

УДК 631.459.2

Мисько К. А.

Київський національний університет
імені Тараса Шевченка

ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ МОДЕЛЮВАННЯ ПРИ ВИВЧЕННІ ЕРОЗІЇ ҐРУНТУ

Ключові слова: ерозія, моделювання ерозії ґрунту, модель ерозії ґрунту, модель USLE

Актуальність теми. Водна ерозія як частина процесу денудації, що складається з руйнування, переміщення і відкладення частинок ґрунту і порід під дією дощу та поверхневого стоку (Г. І. Швєбс, 1974), у багатьох країнах світу набула такого масштабного поширення, що її негативні наслідки, насамперед, на сільськогосподарських землях, у даний час представляють собою економічну і екологічну проблему. До таких країн належить і Україна, в якій станом на 2013 р. понад 30 % земель охоплені ерозійними процесами [1].

Вирішення проблеми водної ерозії ґрунтів і, отже, стійкого збалансованого розвитку в багатьох країнах світу, в тому числі і в нашій, неможливе без її адекватної моделі, методики розрахунку і прогнозу інтенсивності ерозійних втрат [10].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз моделей ерозії наведено в роботах М. С. Кузнєцова, О. Г. Рожкова, Г. П. Глазунова О. О. Світличного, С. Г. Чорного, Г. І. Швєбса [4; 8–10]. Сьогодні найчастіше при вивченні ерозії ґрунту використовують рівняння втрат USLE та його детальніший варіант, відомий під назвою RUSLE [14; 15].

Виклад основного матеріалу. Моделювання є одним з найбільш важливих інструментів вивчення ерозійних процесів, визначення та прогнозування їх інтенсивності, оцінювання ерозійної небезпеки земель, а також планування заходів з охорони ґрунтів. Значний розвиток і популярність моделювання процесів ерозії можна пояснити тим, що воно, як метод наукового пізнання, має перевагу над іншими. Це порівняно невисока вартість робіт, можливість коректного дослідження складних процесів (яким є ерозія), невисока трудомісткість і зручність виконання робіт.

Моделювання – один з основних методів пізнання, при якому вивчення реальної системи або процесу ведеться через вивчення його замітника – спрощеної копії, схеми, зразка або аналога, який і називається моделлю. Одержані в процесі такого вивчення результати за певними правилами переносяться на реальний об'єкт.

У випадку моделювання ерозійних процесів, реальний механізм ерозії та вплив на неї зовнішніх факторів замінюються на їх фізичні, математичні і знакові аналоги, які і підлягають вивченню.

Розрізняють фізичне, математичне та імітаційне моделювання ерозії.

У основі **фізичного моделювання** ерозії лежить фізична подібність ерозійних процесів і їх модельних аналогів. Тобто, фізичні явища і закономірності, що лежать в основі відповідної моделі, мають бути подібними до фізичних явищ і закономірностей, які лежать в основі реальних ерозійних процесів. Фізичне моделювання ерозії передбачає здійснення наступних кроків: визначення та формулювання умов подібності на основі аналізу процесу ерозії; розроблення методики фізичного моделювання; виконання експериментальних робіт; аналіз експериментальних даних та виявлення закономірностей, механізмів і факторів ерозійних процесів; співставлення отриманих даних з натурними даними; оцінювання погрішності фізичного моделювання (Ц. Є. Мірцхулава, 2000) [7].

На сьогоднішній день накопичено значний досвід лабораторного та натурального фізичного моделювання, зокрема для дослідження ударної дії крапель дощу на ґрунт, процесів краплинної ерозії (ерозії розбризкування) і змиву ґрунту з використанням штучного дощування (І. С. Константинов, 1987; А. Б. Лавровський та ін., 1987; Ц. Є. Мірцхулава, 1970; В. В. Сластіхін, 1964; Ю. П. Сухановський, 2000; В. С. Федотов, 1980; Г. І. Швєбс, 1974; W. D. Ellison, 1944, 1947; R. S. Palmer, 1963), для дослідження протиерозійних властивостей ґрунтів з використанням гідравлічних лотків різної конструкції (В. Б. Гуссак, 1959; Ц. Є. Мірцхулава, 1970; М. С. Кузнєцов, 1981), методів штучного дощування (М. І. Ігошин, 1984; О. О. Світличний та ін., 2002; Г. І. Швєбс, 1974) та розмиву ґрунту горизонтальним струменем води з заданими характеристиками (Г. В. Бастраков, 1980) [7].

