

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна
Навчально - науковий інститут екології
Кафедра екології та менеджменту довкілля

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

бакалавра

на тему

ОЦІНКА НЕБЕЗПЕКИ ВОДНОЇ ЕРОЗІЇ НА ТЕРИТОРІЇ КРАСНОКУТСЬКОЇ ОТГ

Виконав: студент _4_ курсу, групи ЗДЕ-41
спеціальності : 101 «Екологія»

(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

Пі автора _____ / Валентин ДАНИЛЬЧЕНКО
(підпис) (ім'я та прізвище)

Керівник _____ / Анна КОТ
(підпис) (ім'я та прізвище)

Рецензент _____ / _____
(підпис) (ім'я та прізвище)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри _____ / Андрій АЧАСОВ
(підпис) (ім'я та прізвище)

Нормоконтроль _____ / Інна МИРОНОВА
(підпис) (ім'я та прізвище)

Секретар ЕК _____ / Світлана БУРЧЕНКО
(підпис) (ім'я та прізвище)

Харків – 2025 рік

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ імені В. Н. КАРАЗІНА

Інститут: Навчально-науковий інститут екології

Кафедра: екології та менеджменту довкілля

Рівень вищої освіти: бакалавр

Спеціальність 101 Екологія

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. завідувача кафедри

_____ / проф. Андрій АЧАСОВ
підпис ім'я та прізвище
“__” _____ 2025 року

**З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ (ПРОЕКТ)**

Валентин ДАНИЛЬЧЕНКО
(ім'я та прізвище)

Тема роботи: Оцінка небезпеки водної ерозії на території Краснокутської ОТГ

керівник роботи Анна КОТ, ст. викладач
(ім'я, прізвище, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від “__” _____ 2025 року №__

2. Строк подання студентом роботи 08.05.2025 року

3. Перелік питань, які потрібно розробити :

1. Проаналізувати фізико-географічні особливості території Краснокутської ОТГ, що впливають на інтенсивність водної ерозії.
2. Визначити основні чинники і джерела небезпеки ерозійних процесів у сільськогосподарських ландшафтах.
3. Провести оцінку ризику водної ерозії ґрунтів із використанням методів математичного моделювання.
4. Надати рекомендації щодо зменшення негативного впливу ерозійних процесів на агроландшафти Краснокутської ОТГ.

5. План роботи

№ з/п	Назви етапів роботи
1	Збір і аналіз літературних джерел щодо водної ерозії ґрунтів і методів її оцінки
2	Характеристика природно-географічних умов Краснокутської ОТГ
3	Ідентифікація факторів ризику ерозії ґрунтів у межах досліджуваної території
4	Розробка заходів для зменшення впливу водної ерозії на сільськогосподарські угіддя
5	Формулювання висновків і пропозицій

6. Дата видачі завдання _____

Студент

підпис

Валентин ДАНИЛЬЧЕНКО

ім'я і прізвище

Керівник роботи

підпис

Анна КОТ

посада, ім'я і прізвище

АНОТАЦІЯ
**ОЦІНКА НЕБЕЗПЕКИ ВОДНОЇ ЕРОЗІЇ НА ТЕРИТОРІЇ
КРАСНОКУТСЬКОЇ ОТГ**

Валентин ДАНИЛЬЧЕНКО

Кваліфікаційна робота «Оцінка небезпеки водної ерозії на території Краснокутської ОТГ» містить 41 сторінку основного тексту, 3 розділи, 21 рисунок, 24 використаних джерела.

Мета роботи - оцінити втрати ґрунту, спричинені водною ерозією на сільськогосподарських землях Краснокутської об'єднаної територіальної громади (ОТГ) за допомогою математичного моделювання.

Актуальність теми зумовлена інтенсивним розвитком ерозійних процесів, що призводять до деградації земель, зниження родючості ґрунтів та втрати агропродуктивного потенціалу. Проблема особливо гостра для регіонів зі значною часткою орних земель, як-от Краснокутська ОТГ.

Об'єкт дослідження - сільськогосподарські угіддя Краснокутської ОТГ Харківського району Харківської області.

