



МАТЕМАТИКО-КАРТОГРАФІЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВОДНОЇ ЕРОЗІЇ ҐРУНТІВ НА ОСНОВІ КОМБІНОВАНОГО УНІВЕРСАЛЬНОГО РІВНЯННЯ ВТРАТ ҐРУНТУ

На основе детального анализа основных составляющих водно-эрозионного процесса предложено адекватную модель водной эрозии почв CUSLE. Практическую апробацию модели осуществлено в процессе комплексных мониторинговых исследований территории регионального геостационара Полесского филиала Института почвоведения и агрохимии имени А. Н. Соколовского в с. Забороль Луцкого района Волынской области.

On the basis of detailed analysis of the main factors of water-erosion process, an adequate model of water erosion CUSLE are proposed. Practical testing of the model was implemented in the process of complex monitoring researches of the territory of the Polissia Branch of Research Sokolovskyi-Institute of Soil Science and Agrochemistry (Volynska oblast, Lutskiy rayon, Zaborol village).

Постановка проблеми. Охорона та відтворення родючості ґрунтів, їх захист від забруднення і деградації є одними із першочергових завдань аграріїв. Динаміка змін якісних показників ґрунтів засвідчує стійку тенденцію до зниження їх родючості та погіршення загальної екологічної ситуації і вимагає проведення комплексних моніторингових досліджень як на регіональному, так і на загальнонаціональному рівнях [1]. Проведення таких досліджень вимагає опрацювання і детального аналізу значної за обсягом різнопланової геопросторової інформації та побудови математико-картографічних моделей з метою прийняття ефективних управлінських рішень [2].

Моделювання процесу водної ерозії ґрунтів має на меті розгляд складної реальної системи з величезною кількістю параметрів і зв'язків. Проблема дослідження в тому, що воно обмежене можливостями традиційних аналітичних методів дослідження математичних моделей. Моделювання складних систем – досить трудомісткий процес і найчастіше воно не виправдовує витраченого на це часу. Застосування правильно вивірених емпіричних рівнянь нерідко дозволяє отримувати точніші результати, а до того ж, вони не вимагають проведення детального аналізу. За умов адекватності отриманої моделі подібне спрощення в рамках великої проблеми є цілком виправданим.

В Україні сьогодні актуальним завданням є пошук надійних і простих методів розрахунку середніх багаторічних втрат ґрунту, викликаних дощовими і зливовими опадами. Складність його вирішення пояснюється, з одного боку, складністю ерозійних процесів, а з іншого, – відсутністю даних багаторічних спостережень за об'ємами змитого ґрунту.

Зв'язок теми дослідження із важливими науковими і практичними завданнями. Починаючи з 1995 р., науковці Східноєвропейського національного університету імені Лесі Українки виконують комплексні регіональні моніторингові дослідження ерозійних процесів у ґрунтах Волинської височини. Ці дослідження проводяться в рамках держбюджетної теми 0111U002146 "Дослідження сучасного стану та розробка засобами ГІС-технологій і РЕМ-мікроскопії засад раціонального землекористування ерозійно-деградованих земель

© П. П. Король, В. У. Волошин, О. В. Фесюк, 2013

Волинської височини".

Аналіз останніх досліджень та публікацій, що стосуються вирішення проблеми. Емпіричні рівняння ерозійних втрат ґрунту, зокрема рівняння, запропоновані у працях [4-7], обмежуються рамками розгляду процесів ерозії на схилі. Вони не враховують перерозподіл наносів уздовж схилу і не призначені для оцінювання масштабів виносу наносів у гідрографічну мережу. Та і в цьому питанні існує величезний розрив між об'ємами змитого ґрунту, що вимірюється на стокових майданчиках або розраховується з використанням математичних моделей змиву, і стокових наносів, що вимірюється в гідрометричних створах річкових водозборів.

Недоліки емпіричних рівнянь спричинили розробку більш складних моделей, які б описували поверхневий стік, захоплення ґрунтових фракцій та перенесення їх потоками води. До таких належать моделі CREAMS, EPIC, WEPP тощо. Для широкого застосування такі моделі непридатні, оскільки вони побудовані на емпіричних залежностях, використання яких потребує попереднього обґрунтування, а початкові дані – агломерації специфічної інформації.

Останнім часом у багатьох країнах світу широко застосовуються емпіричне рівняння втрат ґрунту USLE [9,10] і його модифікація RUSLE [8]. Однак вони потребують значного об'єму даних спостережень. В Україні таких даних фактично немає, що зумовлює необхідність побудови адекватних емпіричних рівнянь і верифікації кондиційності рівнянь, адаптованих для інших кліматичних умов.

Проаналізувавши описані вище підходи до математичного моделювання ерозійних процесів, автори пропонують адекватну модель обчислення водної ерозії ґрунтів – комбіноване універсальне рівняння втрат ґрунту CUSLE (Combined Universal Soil Loss Equation), пристосоване до умов Волинської височини. Функціонування даної моделі базується на спрощених методах розрахунку, що ґрунтуються на напівемпіричних співвідношеннях, з акцентом на перевірку співвідносності результатів обчислювальних процедур і даних спостережень.

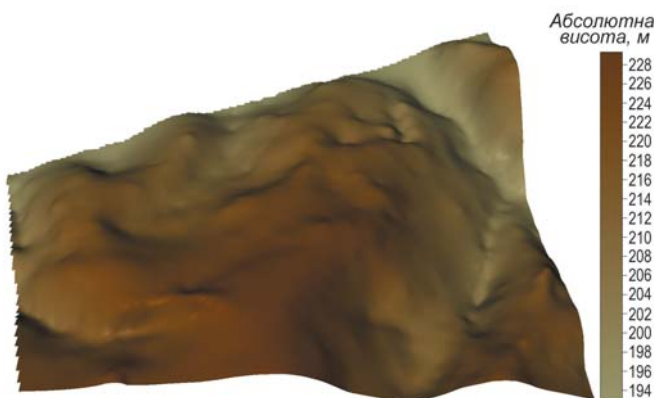
Виклад основного матеріалу. Основними складовими математичної моделі міжрічкової (схилової, площинної) водної ерозії ґрунтів є *ерозійний потенціал опадів, ступінь еродованості ґрунту, характер рельєфу, особливості використання земель*

та ефективність застосування протиерозійних агротехнічних заходів. Кожен із цих чинників може бути представлений деякою аналітичною функцією або емпіричним виразом.