Математичне моделювання ерозії ґрунтується на використанні математичних виразів у якості заміника реального ерозійного процесу. Математичні моделі ерозії у формалізованому вигляді показують істотні з погляду поставленої мети взаємозв'язки між складовими частинами ерозійного процесу або між чинниками ерозії та відповідними ерозійними явищами. У наш час у різних країнах світу розроблені десятки математичних моделей, що використовуються або рекомендуються до використання для розрахунку інтенсивності ерозійного руйнування ґрунту. Велика частка з них належить до категорії емпіричних формул змиву ґрунту, отриманих на основі статистичної обробки даних спостережень за змивом ґрунту або на стаціонарних стокових майданчиках, або з використанням методу штучного дощування.

Загальним недоліком усіх емпіричних моделей є їх «прив'язка» лише до того регіону, де були проведені спостереження, у межах яких і отримані чисельні значення параметрів цих моделей. Тому їх застосування в інших природно-господарських умовах, відмінних від тих, для яких вони були розроблені, пов'язане з необхідністю проведення відповідного обґрунтування.

Емпіричні моделі можна поділити на формально-статистичні, отримані в результаті обробки емпіричних даних на основі формально-статистичного підходу з використанням апарату множинної регресії, і фізико-статистичні, які відрізняються від моделей першого рівня, насамперед, прагненням до щонайбільш повного врахування теоретичних знань про процес ерозії.

Найбільш відомою з формально-статистичних моделей в Україні є математико-статистична модель, яка була розроблена Українським науково-дослідним інститутом захисту ґрунтів від ерозії (УкрНДіЗГЕ) (А. Б. Лавровський та ін., 1987), з фізико-статистичних – так зване «універсальне рівняння втрат ґрунту», або рівняння Вішмейєра–Сміта (1958, 1978, 1989), логіко-математична модель змиву ґрунту (Г. І. Швєбс, 1974; О. О. Світличний, 1995), формули І. К. Срібного (1977, 1933), Державного гідрологічного інституту (1979) і Г. П. Сурмача (1979, 1985).

Другу велику групу ерозійних моделей складають теоретичні моделі ерозії, а в останні роки – моделі ерозії-акумуляції, які спираються на опис основних складових ерозійно-акумулятивного процесу з використанням диференціальних рівнянь нерозривності (балансу маси) і руху (балансу енергії).

Ці моделі іноді не зовсім справедливо називають гідромеханічними, тому що вони засновані на розв'язанні одновимірних, тобто гідравлічних рівнянь. В англійській науковій літературі їх називають «фізично обґрунтованими». Ступінь детальності і повноти опису окремих складових процесу в різних моделях, так само як і їхнє інформаційне забезпечення, досить різний.

До найбільш відомих в Україні моделей даної групи належить модель (формула) Ц. Є. Мірцхулави (1970) та ерозійна модель Проекту прогнозу водної

ерозії США (Water Erosion Prediction Project – WEPP) (1989). Заслужують на увагу також моделі, які розробляються в Західній Європі – Лімбурзька модель ґрунтової ерозії (Limburg Soil Erosion Model – LISEM) (1994) та Європейська модель ґрунтової ерозії (European Soil Erosion Model – EUROSEM) (1994, 1998).

Імітаційне моделювання – це сучасний різновид математичного моделювання, який базується на можливостях електронно-обчислювальної техніки. Процедура отримання нової інформації про процес (об'єкт) у випадку імітаційного моделювання виконується шляхом експериментування з моделлю цього процесу на електронно-обчислювальній машині.