Предмет дослідження - математичне прогнозування втрат ґрунту внаслідок водної ерозії на досліджуваних територіях.

Методи дослідження - математичне моделювання ерозійних процесів за допомогою моделі WEPP, аналіз картографічних матеріалів, оцінка ефективності ґрунтозахисних заходів.

Результати. У роботі проведено моделювання втрат ґрунту для типових сільськогосподарських ділянок Краснокутської ОТГ, визначено рівень ерозійної небезпеки, запропоновано комплекс заходів для зменшення водної ерозії, зокрема впровадження багаторічних трав. Розроблено рекомендації для збереження родючості та екологічної стабільності агроландшафтів регіону.

ВОДНА ЕРОЗІЯ, МОДЕЛЮВАННЯ WEPP, ҐРУНТОЗАХИСНІ ЗАХОДИ,
АГРОЛАНДШАФТИ, КРАСНОКУТСЬКА ОТГ, ВТРАТИ ҐРУНТУ, РОДЮЧІСТЬ.

ABSTRACT

ASSESSMENT OF WATER EROSION HAZARD IN THE TERRITORY
OF KRASNOKUTSKA UTC

Valentyn DANYLCHENKO

The qualification thesis titled “Assessment of Water Erosion Risk in the Territory of Krasnokutsk Territorial Community” consists of 41 pages of main text and is structured into three chapters. It includes 21 figures and references 24 sources of literature.

The aim of the work is to assess soil loss caused by water erosion on agricultural lands of the Krasnokutska UTC using mathematical modeling.

Relevance of the topic is due to the intensive development of erosion processes, which lead to land degradation, a decline in soil fertility, and a loss of agro-productive potential. The problem is especially urgent for regions with a high proportion of arable land, such as the Krasnokutska UTC.

The object of the study is agricultural lands of the Krasnokutska UTC in Kharkiv Raion, Kharkiv Oblast.

The subject of the study is mathematical forecasting of soil loss due to water erosion in the researched areas.

Research methods include mathematical modeling of erosion processes using the WEPP model, analysis of cartographic materials, and evaluation of soil protection measures.

Results. The study conducted modeling of soil loss for typical agricultural plots of Krasnokutska UTC, identified the level of erosion hazard, and proposed a set of measures to reduce water erosion, particularly the introduction of perennial grasses. Recommendations were developed to preserve soil fertility and maintain the ecological stability of the region's agro-landscapes.

WATER EROSION, WEPP MODELING, SOIL PROTECTION MEASURES,
AGROLANDS, KRASNOKUTSKA ATC, SOIL LOSS, FERTILITY.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1 СУЧАСНИЙ СТАН ВИВЧЕННЯ ПРОБЛЕМИ	
ВОДНОЇ ЕРОЗІЇ ҐРУНТІВ.....	9
1.1. Ключові поняття та визначення	9
1.2. Оцінка ерозійної небезпеки ґрунтів України	15
1.3. Математичне моделювання і прогнозування водної ерозії на основі моделі WEPP.....	18
РОЗДІЛ 2. УМОВИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ	
ВОДНОЇ ЕРОЗІЇ ҐРУНТІВ.....	22
2.1. Характеристика території дослідження.....	22
2.2. Методика моделювання процесів водної ерозії	25
РОЗДІЛ 3 РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ ВОДНОЇ ЕРОЗІЇ ҐРУНТІВ.....	29
ВИСНОВКИ.....	38
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	40

ВСТУП

Ґрунт є основою життя на планеті, базовим ресурсом для сільськогосподарського виробництва, регулятором гідрологічного балансу, носієм родючості та одним з найважливіших компонентів екосистеми. Проте за останні десятиліття спостерігається стрімке погіршення якості ґрунтів через антропогенний тиск, зокрема внаслідок ерозійних процесів. Серед них водна ерозія займає провідне місце як за поширенням, так і за масштабами завданої шкоди.