Складник рельєфу. Рельєф – головний чинник перерозподілу сонячної радіації і опадів залежно від експозиції та крутизни схилів, що істотно впливає на водний, тепловий, речовинний, окисно-відновний та сольовий режими території і таким чином визначає динаміку розвитку процесів водної ерозії.

Для оцінювання просторової диференціації та динаміки розвитку процесів водної ерозії ґрунтового покриву території регіонального геостаціонару в с. Забороль Луцького району Волинської області на основі матеріалів тахеометричного знімання масштабу 1:2 000 побудовано 3D-модель місцевості. Як планово-висотну основу для виконання тахеометричного знімання використано робочу основу, розвинуту пунктами полігонометрії IV класу і 1 розряду, а також пунктами нівелювання III класу. В результаті такого знімання отримано понад 16 000 пікетів.

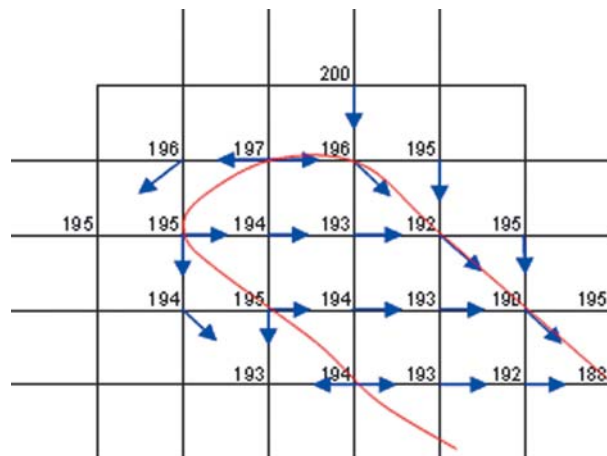
У програмному середовищі Surfer фірми "Golden Software" виконано тривимірне моделювання місцевості. Сіткова модель рельєфу (grid-модель) регіонального геостаціонару містить 401×601 комірок розміром 5×5 м з амплітудою висот від 192 до 248 м, а для grid-моделі дослідної ділянки відповідні показники становлять 171×191 комірку та 192 і 230 м (мал. 1).



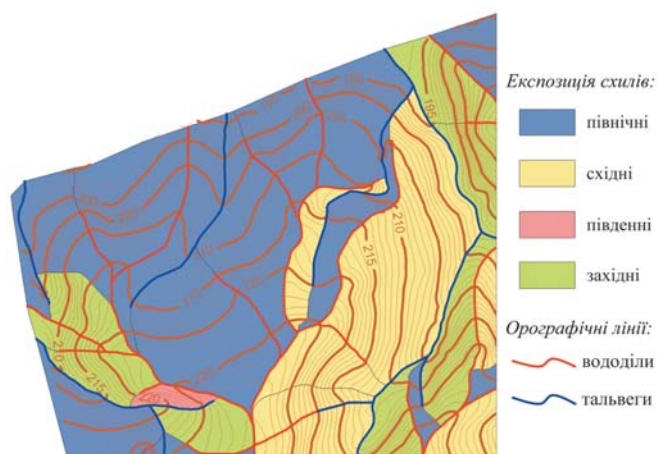
Мал. 1. 3D-модель рельєфу дослідної ділянки

На основі аналізу grid-моделі рельєфу дослідної ділянки у напівавтоматичному режимі виділено систему орографічних ліній вододілів і тальвегів, алгоритм пошуку яких базується на визначенні точок локальних екстремумів grid-моделі за двома ортогональними напрямками з використанням тривузлової маски пошуку. За алгоритмом побудовано grid-модель точок локальних екстремумів тривимірної моделі рельєфу. Наступним кроком роботи алгоритму є виділення елементарних схилів, що базується на визначенні напрямку, крутизни та експозиції ліній стоку. Напрямок ліній стоку визначається величиною максимальної крутизни для сусідніх вузлів grid-моделі (мал. 2).

Визначення ступеня впливу складника рельєфу на потужність водно-ерозійних процесів передбачає виділення систем орографічних ліній та елементарних схилів (мал. 3). В результаті експериментальних досліджень на дослідній ділянці виді-



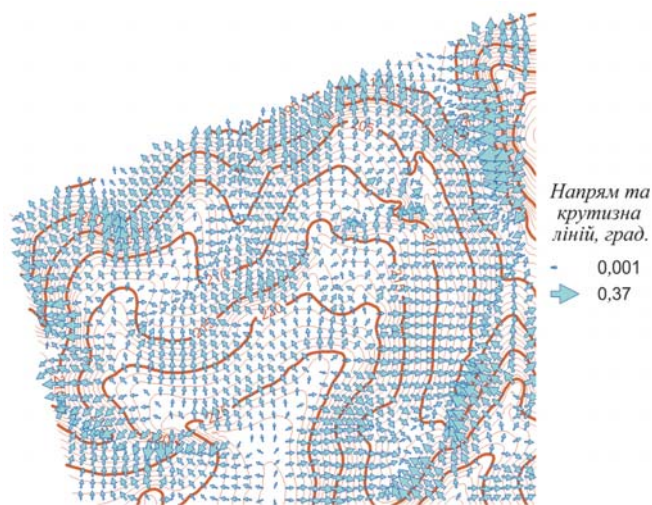
Мал. 2. Приклад роботи алгоритму при виявленні елементарного схилу



Мал. 3. Експозиція елементарних схилів дослідної ділянки

лено 31 елементарний схил.

Як відомо, інтенсивність водно-ерозійних процесів залежить від експозиції та крутизни схилів. Максимальні об'єми змиву характерні для південних схилів крутизною 7-12°, частка яких у межах даної дослідної ділянки становить 4 % (мал. 4).



Мал. 4. Напрямок та крутизна ліній стоку дослідної ділянки



У рамках концепції площинного змиву ґрунту складник рельєфу розглядається як результат сукупного впливу двох його компонентів: довжини та крутизни елементарних схилів.

