необмежену транспортувальну здатність водного потоку, коли швидкість ерозії лімітована лише здатністю води відділяти частки ґрунту та втягувати їх у потік. Моделі другого типу, навпаки, враховують, що водний потік здатен переміщувати обмежену кількість наносів, визначену його транспортувальною здатністю; у цьому разі передбачають, що потік є насиченим наносами та має достатню енергію для відривання нових часток, тому там, де транспортувальна здатність потоку вниз по течії збільшується (наприклад, внаслідок збільшення нахилу поверхні), простежується ерозія, тоді як зі зменшенням транспортувальної здатності (наприклад, у підніжжі схилів у випадку зменшення нахилу) виникає акумуляція. Коректність застосування моделей залежить від правильності припущень, що є в їхній основі, в окремих випадках адекватнішими можуть бути моделі першого або другого типу. Наприклад, за [3] моделі першого типу ліпше описують ерозію глинистих ґрунтів із дуже малим розміром часток, тоді як моделі другого типу адекватніші у випадку піщаних ґрунтів. Модель RUSLE належить до першого типу, чим зумовлена низка її обмежень.

Через недостатню детальність наявних даних щодо просторового розподілу чинників ерозії для тестової ділянки, ми використали спрощений підхід, зокрема, застосований італійськими дослідниками з метою картування ґрунтової ерозії для регіону Емілія-Романья [5]. У цьому разі, незважаючи на брак детальних даних щодо ряду змінних, можна на підставі рівняння RUSLE одержати картину відносної інтенсивності поширення ерозійних процесів. Як зазначають автори [5], цей підхід дає змогу визначити пріоритетність заходів боротьби з ерозією та порівняти різні управлінські альтернативи.

Серед застосованих у [5] спрощень – уявлення про постійне значення фактора ерозійності опадів, завдяки чому цю змінну фактично вилучено з моделі. Як зазначають Х. Мітасова та В. Браун, створення карти розподілу значень  $R$ , замість використання сталого значення, доцільне лише в разі моделювання дуже великих басейнів або регіонів, які охоплюють як гірські, так і рівнинні території [3]. Аналогічно, ми вирішили відмовитись від урахування впливу заходів з охорони ґрунту (фактор  $P$ ), як це зроблено у [5]. Близький (легкосуглинковий) механічний склад схилених ґрунтів ділянки також дав змогу відмовитись від урахування фактора  $K$ .

Під час визначення ерозійного потенціалу із розрахунків було вилучено місцеположення, де переважали процеси лінійного розмивання, бокової ерозії, заплавної акумуляції, акумуляції в конусах винесення тощо, прояви яких приховують ефекти площинного змивання.

Ерозійний потенціал рельєфу (фактор  $LS$ ) в моделі  $RUSLE$  обчислюється за формулою

$$LS(\mathbf{r}) = (m+1) [A(\mathbf{r}) / a_0]^m [\sin b(\mathbf{r}) / b_0]^n, \quad (2)$$

де  $A$  – площа, з якої надходить стік в розрахунку на одиницю довжини замикаючого контуру;  $b$  – крутість схилу;  $m$  та  $n$  – відповідні параметри;  $a_0 = 22,1\text{м}$  – довжина,  $b_0 = 0.09 = \sin(5.16^\circ)$  – ухил поверхні стандартних дослідних ділянок, на яких визначали параметри моделі  $RUSLE$ .

Суттєвою перевагою моделі  $RUSLE$  перед моделлю  $USLE$  є використання для розрахунку показника  $L$  замість довжини схилу (що приводило до одержання однакових значень модуля стоку для верхньої та нижньої частин схилів) показника площі, що акумулює стік. Цей показник, серед іншого, враховує відмінності в інтенсивності змивання у верхній і нижній частинах схилу [2] та вплив на змивання поперечного профілю схилу, який зумовлює концентрацію або ж розсіювання стоку. Зазначимо, що картування показника площі акумуляції стоку  $A$  стало практично можливим лише з появою ГІС із відповідними можливостями аналізу растрових даних.

На результати обчислення ерозійного потенціалу рельєфу за формулою (2) суттєво впливає значення параметрів  $m$  та  $n$ . За [3] рекомендовані значення для  $m$  становлять 0,4-0,6, для  $n$  – 1,0-1,4. Ми для підбирання оптимальних параметрів  $m$  та  $n$  використовували дані щодо поширення змитих ґрунтів різного ступеня змитості, а також характеристик потужності гумусових горизонтів та вмісту гумусу в 29 ґрунтових профілях; підбирали значення параметрів, які давали найбільший за модулем коефіцієнт кореляції обчисленого за формулою (2) значення ерозійного потенціалу рельєфу із зазначеними вище показниками. В результаті використано значення  $m = 0,4$  та  $n = 1,4$ .