Імітаційні моделі використовуються в імітаційному або оптимізаційному режимі. У першому випадку модель використовується для вибору тієї чи іншої стратегії шляхом численних експериментів з нею при визначених величинах змінних, що характеризують стан системи-оригіналу та зовнішній вплив. У другому випадку за допомогою моделі при заданій цільовій функції намагаються знайти оптимальну стратегію, тобто значення змінних, що забезпечують оптимальні значення критерію.

Імітаційне моделювання успішно застосовується для вирішення різноманітних теоретичних і прикладних завдань, пов'язаних з оцінюванням ерозійної небезпеки та проектуванням протиерозійних заходів. Найбільш визнаними та вживаними імітаційними моделями водної ерозії є EPIC (1990), CREAMS (1980), ANSWERS (1982) [7].

На сьогоднішній день розроблено велику кількість моделей водної ерозії. Серед їх великого різноманіття особливе місце займає універсальне рівняння втрат ґрунту (USLE), яке залишається базовим національним стандартом для прогнозу ерозії ґрунту в Німеччині, Бельгії, Італії, Чехії та інших країнах ЄС [5]. Воно найбільш просте і найменш вимогливе до інформаційного забезпечення. Цю модель відрізняє високий ступінь просторової і часової генералізації, невелика кількість випадкових переміщень.

Детальні експериментальні дослідження кількісного впливу чинників ерозії виконано в середині ХХ ст. у США. На підставі аналізу і узагальнення результатів спостережень на стандартних стокових майданчиках (довжиною 22,13 м, шириною 1,83 м і ухилом 9 %), проведених більше, ніж на 8000 ділянках у 36 районах в 21 штаті США, В. Вішмейєр та Д. Сміт розробили Універсальне рівняння втрат ґрунту (USLE) [15]. Воно призначене для моделювання ефектів площинного змивання та струменистої ерозії без урахування процесів лінійного розмивання. Таку модель можна застосовувати при наявності мінімальної інформації про місцеві параметри та з мінімальним досвідом [2].

Універсальне рівняння втрат ґрунту виглядає наступним чином:

$$A = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P,$$

де A – середньорічний модуль втрат ґрунту (т/га рік); R – фактор ерозійної здатності дощу; K – фактор піддатливості ґрунтів ерозії (т/га рік); LS – фактор рельєфу (L – фактор довжини схилу, S – фактор ухилу); C – фактор сівозміни (агротехніки); P – фактор ґрунтозахисних заходів [6].

Фактор ерозійної здатності дощу визначається як добуток сумарної кінетичної енергії дощу і його максимальної 30-хвилинної інтенсивності. Фактор піддатливості ґрунтів ерозії представляє собою відношення середньорічного змиву ґрунту з 1 м² стандартного стокового майданчика при його обробітку уздовж схилу по типу чорного пару до середньої багаторічної величини ерозійного індексу опадів для території, що розглядається. Фактор ухилу визначається за формулою на основі показнику ухилу схилу. Зі збільшенням величини ухилу схилу фактор ухилу в

USLE збільшується. Фактор довжини схилу визначається за формулою на основі величини довжини схилу. Зі збільшенням довжини схилу фактор довжини схилу зростає. Фактор сівозміни (агротехніки) та фактор ґрунтозахисних заходів представляють собою відношення втрат ґрунту з ділянки з певними протиерозійними заходами та зайнятої під певну культуру, до втрат ґрунту з контрольної ділянки, що знаходиться під паром та без будь-яких протиерозійних заходів [7].

Як вказують автори, USLE – це ерозійна модель, створена для визначення довготривалих середніх ґрунтових втрат унаслідок водної ерозії з певної території під певним рослинним покривом та з певною системою обробітку ґрунту [15]. Варто зауважити, що за допомогою USLE можна визначити тільки втрати від площинної ерозії, оскільки для визначення лінійної ерозії необхідно залучати низку інших, складніших для відстежування, чинників. Також у цьому рівнянні не беруть до уваги втрати ґрунту при обробітку, виносу його разом із врожаєм та за рахунок інших видів ерозії [11].