За даними ФАО, щороку у світі втрачаються мільйони тонн родючого шару ґрунту внаслідок водної ерозії, що веде до зниження врожайності, виснаження земель і деградації агроєкосистем. Особливо гостро ця проблема постає в регіонах з високим ступенем розораності та інтенсивним використанням сільськогосподарських угідь. Україна, зокрема її східні області, не є винятком. Харківський район Харківської області — один із таких регіонів, де водна ерозія набуває загрозливих масштабів.

Інтенсивне сільське господарство, нехтування сівоzmінами, вирощування монокультур, знищення природної рослинності, порушення правил обробітку ґрунту — все це сприяє розвитку водної ерозії. У результаті відбувається змивання гумусового шару, ущільнення ґрунту, зниження водопроникності та аерації, зменшення біологічної активності. Це, своєю чергою, призводить до зниження продуктивності сільськогосподарських культур, втрати економічної вигоди та порушення природного балансу в агроландшафтах.

Крім економічних втрат, водна ерозія має значний екологічний вплив. Вона спричиняє замулення водотоків, забруднення водойм агрохімікатами, втрата біорізноманіття та порушення екологічної рівноваги. Таким чином, ерозія — не лише проблема аграрного сектору, а й питання екологічної безпеки регіону в цілому.

На фоні змін клімату, зростання частоти екстремальних погодних явищ (злив, паводків), проблема водної ерозії набуває ще більшої актуальності. Підвищення температур, зменшення кількості опадів у літній період і збільшення зливових

навантажень у міжсезоння створюють нові виклики для агровиробництва та збереження ґрунтового покриву.

У зв'язку з цим особливої ваги набувають сучасні підходи до оцінки ерозійної небезпеки, серед яких провідну роль відіграють математичні моделі. Вони дозволяють не лише проаналізувати поточний стан, а й спрогнозувати розвиток ерозійних процесів у різних умовах землекористування та кліматичних сценаріях. Використання таких моделей дає змогу обґрунтовано приймати рішення щодо організації протиерозійного захисту, планування сівозмін, впровадження ґрунтозахисних технологій обробітку.

Таким чином, дослідження водної ерозії ґрунтів в агроландшафтах Харківського району має надзвичайну практичну й наукову значущість. Його результати можуть слугувати основою для розробки ефективної системи управління земельними ресурсами та забезпечення сталого розвитку аграрного сектору.

РОЗДІЛ 1 СУЧАСНИЙ СТАН ВИВЧЕННЯ ПРОБЛЕМИ ВОДНОЇ ЕРОЗІЇ ҐРУНТІВ

1.1 Ключові поняття та визначення

У контексті дослідження водної ерозії ґрунтів надзвичайно важливо чітко окреслити основні терміни й поняття, які лежать в основі розуміння сутності ерозійних процесів, що відбуваються в агроландшафтах. Це необхідно як для уніфікації наукової термінології, так і для точного формулювання гіпотез, побудови моделей та ефективної розробки заходів протидії деградації ґрунтового покриву.

Ерозія ґрунту — це складний природно-антропогенний процес, що полягає в механічному руйнуванні та переміщенні частинок ґрунту під впливом таких чинників, як вода, вітер, а також господарська діяльність людини [1, 2]. У більшості випадків цей процес зачіпає саме верхній, найбільш родючий шар ґрунту, багатий на гумус і поживні речовини, що безпосередньо впливає на продуктивність агроєкосистем. Руйнування структури ґрунту внаслідок ерозії призводить до зниження водоутримуючої здатності, погіршення аерації, зменшення вмісту органічної речовини, а в перспективі — до повної деградації ґрунтів [3, 4].

У вузькому значенні водна ерозія ґрунтів розглядається як один з основних типів ерозійних процесів, що відбувається під дією поверхневого стоку атмосферних опадів, талої або зрошувальної води, яка механічно змиває дрібні ґрунтові частинки зі схилів у пониження рельєфу [5, 6]. В умовах інтенсивного землекористування та зміни клімату водна ерозія набуває все більш загрозливого характеру, оскільки поєднує природні процеси з посиленим антропогенним тиском, що значно ускладнює контроль за її перебігом.