Фактор  $L \cdot S$  рівняння  $RUSLE$  (рис. 1) характеризує ерозійний потенціал рельєфу – фактор, який досить важко піддається регулюванню з боку людини та визначає природні передумови розвитку змивання.

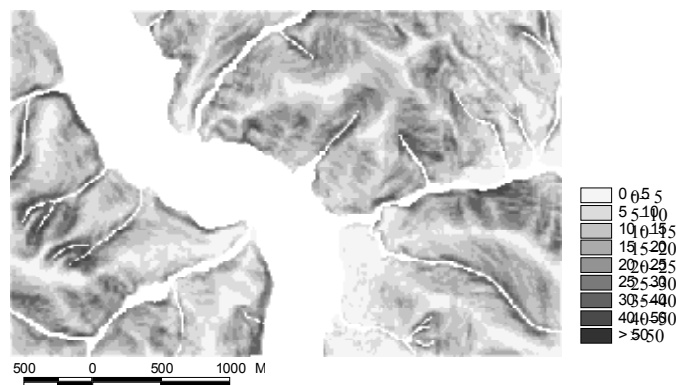


Рис. 1. Ерозійний потенціал рельєфу.

Для обчислення відносного показника інтенсивності змивання використовували дані щодо просторового розподілу головних типів наземного покриття, оцифровані з великомасштабної (1 : 10 000) топографічної карти. Виділеним типам відповідали різні значення  $C$  (за основу брали значення із [5]). Одержана карта показана на рис. 2.

Рис. 2. Відносний розмір змивання ґрунту площинним стоком і мікрострумками.

Наведений показник не лише якісно впорядковує територію за ступенем небезпеки ерозійних процесів (як у випадку бальної оцінки), а й дає змогу одержати кількісну оцінку розподілу відносної інтенсивності змивання в межах території. Наприклад, для середнього значення 0,4 максимальне значення змивання перевищує середнє більш ніж у 10 разів (становить 4,2). Абсолютне значення змивання (у тоннах на гектар за рік) можна одержати за умови введення до моделі кількісних оцінок інших факторів ерозії (опадів, ґрунту, протиерозійних заходів).

Оскільки в основі моделі RUSLE є припущення про необмежену транспортувальну здатність схилових потоків та віддільну здатність цих потоків і дощових крапель як головний чинник, який лімітує ерозію, то вона має низку обмежень: зокрема, за її допомогою не можна виокремити ділянки, де змивання змінює акумуляція (намивання) ґрунту; вона дає дещо завищені значення змивання для місць, де насиченість потоку наносами близька до його максимальної транспортувальної здатності (часто це підніжжя та виположені ділянки схилів). До моделей, які враховують обмежену транспортувальну здатність потоків, належить модель USPED, в основі якої – обчислення дивергенції транспортувальної здатності [3]. Її використання передбачає два етапи. Спочатку визначають просторовий розподіл транспортувальної здатності схилових потоків  $T$ . Для цього використовують рівняння, аналогічні до моделі RUSLE (див. (1) та (2)), з тією відмінністю, що беруть інші значення параметрів  $m$  та  $n$ . У [5] рекомендовано використовувати значення 1 для обох параметрів. Суттєво більші значення  $m$  порівняно із RUSLE можна пояснити тим, що збільшення глибини схилових потоків, яке є в разі акумуляції стоку, суттєво підвищує несучу здатність потоку (навіть за умови його сталої швидкості), проте значно слабше впливає на віддільну здатність, оскільки у випадку дощового змивання головним агентом, що відділяє частки ґрунту, є енергія падаючих крапель [1], яку екранує схиловий потік у разі досягнення ним певної глибини.

Карта розподілу транспортувальної здатності схилових потоків сама по собі не дає інформації про розміщення зон змивання й акумуляції та інтенсивність цих процесів. Для цього необхідно знати, як змінюється транспортувальна здатність у напрямі стоку; в разі її зменшення можливе перевищення реального вмісту наносів у потоці над його транспортувальною здатністю та розвиток акумуляції. Цю зміну визначають як дивергенцію потоку наносів та обчислюють за формулою

$$ED = \operatorname{div}(T \cdot \mathbf{s}) = d(T \cdot \cos a)/dx + d(T \cdot \sin a)/dy, \quad (3)$$

де  $T$  – транспортувальна здатність, яку визначають за формулами (1) та (2) із відповідними значеннями параметрів  $m$  та  $n$ ;  $\mathbf{s}$  – вектор нахилу земної поверхні;  $a$  – експозиція поверхні.