Комбіноване універсальне рівняння CUSLE для розрахунку об'ємів змитого ґрунту має вигляд:

$$A = RKLSCP, \quad (1)$$

де A – середній багаторічний об'єм змиву ґрунту в розрахунку на одиницю площі ($\text{т}\cdot\text{га}^{-1}\cdot\text{рік}^{-1}$); R – складник ерозійного потенціалу опадів або ерозійний індекс опадів ($\text{т}\cdot\text{га}^{-1}\cdot\text{рік}^{-1}$); K – складник еродованості ґрунту – відношення втрат ґрунту в розрахунку на одиничний індекс еродованості для даного типу ґрунту (стандартний схил довжиною 72,6 футів (22,1 м), крутизною 9 %, площею 1/100 акра (40,5 м²) за умов неперервного застосування протиерозійних заходів при обробітку пару); L – складник довжини схилу – відношення втрат ґрунту на даному схилі до втрат ґрунту на схилі довжиною 72,6 футів за інших рівних умов; S – складник крутизни схилу – відношення втрат ґрунту на даному схилі до втрат ґрунту на схилі крутизною 9 % за інших рівних умов; C – складник агрофону (відношення втрат ґрунту на даному схилі з певним рослинним покривом і типом обробітку до втрат ґрунту на ідентичному схилі, що знаходиться під паром); P – складник протиерозійних заходів – відношення втрат ґрунту на даному схилі за умови антропогенного протиерозійного впливу до втрат ґрунту на ідентичному схилі за умови невтручання людини.

Складник ерозійного потенціалу опадів R . Дощова (водна) ерозія є стохастичним процесом, що зумовлений в основному випадковим характером випадання дощів, для опису яких використовуються різні розподіли ймовірностей. Виходячи з цього, зростання кількості параметрів дощу в моделі значно ускладнює опис цього типу опадів.

Цей складник або, як його ще називають, зливовий ерозійний індекс, залежить від величини та інтенсивності зливових дощів, що зумовлюють винесення ґрунтового матеріалу струменями водного потоку. Даний показник визначається двома параметрами – кінетичною енергією дощу E та його 30-хвилинною інтенсивністю I_{30} .

Величина E суттєво впливає на інтенсивність водно-ерозійного процесу. Її можна розрахувати за такою залежністю [3]:

$$E = \sum_{j=1}^n [24,73 + 8,94 \lg(2,36I_j)h_j] \quad (2)$$

де E – кінетична енергія дощу ($\text{т}\cdot\text{м}/\text{га}$); I_j – інтенсивність дощу за j -й інтервал часу; h_j – висота шару опадів, що випали за цей час (мм); n – кількість інтервалів, протягом яких інтенсивність дощу залишалась незмінною.

Пошарове визначення кінетичної енергії дощу – робота трудомістка, тому замість формули (2) використовується рівняння регресії ерозійного потенціалу дощу R , яке включає добуток кількості опадів H (у міліметрах) на їх максимальну 30-хвилинну інтенсивність I_{30} [3]:

$$R = 0,258I_{30} - 0,149. \quad (3)$$

Показник I_{30} характеризує енергію дощу/зливи за період найбільшої 30-хвилинної інтенсивності,

що визначається безпосередньо із запису пловіограми. З цією метою для кожного дощу визначається максимальний шар опадів, що випали протягом будь-яких 30-ти хвилин. До розрахунку приймаються дощі з шаром 10 мм і більше, оскільки менші опади не викликають помітного змиву.

Для Волинської височини індекс I_{30} розраховується так:

$$I_{30} = 0,121 \exp(0,0529H) \quad (4)$$

У ході комплексних моніторингових досліджень ми провели аналіз результатів гідрометеорологічних спостережень по метеостанції Луцьк за 2002-2011 рр. Проаналізувавши кількість та інтенсивність зливових опадів і ґрунтуючись на аналітичних виразах (3) і (4), визначили числові значення складника ерозійної здатності опадів за кожен рік спостережень та обчислили середній багаторічний ерозійний індекс дощу (табл. 1).

Таблиця 1. Значення ерозійного індексу дощу для Волинської височини (за даними метеостанції Луцьк)

Роки спостереження	Значення R -фактора		Відсоток зливових дощів від їх загальної кількості
	зливових дощів	загальне	
2002	4,750	8,180	58,07
2003	4,198	6,930	60,58
2004	1,006	3,137	32,07
2005	2,295	4,093	56,07
2006	2,261	7,437	30,40
2007	5,216	8,609	60,59
2008	4,358	7,229	60,28
2009	6,690	10,676	62,66
2010	1,723	3,517	48,99
2011	3,622	7,308	49,56
Середнє багаторічне	3,612	6,712	51,93

Через обмежений обсяг даних державної статистики про гідрометеорологічні спостереження та регіональний характер досліджень значення R прийняли постійним для всіх південних територій Волинської області.

Ерозійна потужність зливових опадів, що визначається їх енергетичною характеристикою, на території Волинської височини має певні особливості й зумовлюється головним чином впливом рельєфу.

Складник еродованості ґрунту K є комплексною характеристикою основних властивостей ґрунту, що визначають здатність ґрунтових часток (фракцій) відокремлюватись під впливом дощу та виноситись водними потоками.

Вплив дощу на відрив частинок ґрунту, на транспортну здатність струмків та на інфільтрацію ґрунтів зумовлює сильну ерозійну дію води, що стікає зі схилів. Зливи завдають великої шкоди ґрунту, спричинюючи його значний змив, особливо на полях під чорним паром. Діючи силою удару крапель на всю поверхню землі, вони зумовлюють вимивання насамперед дрібного пилу (часточок розміром 0,005-0,001 мм) і мулу (менше 0,001 мм), в яких зосереджений найцінніший компонент ґрунту.