Особливо небезпечним є те, що ерозія розвивається поступово й часто залишається непоміченою на ранніх стадіях. Проте її наслідки проявляються у вигляді значних втрат родючого шару ґрунту, зменшення врожайності сільськогосподарських культур, забруднення водою завислими частками та

поживними речовинами, а також підвищення загрози виникнення селевих потоків і повеней [7, 8]. За оцінками Продовольчої та сільськогосподарської організації ООН (FAO), щорічні втрати орних ґрунтів у світі внаслідок ерозії сягають понад 24 мільярди тонн, і ця цифра постійно зростає [7].

З точки зору просторово-часової організації процесів, водну ерозію поділяють на такі основні типи: краплинна, площинна, струмкова (борозенчаста) та яружна ерозія. Кожен із цих видів характеризується особливою інтенсивністю, глибиною ураження ґрунту та відмінностями у механізмі формування. Наприклад, краплинна ерозія починається з ударів дощових крапель по відкритому ґрунту, що призводить до дезагрегації структурних агрегатів, утворення ґрунтової кірки та зниження фільтраційної здатності поверхневого шару [3]. Площинна ерозія, у свою чергу, характеризується більш рівномірним змиванням ґрунту і є менш помітною візуально, але вкрай шкідливою в довгостроковій перспективі. Струмкова та яружна ерозії супроводжуються формуванням заглиблень і каналів, у яких концентрується водний потік, що багаторазово підсилює руйнівну дію води.

Слід також наголосити, що інтенсивність та форма прояву водної ерозії значною мірою залежать від кліматичних умов, типу ґрунтів, характеру рослинного покриву, особливостей рельєфу та способів землекористування [1, 2]. Так, на схилах з кутом нахилу понад 7° швидкість ерозійних процесів зростає у 2–4 рази, а при розорюванні земель уперек схилу ці показники можуть бути ще вищими [4]. Особливо вразливими до водної ерозії є чорноземи у лісостепових зонах, які зазнають інтенсивного використання під зернові культури.

Таким чином, водна ерозія є не лише геоморфологічним явищем, а й серйозною екологічною та агроекономічною проблемою, що потребує глибокого наукового вивчення та впровадження ефективних протиерозійних заходів. Її аналіз вимагає міждисциплінарного підходу, поєднання ґрунтознавства, агрономії, гідрології, геоінформатики та екологічного менеджменту.

Водна ерозія ґрунтів — це складний природний процес, який виявляється у різних формах залежно від інтенсивності водного стоку, характеру рельєфу, особливостей ґрунту та рослинного покриву. Класифікація водної ерозії за

формами дозволяє більш детально аналізувати механізми руйнування ґрунту та розробляти ефективні заходи з боротьби з ерозією. Найпоширенішими типами водної ерозії вважаються краплинна, площинна, борозенчаста (струмкова) та яружна ерозія [5, 6].

Краплинна ерозія — це початкова стадія ерозійного процесу, яка виникає внаслідок ударів крапель дощу по відкритій поверхні ґрунту. При падінні крапель дощу утворюються ударні хвилі, що дезінтегрують ґрунтові агрегати, руйнують структуру ґрунту та спричиняють утворення поверхневої кірки. Ця кірка знижує проникність ґрунту для води, що збільшує поверхневий стік і посилює ерозійні процеси. Краплинна ерозія не завжди помітна візуально, проте вона має значний вплив на родючість ґрунту і є каталізатором подальшої ерозії [7, 8].

Площинна ерозія — це рівномірне змивання тонкого шару ґрунту тонким шаром розливої води. Цей процес часто непомітний, оскільки не супроводжується утворенням видимих борозен або ярів. Проте площинна ерозія спричиняє втрати родючого шару ґрунту, знижує його продуктивність і змінює агрофізичні властивості. Вона найчастіше виникає на розораних або відкритих землях із слабким рослинним покривом під впливом інтенсивних опадів [5, 9].

Борозенчаста (струмкова) ерозія проявляється, коли поверхневий стік концентрується у вигляді невеликих потоків або борозен, що прорізають ґрунт і поглиблюють рельєф. Ця форма ерозії є проміжною між площинною і яружною ерозією та свідчить про посилення ерозійного процесу. Борозенчаста ерозія посилює змивання ґрунту, сприяє поглибленню борозен і створює умови для переходу в більш руйнівні форми ерозії [6, 10].