Наведена модель, серед іншого, враховує чинник поздовжньої форми (кривини) схилів, яка впливає на розподіл уздовж схилів зон ерозії та акумуляції. Крім того, акумуляції сприяють розміщені поперек схилів смуги лісової або лучної рослинності з низьким значенням  $C$ , які акумулюють наноси, змиті з розміщених вище полів, городів, садів тощо. Для розрахунку дивергенції в середовищі ARC/INFO GRID ми створили макропрограму мовою AML, що використовує для обчислення дивергенції корисний засіб цієї мови *Neighborhood notation*, який дає змогу створювати довільні фокальні функції. Визначений розподіл найімовірніших місць акумуляції змитих наносів показано на рис. 3.

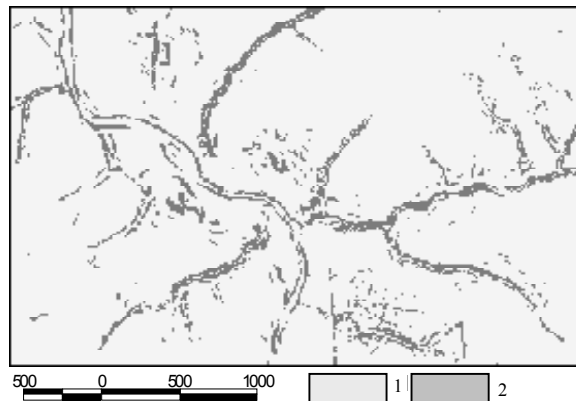


Рис. 3. Розподіл зон змивання (1) та акумуляції (2), розрахований за моделлю USPED.

Складною проблемою в разі моделювання поширеності та інтенсивності змивання є визначення відносної важливості обох обмежувальних факторів змивання у кожному конкретному пункті, що потребує визначення кількісних співвідношень між трьома змінними: віддільною здатністю опадів та схилового потоку, транспортувальною здатністю потоку та насиченістю потоку наносами, яку визначає співвідношення між змиванням та акумуляцією вище по току потоку. Як тимчасове вирішення, можна запропонувати для значень  $ED$ , обчислених за моделлю USPED, порогову величину, яка визначає поширення зон акумуляції (для рис. 3 таким порогом обрано 0); відповідно, для виділених таким способом зон змивання його кількісне значення обчислюють за моделлю RUSLE.

1. Гудзон Н. Охрана почвы и борьба с эрозией / Пер. с англ. – М.: Колос, 1974.
2. Ковальчук І.П. Регіональний еколого-геоморфологічний аналіз. – Львів: Ін-т українознавства, 1997.
3. Mitasova H., Brown W. Using soil erosion modeling for improved conservation planning: a GIS-based tutorial // Web-ресурс: <http://skagit.meas.ncsu.edu/~helena/gmslab/reports/CerlErosionTutorial/denix/default.htm>.
4. Mitasova H., Hofierka J., Zlocha M., Iverson R. Modeling topographic potential for erosion and deposition using GIS // Int. J. of Geographical Information Science. – 1996. – Vol. 10(5). – P. 629-641.
5. Pistocchi A., Cassani G., Zani O. Use of the USPED model for mapping soil erosion and managing best land conservation practices // Integrated assessment and decision support, proceedings of the first biennial meeting of the international environmental modelling and software society. – 2002. – Vol. 3. – P. 163-169.
6. Renard K.G., Foster G.R., Weesies G.A. et al. Predicting soil erosion by water. a guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE) // USDA Agricultural Handbook N. 703. – Washington D.C.: US Department of Agriculture, 1997.
7. Wischmeier W.H., Smith D.D. Predicting rainfall erosion losses, a guide to conservation planning // USDA Agriculture Handbook N 537. – Washington D.C.: US Department of Agriculture, 1978.

### GEOINFORMATION MODELING OF THE SLOPE EROSION PROCESS

**O. Mkrtychyan**

*Ivan Franko National University of Lviv,  
Doroshenko Str., 41, UA – 79 000 Lviv, Ukraine*

The paper considers the application of the quantitative models to predict the intensity and the spatial pattern of the sheet erosion. An analysis of the previous studies showed the RUSLE and USPED models to be appropriate for the task. Both models take into account various factors determining the soil loss, including the rainfall intensity, topography, soil, vegetation cover and the prevention practices, but rely on different fundamental assumptions. The models were implemented for the test area in upper Dnister basin (Ukrainian Carpathians) using ARC/INFO software.

*Key words:* sheet erosion, GIS, geoinformation modeling, digital elevation model.

Стаття надійшла до редколегії 26.02.2004  
Прийнята до друку 18.03.2004