При визначенні показника еродованості ґрунту враховуються основні групи його ознак та властивостей, зокрема гранулометричний склад, вміст органічної речовини, структура, а також пористість та

водопроникність. Визначення базується на встановлених відношеннях і виражається у вигляді добутку експоненціальних залежностей типу

$$K = [0,2 + 0,3 \exp(-0,0256SAN(1 - SIL/100))] \times [SIL/(CLA + SIL)]^{0,3} \cdot [0,25C/(C + e^{3,72-2,95C})] \times [1 - 0,7SN_1/(SN_1 + e^{-5,51+22,95SN_1})] e^{-0,3ROK}, \quad (5)$$

де SAN – вміст піску, %; SIL – вміст мулу, %; CLA – вміст глини, %; C – вміст гумусу, %; ROK – вміст великих фракцій у ґрунті, %; $SN_1 = 1 - SAN/100$.

Оскільки значення K за формулою (5) обчислюється у тоннах на акр, тому для стандартизації розмірності даного показника застосовується коефіцієнт переходу в тонни на гектар 7,7.

Для середньотекстурованих, слабо- або середньоагрегованих ґрунтів Волинської височини коефіцієнт еродованості ґрунту доцільно розраховувати за спрощеною формулою:

$$K = 2,1 \cdot 10^{-4} (12 - a) M^{1,14} + (3,25(St - 2)) + (2,5(Pt - 3)), \quad (6)$$

де a – вміст органічної речовини у ґрунті; St – код ґрунту за структурою (табл. 2); Pt – код ґрунту за водопроникністю (табл. 3); $M = \text{Silt} / (\text{Silt} + \text{Sand})$ – параметр розміру частинок ґрунту; Silt – вміст мулу, %; Sand – вміст піску, %.

Апробацію методики визначення коефіцієнтів еродованості ґрунту здійснено на дослідній ділянці регіонального геостационару в с. Забороль (мал. 1), що за складом ґрунтів є типовою для об'єкта дослідження.

Таблиця 2. Код ґрунту за структурою

Код	Structure type	Тип структури
1	Very fine granular	Порохувата
2	Fine granular	Зерниста
3	Medium or coarse granular	Грубозерниста та порохувата
4	Blocky, platy or massive	Масивна, брильовата, пластинчаста

Таблиця 3. Код ґрунту за водопроникністю

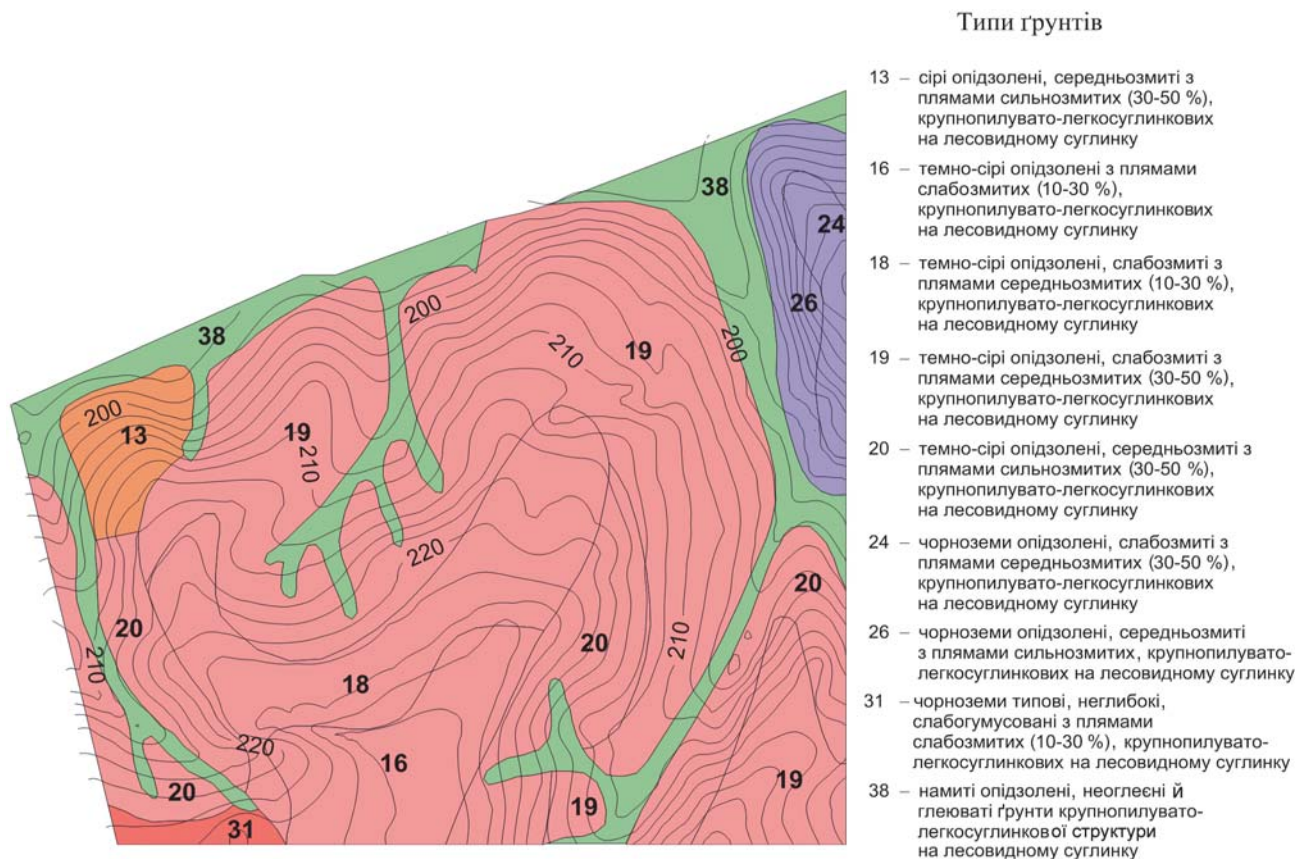
Код	Waterpenetrate type	Тип водопроникності	Швидкість водопроникнення, мм/хв
1	Rapid	Швидка	більше 0,5
2	Moderate to rapid	Помірно швидка	0,1-0,5
3	Moderate	Помірна	0,02-0,1
4	Slow to moderate	Повільно помірна	0,005-0,02
5	Slow	Повільна	0,001-0,005
6	Very slow	Дуже повільна	менше 0,001

На мал. 5 показано, що в структурі ґрунтового покриву дослідної ділянки переважають темно-сірі опідзолени, слабо- і середньозмиті крупнопилувато-легкосуглинкові ґрунти на лесовидному суглинку.