Універсальне рівняння втрат ґрунту до цього часу широко використовується у США. Його остання редакція – RUSLE – розглядається як один із основних робочих інструментів при проектуванні протиерозійних заходів Міністерством сільського господарства США [7]. Нова модель (RUSLE) містить кілька уточнень до базової формули [13; 14]. Наприклад, замість довжини схилу запропоновано визначати значення акумуляції стоку (розмір площі, з якої надходить стік у дане місце), яке враховує ефект конвергенції стоку [12]. 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 [3] та вплив на змивання поперечного профілю схилу, який зумовлює концентрацію або ж розсіювання стоку. Зазначимо, що картування показника площі акумуляції стоку стало практично можливим лише з появою ГІС із відповідними можливостями аналізу растрових даних [6].

На початку 90-х років з'явилися перші модулі для найбільш поширених ГІС-пакетів, які дали змогу здійснювати на якісно новому – просторовому рівні моделювання природних процесів. Ці модулі ґрунтуються на основі поєднання різного типу рівнянь, які описують ці природні процеси, та ГІС-технологій [11].

Практичне розв'язання задачі розробки просторових математичних моделей ерозійних втрат ґрунту стало можливим завдяки появі ГІС-технологій – сучасних інформаційних технологій роботи з просторово розподіленою і просторово координованою інформацією. Завдяки апарату картографічної алгебри, реалізованому в комерційних ГІС-пакетах з розвиненими аналітичними можливостями, стала можливою реалізація обчислювальних алгоритмів практично будь-якої складності [10].

Таким чином, моделювання ерозії – один з найбільш важливих інструментів вивчення ерозійних процесів. Воно входить до системного підходу у галузі охорони ґрунтів від ерозії, що передбачає застосування системного погляду на процес ерозії, на здійснення контролю, моделювання та прогнозу ерозії, а також на організацію заходів з охорони ґрунтів від ерозії. На аналізі результатів моделювання ерозії має ґрунтуватися наукове пояснення раціонального використання земель.

Висновки. На даний момент існує велика кількість моделей ерозії, а також їх модифікацій, які поділяють на фізичні, математичні, імітаційні. Кожна з груп моделей має свої недоліки і переваги. При виборі конкретної моделі варто

керуватися тим, яку сторону процесу ерозії хочемо дослідити, а також виходити з наявних даних та природних особливостей досліджуваної території.

Одною з найбільш доступних моделей є рівняння USLE і його модифікація RUSLE. Воно потребує меншої кількості інформаційних параметрів, не вимагає дорогого обладнання та дозволяє здійснити моделювання за відносно невеликий час. Зважаючи на те, що модель USLE (RUSLE) є емпіричною, а її параметри носять регіональний характер, для застосування її в умовах України варто провести додаткові дослідження і внести деякі корективи.

Найбільш адекватним інструментом для просторового моделювання факторів водної ерозії і змиву-аккумуляції ґрунту на даний час є ГІС-технології. Вони дозволяють перейти до просторової інтерпретації даних, істотно збільшити адекватність і точність математичних моделей і методик розрахунку та прогнозу. ГІС-технології, в поєднанні з даними ДЗЗ, відкривають великі можливості для землекористування, дослідження та охорони ґрунтів.