На основі даних комплексних ґрунтових обстежень, що проведені Волинським центром охорони родючості ґрунтів та якості продукції "Облдержродючість" (VIII тур, 2004 р.), розраховано показники еродованості для різних типів ґрунтів (табл. 4).

Картограму просторового розподілу складника еродованості ґрунту K передає мал. 6.

Складник довжини схилу L . Оскільки об'єм змитого ґрунту з елементарного схилу прямо пропорційний довжині лінії стоку, то для обчислення

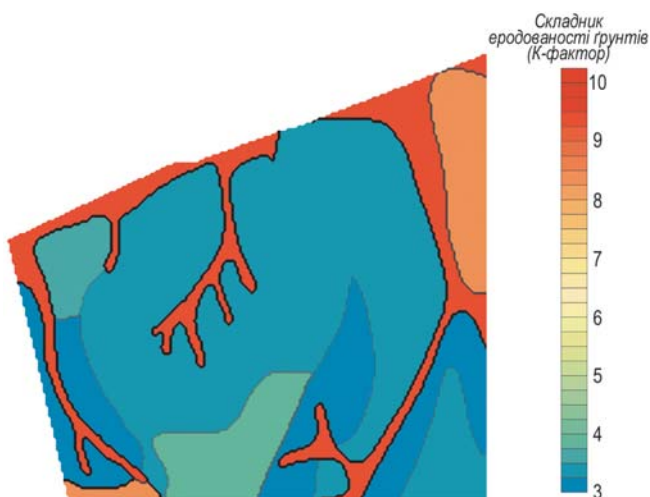


Мал. 5. Ґрунтовий покрив дослідної ділянки



Таблиця 4. Розраховані значення показника еродованості ґрунту для дослідної ділянки

Шифр ґрунту	<i>a</i> , %	Sand, %	Silt, %	<i>St</i>	<i>Pt</i>	<i>M</i>	<i>K</i>
13	1,2	13,6	17,1	3	2	524,970	3,612
16	1,5	12,4	18,7	3	2	581,570	3,876
18	1,7	5,8	19,8	3	2	506,880	3,372
19	1,7	5,9	19,5	3	2	495,300	3,304
20	1,4	2,8	19,9	3	2	451,730	3,116
24	1,7	4,2	33,7	3	2	1277,230	8,270
26	1,2	4,7	32,8	3	2	1230,000	8,303
31	2,1	3,9	34,5	3	2	1324,800	8,285
38	1,9	9,4	22,1	3	4	696,150	9,442



Мал. 6. Просторовий розподіл складника еродованості ґрунтів дослідної ділянки

кількісного значення цього складника використовують таку залежність:

$$L = \left(\frac{\lambda}{22,13} \right)^m, \quad (7)$$

де λ – довжина горизонтального прокладання схилу в метрах; 22,13 – довжина одиничного схилу в метрах; m – показник степеня, що залежить від довжини схилу.

На практиці використовуються різні методики визначення показника степеня m з виразу (7), однак справжнє уявлення про масштаби впливу протяжності лінії стоку на об'єм змитого ґрунту зі схилу можна отримати лише з численних експериментальних досліджень, що передбачають паралельні визначення крутизни θ цього схилу з виразів

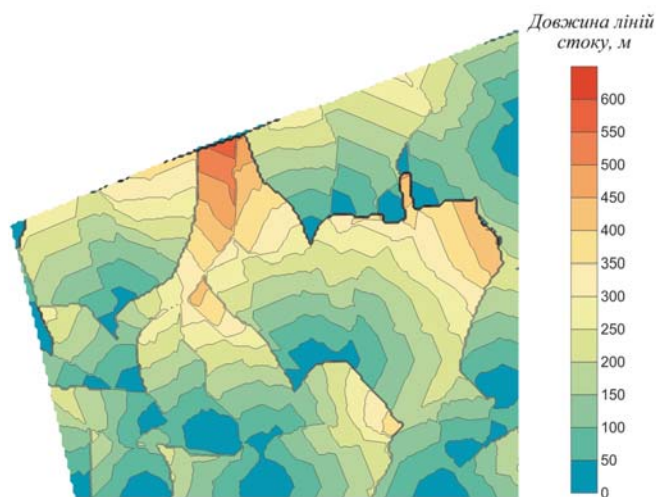
$$m = \frac{\varepsilon}{1 + \varepsilon}; \quad (8)$$

$$\varepsilon = \frac{\sin \theta}{0,0896(3 \sin^{0,8} \theta + 0,56)}. \quad (9)$$

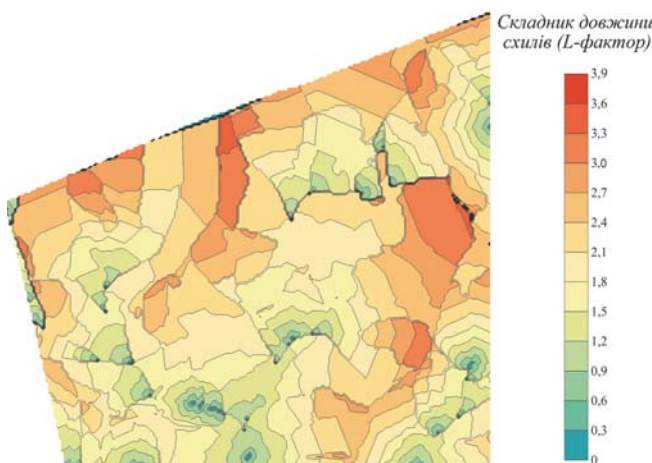
Щоб спростити обчислення за формулами (7-9), було використано інтервальні оцінки для елементарних схилів різної крутизни (0,5 – для схилів крутизною $>5^\circ$; 0,4 – крутизною $3-5^\circ$; 0,3 – крутизною $1-3^\circ$; 0,2 – для схилів крутизною $<1^\circ$).

Просторовий розподіл довжин ліній стоку в розрізі елементарних схилів і дослідної ділянки в цілому показано на мал. 7, а розподіл числових значень складника L – на мал. 8.

Складник крутизни схилу S . На верхніх ділянках схилів крутизною до 2° з опуклим профілем



Мал. 7. Розподіл елементарних схилів за довжиною ліній стоку



Мал. 8. Картохема прояву складника L на дослідній ділянці

змиву ґрунту не спостерігається, однак із збільшенням крутизни вниз по схилу інтенсивність змиву підвищується. Зокрема, виявлено, що максимальна інтенсивність водно-ерозійних процесів спостерігається на коротких схилах завдовжки 100-200 м, середня крутизна яких досягає найвищих значень – $2,8^\circ-3^\circ$. Збільшення довжин схилів до 700 м викликає зменшення їх середньої крутизни до $1,50-2,08^\circ$, що позначається на зниженні еродованості ґрунтового покриву.

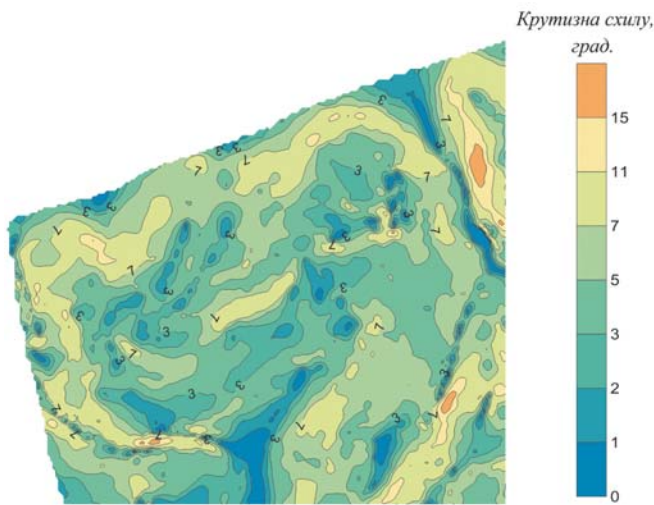
Показник S залежить від абсолютних значень нахилу поверхні:

$$S = \begin{cases} 0,8 \sin \theta + 0,03 & \text{при } i \leq 0,09; \\ 16,8 \sin \theta - 0,5 & \text{при } i > 0,09, \end{cases} \quad (10)$$

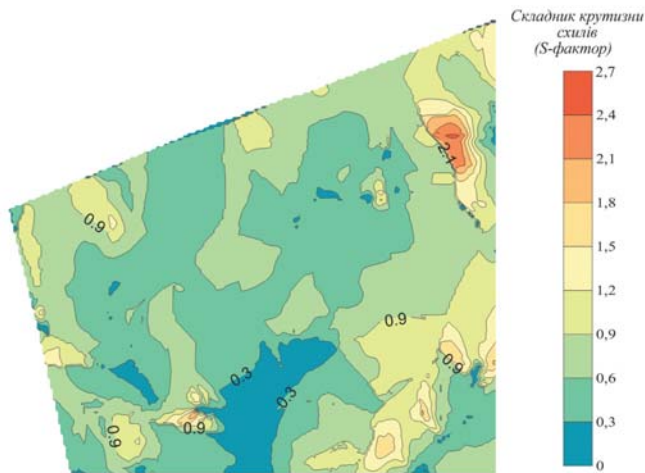
де θ – крутизна схилу в градусах; i – градієнт крутизни.

Просторовий розподіл крутизни ліній стоку в розрізі елементарних схилів і дослідної ділянки в цілому показано на мал. 9, а такий самий розподіл числових значень складника S – на мал. 10.

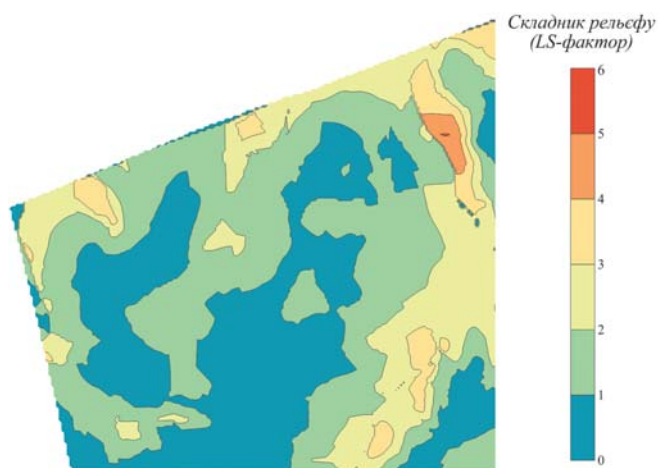
На основі розрахованих значень чинників довжини і крутизни елементарних схилів за допомогою мультиплікативного методу отримано картохему прояву складника рельєфу дослідної ділянки (мал. 11).



Мал. 9. Розподіл елементарних схилів за критерієм крутизни ліній стоку



Мал. 10. Картошхема прояву складника крутизни схилів на дослідній ділянці



Мал. 11. Картошхема прояву складників L і S на дослідній ділянці

Складник агрофону С. Грунтозахисні властивості рослинного покриву і вид агротехніки визначають стійкість ґрунтів до змиву. Наявність рослинного покриву суттєво зменшує імовірність прояву водно-ерозійних процесів.

Таким чином, агрофон теж впливає на величину ерозійних втрат ґрунту. Цей показник обчислюється за групами культур із близькими ґрунтозахисними властивостями (озимі, ярі густопокривні, високостволові просапні, низькорослі просапні й багаторічні трави). Групи в свою чергу поділяються на підгрупи за способом обробітку ґрунту і типом агротехніки (відвальна, плоскорізна та індустріальна технології).

Залежно від типу рослинності для обчислення кількісних значень складника С використовують формулу

$$C = 0,8 \exp(-1,15CV) CE_{\min j} \exp(1 - \exp(-1,15CV)), \quad (11)$$

де CV – біомаса (коренева система і рослинність над ґрунтом); $CE_{\min j}$ – мінімальне значення коефіцієнта врожайності.