Список літератури

1. Державне агентство земельних ресурсів України. Офіційний сайт [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://dazru.gov.ua/>
2. Гудзон Н. Охрана почвы и борьба с эрозией / Н. Гудзон ; пер. с англ. – М. : Колос, 1974. – 304 с.
3. Ковальчук І. П. Регіональний еколого-геоморфологічний аналіз / І. П. Ковальчук. – Львів : Ін-т українознавства, 1997. – 440 с.
4. Кузнецов М. С. Современное состояние и перспективы развития исследований по защите почв от эрозии в России / Кузнецов М. С., Рожков А. Г., Глазунов Г. П. // Почвоведение. – 1994. – № 5. – С. 67-70.
5. 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.
6. Мкртчян О. Геоінформаційне моделювання процесу схилової ерозії / О. Мкртчян // Вісн. Львівс. ун-ту. Серія геогр. – 2004. – Вип. 30, ч. 1. – С. 188-193.
7. Наукові та прикладні основи захисту ґрунтів від ерозії в Україні : монографія / за ред. С. А. Балюка та Л. Л. ТОВАЖНЯНСЬКОГО. – Харків : НТУ ХПІ, 2010. – 460 с.
8. Светличный А. А. Эрозиоведение : теоретические и прикладные аспекты / Светличный А. А., Черный С. Г., Швобс Г. И. – Сумы : Университетская книга, 2004. – 410 с.
9. Светличный А. А. Принципы совершенствования эмпирических моделей смыва / А. А. Светличный // Почвоведение. – 1999. – № 8. – С. 1015-1023.
10. Светличный А. А. Пространственное геоинформационное моделирование и прогноз водной эрозии почв / А. А. Светличный // Проблеми безперервної географічної освіти і картографії. – 2013. – Вип. 17. – С. 44-47.
11. Ямелинець Т. Просторовий аналіз деградаційних процесів сірих лісових ґрунтів Західного лісостепу України / Т. Ямелинець, М. Кіт. – Львів : ВЦ ЛНУ ім. Ів. Франка, 2007. – 204 с.
12. Modeling topographic potential for erosion and deposition using GIS / Mitasova H., Hofierka J., Zlocha M., Iverson R. // Int. J. of Geographical Information Science. – 1996. – Vol. 10(5). – P. 629-641.
13. Predicting soil erosion by water. A guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE) / Renard K. G., Foster G. R., Weesies G. A. et al. // USDA Agricultural Handbook. – 1997. – N. 703.
14. Toy T. Guidelines for the use of the RUSLE version 1.06 on mined lands, construction sites and reclaimed lands / Toy T., Foster G. – Denver, 1998. – 148 p.
15. Wischmeier, W. H., and D. D. Smith, A universal soil-loss equation to guide conservation farm planning / W. H. Wischmeier, D. D. Smith, // Trans. Int. Congr. Soil Sci. – 1960. – 7th. – P. 418-425.

Мисько К. А. Застосування методу моделювання при вивченні ерозії ґрунту.

Розглянуто моделювання як один із сучасних методів вивчення ерозії ґрунту. Проаналізовано особливості фізичного, математичного і імітаційного видів моделювання ерозії. Основний акцент зроблено на аналізі рівняння витрат ґрунту USLE як найбільш простої і доступної моделі вивчення водної ерозії. Окреслено важливість застосування ГІС-технологій при моделюванні ерозійних процесів.

Ключові слова: ерозія, моделювання ерозії ґрунту, модель ерозії ґрунту, модель USLE.

Mysko K. A. Application of the study design soil erosion. Modeling has been reviewed as one of the modern methods of studying soil erosion. The features of the physical, mathematical and imitation types of erosion modeling have been analyzed. Basic accent is made on the analysis of soil loss equation USLE as the most simple and accessible model of studying water erosion. The importance of using GIS technology in modeling erosion processes has been outlined.

Keywords: erosion, soil erosion modeling, soil erosion model, USLE model.

Мысько К.А. Применение методов моделирования при изучении эрозии почвы. Рассмотрено моделирование как один из современных методов изучения эрозии почвы. Проанализированы особенности физического, математического и имитационного видов моделирования эрозии. Основной акцент сделан на анализе уравнения потерь почвы USLE как наиболее простой и доступной модели изучения водной эрозии. Очерчено важность применения ГИС-технологий при моделировании эрозионных процессов.

Ключевые слова: эрозия, моделирование эрозии почвы, модель эрозии почвы, модель USLE.

Надійшла до редколегії 07.03.2015