Однак обчислення за формулою (11) вимагають проведення спеціальних досліджень, тому для Волинської височини на основі багаторічних спостережень виведено коефіцієнти для кожного типу агрофону (табл. 5).

Таблиця 5. Значення С для різних типів агрофону

Агрофон	Значення
Пар чистий	1,00
Пар зайнятий (вико-овес)	0,50
Кукурудза на зелений корм	0,75
Кукурудза з соєю або горохом	0,50
Кукурудза на силос	0,60
Кукурудза на зерно	0,85
Цукрові буряки	0,85
Коренеплоди кормові	0,85
Соняшник	0,75
Картопля	0,75
Просо	0,50
Зернові ярі	0,50
Зернові озимі	0,30
Гречка	0,39
Горох	0,35
Горохова стерня	0,10
Багаторічні трави першого року	0,08
Багаторічні трави другого року	0,03
Багаторічні трави третього року	0,01
Луки	0,02
Пасовища та сіножаті	0,02
Ліс	0,001

Залежно від розмірів дослідної ділянки обирається оптимальна методика визначення типу агрофону (типу рослинності). На локальному рівні при дослідженні інтенсивності водноерозійних процесів у межах елементарних стокових майданчиків або системи елементарних схилів доцільно застосовувати методику безпосереднього польового спостереження, що передбачає виїзд на місцевість, а на регіональному або глобальному рівнях економічно ефективнішими є камеральні методи візуального дешифрування матеріалів дистанційного зондування (аеро- або космознімків) за прямими і непрямыми ознаками.

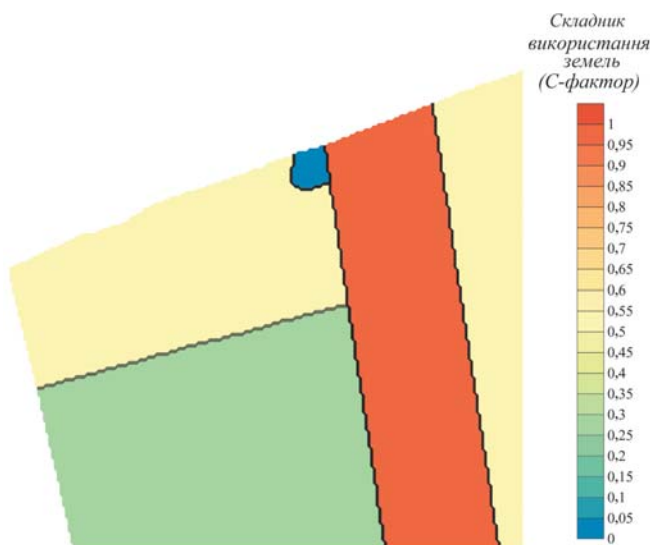
Для визначення типу агрофону дослідної ділянки регіонального геостационару в с. Забороль нами використано фрагмент космічного знімка (мал. 12) з інтернет-ресурсу <http://maps.google.com.ua>.

Унаслідок дешифрування фрагмента на основі прямих дешифрувальних ознак – форми і розмірів контурів, а також структури зображення, було встановлено, що в структурі агрофону ділянки чітко виділяються три типи сільськогосподарських угідь (пар, посіви озимої та ярої пшениці) й селітебна територія (садиба).



Мал. 12. Фрагмент космічного знімка дослідної ділянки

За результатами дешифрування з урахуванням показників різного агрофону побудовано grid-модель прояву цього складника (мал. 13).



Мал. 13. Картошка прояву складника С на дослідній ділянці

Складник протиерозійних заходів P. З метою мінімізації водної ерозії ґрунтів на землях сільськогосподарського призначення використовується низка протиерозійних заходів, планування яких передбачає використання результатів польових досліджень або обчислень за емпіричними формулами.

Найбільш дієвим протиерозійним заходом боротьби з водною ерозією є оранка землі поперек схилу, що створює своєрідний мікрорельєф. Гребені, борозни і рядки сільськогосподарських культур стримують поверхневий стік, сприяють проникненню води у ґрунт і підвищують запаси вологи в орному горизонті. Однак велика крутизна схилу нівелює ефективність обробітку ґрунту поперек схилу.

У такому випадку продуктивним засобом регулювання поверхневого стоку є глибока оранка, що сприяє кращому вбиранню вологи ґрунтом, зменшує поверхневий стік і таким чином послаблює руйнівну дію води. Однак суцільна глибока оранка є надто затратна, тому для ефективної боротьби з водною ерозією використовують метод смугового глибокого роз-

пушування ґрунту, що значно сповільнює розвиток процесів площинного змиву і підвищує врожайність сільськогосподарських культур. Ефективний метод затримання талих і зливових вод – щільовання нарізкою поперек схилів борозен глибиною 40-50 см з відстанню між ними 70-180 см.

Складник P відображує вплив протиерозійних заходів (контурний обробіток на схилах різної крутизни, оранка поперек схилів, терасування, гребенювання, захисні лісосмуги, дренаж тощо) на інтенсивність водноерозійних процесів, однак він не враховує такі види сільськогосподарської діяльності, як оранка, мульчування, внесення добрив.

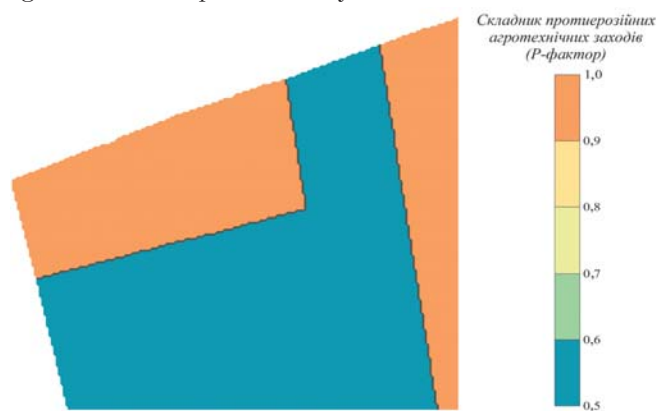
За кількісний показник ефективності протиерозійних заходів обрано адаптований для умов Волинської височини коефіцієнт зниження ерозії P, який виражає відношення об'ємів втрат ґрунту до і після проведення заходів (табл. 6).

Таблиця 6. Значення складника P для різних типів протиерозійних заходів

Тип заходу	Значення
Без проведення протиерозійних заходів	1,00
Контурний обробіток при крутизні схилу 0-1°	0,60
Контурний обробіток при крутизні схилу 2-5°	0,50
Контурний обробіток при крутизні схилу 6-7°	0,60
Контурний обробіток при крутизні схилу 8-9°	0,70
Контурний обробіток при крутизні схилу 10-11°	0,80
Контурний обробіток при крутизні схилу 12-14°	0,90
Рівневі сходові тераси	0,14
Оранка поперек схилів	0,50
Обернені до схилу сходові тераси	0,05
Позасхилкові сходові тераси	0,35
Рівневі затримувальні сходові тераси	0,01
Зв'язані гребені	0,1-0,2
Мульчування	0,60
Гребенювання	0,35
Зонування	0,25

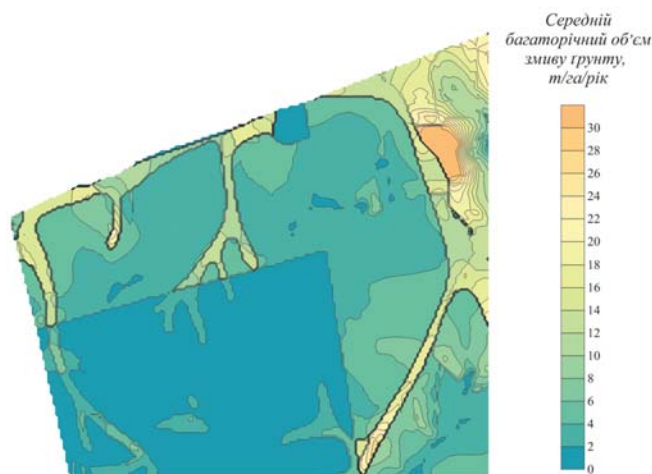
У результаті дешифрування фрагмента космічного знімка дослідної ділянки регіонального геостационару в с. Забороль (див. мал. 12) за прямими дешифрувальними ознаками – структурою і текстурою зображення було встановлено, що смугаста текстура угідь зумовлена застосуванням такого протиерозійного заходу, як оранка поперек схилів, а однорідна – відсутністю проведення будь-яких протиерозійних заходів.

На основі результатів візуального дешифрування і відповідно до значень складника протиерозійних заходів різних типів (див. табл. 6) побудовано grid-модель, представлену на мал. 14.



Мал. 14. Картошка прояву складника P на дослідній ділянці

На останньому етапі дослідження шляхом оверлею модельних складових побудовано мультиплікативну математико-картографічну модель середніх багаторічних об'ємів змитого ґрунту дослідної ділянки (мал. 15). Дослідження показало, що понад 60 % площі ділянки характеризуються низькими показниками змиву ґрунту (до 8 т/га/рік). Високі показники змиву (понад 24 т/га/рік) характерні лише для 12 % території регіонального геостационару Волинської філії Інституту ґрунтознавства та агрохімії імені О. Н. Соколовського в с. Забороль Луцького району Волинської області.



Мал. 15. Картохема середніх багаторічних об'ємів змитого ґрунту А на дослідній ділянці

Висновки. В результаті проведених досліджень розроблено, реалізовано та верифіковано модель водної ерозії ґрунтів на основі комбінованого універсального рівняння втрат ґрунту CUSLE, що адаптована до природних умов Волинської височини. Модель базується на спрощених методах розрахунку, які в свою чергу ґрунтуються на напівемпіричних співвідношеннях з акцентом на перевірку співвідносності результатів обчислювальних експериментів і даних польових спостережень. Запропонована модель дозволяє проводити дослідження на різних територіальних рівнях, мінімізує

обсяги польових робіт і потребує мінімальної кількості вхідних даних.

Література

1. *Кривов, В.М.* Екологічно безпечне землекористування Лісостепу України. Проблема охорони ґрунтів / В.М. Кривов. – К.: Урожай, 2006. – 304 с.
2. *Куценко, М.В.* Про створення автоматизованої системи геоінформаційного забезпечення універсального рівняння витрат ґрунту (USLE) / М.В. Куценко, О.В. Круглов // Геоінформатика. – 2010. – № 4. – С. 85-89.
3. *Ларионов, Г.А.* Эрозия и дефляция почв: основные закономерности и количественные оценки: монография / Г.А. Ларионов. – М.: Изд-во МГУ, 1993. – 200 с.
4. *Светличный, А.А.* Эрозиоведение: теоретические и прикладные аспекты: монография / А.А. Светличный, С.Г. Черный, Г.И. Швец. – Сумы: Университет. кн., 2004. – 410 с.
5. *Срибный, И.К.* Среднегодовой сток воды и смыл почвы со склонов / И.К. Срибный // Водохозяйственное строительство на малых реках: сб. науч. тр. – К.: Будівельник, 1977. – С. 145-147.
6. *Сурмач, Г.П.* Рельефообразование, формирование лесостепи, современная эрозия и противоэрозионные мероприятия: монография / Г.П. Сурмач. – Волгоград: Изд-во ВолГУ, 1992. – 175 с.
7. *Швец, Г.И.* Формирование водной эрозии, стока наносов и их оценка: монография / Г.И. Швец. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1974. – 184 с.
8. *Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE) = Прогнозування водної ерозії ґрунтів: управління природоохоронною діяльністю на основі уточненого універсального рівняння втрат ґрунту / K.G. Renard, G.R. Foster, G.A. Weesies [at al.] // United States Department of Agriculture (USDA). Agriculture Handbook. – 1997. – No. 703. – 404 p.*
9. *Wischmeier, W.H.* Evaluation of factors in the soil-loss equation / W.H. Wischmeier, D.D. Smith, R.E. Uhland // Agricultural Engineering. – 1958. – No. 39. – P. 458-462.
10. *Wischmeier, W.H.* Predicting rainfall erosion losses / W.H. Wischmeier, D.D. Smith // United States Department of Agriculture (USDA). Agriculture Handbook. – 1978. – No. 537. – 65 p.

Надійшла 01.10.13