Яружна ерозія — найбільш агресивна форма водної ерозії, що характеризується утворенням глибоких і широких ярів, які суттєво змінюють рельєф і призводять до незворотних втрат родючого шару ґрунту. Яри формуються внаслідок концентрованого потоку води, що поглиблює борозни і викликає масштабні деградаційні процеси. Відновлення яружних земель є складним, дороговартісним і часто неможливим без значних технічних втручань. Тому важливо вчасно проводити заходи з профілактики яружної ерозії [5, 9, 11].

Розуміння особливостей кожної форми водної ерозії ґрунтів є ключовим для розробки дієвих систем захисту земель від ерозії, що включають агротехнічні, інженерні та біологічні заходи. Зокрема, заходи проти краплинної ерозії орієнтовані на підтримку рослинного покриву і покращення структури ґрунту, тоді як боротьба з яружною ерозією передбачає комплексне використання гідротехнічних споруд та інженерних конструкцій для утримання поверхневого стоку [6, 12].

Прискорена ерозія ґрунтів, яку також називають руйнівною, виникає переважно через антропогенний вплив. Основними факторами, що спричиняють цей тип ерозії, є нераціональне та неконтрольоване використання земельних ресурсів, помилки у будівництві, а також неправильні методи ведення лісового та сільськогосподарського господарства. Важливу роль у цьому відіграють також прокладання доріг, інтенсивна промислова діяльність та інші форми людської активності, які порушують цілісність захисного верхнього шару ґрунту. Як результат, відбувається швидке руйнування ґрунтового покриву. Прискорена ерозія призводить до формування різноманітних ерозійних форм рельєфу, серед яких особливо поширені борозни, канави та яри — характерні ознаки активного змиву ґрунту [12].

За інтенсивністю змиву ґрунти умовно поділяють на три категорії: слабозмиті, середньозмиті та сильнозмиті. Для кожної з цих категорій існує своя характеристика, що базується на ступені втрати верхнього шару ґрунту, який найбільше впливає на родючість та структуру ґрунту. Детальна характеристика цих категорій представлена в таблиці 1.1 [13].

Окрім ґрунтів, що піддаються змиву, існують також намиті ґрунти, на яких збираються відкладення ерозійних матеріалів. Ці відкладення класифікують за товщиною шару: малонамиті (товщина шару менша за 20 см), середньонамиті (20–40 см) і сильнонамиті (понад 40 см). Така класифікація важлива для оцінки ерозійних процесів і розробки заходів щодо відновлення родючості [14].

Ерозійні процеси поділяють на два основні типи: природна (геологічна) ерозія та антропогенна (прискорена) ерозія. Природна ерозія є природним,

повільним геологічним процесом, що відбувається під дією вітру та води. Вона має сталий характер і зазвичай не завдає суттєвої шкоди родючості ґрунтів, оскільки є невід'ємною частиною природного кругообігу речовин. Природна ерозія є незворотною, однак її темпи дуже повільні і зазвичай не вимагають спеціальних заходів контролю [15].

Натомість прискорена ерозія виникає в результаті інтенсивної діяльності людини, зокрема через неправильне ведення сільського господарства, лісового господарства, будівництва, прокладання транспортних шляхів та інших господарських процесів. Такий тип ерозії відбувається значно швидше і має руйнівний вплив на ґрунтовий покрив, призводячи до втрати родючості та порушення структури ґрунту. Прискорену ерозію часто супроводжують утворення борозен, канав та ярів, що поглиблюють проблеми деградації земель. Залежно від інтенсивності змиву, ерозію поділяють на слабку (0,5–1,0 т/га), середню (1,0–5,0 т/га), сильну (5–10 т/га) та дуже сильну (понад 10 т/га) [16].

Одним із поширених видів прискореної ерозії є водна ерозія, що характеризується руйнуванням ґрунту під дією дощових, талих і іригаційних вод. Вона може мати поверхневий характер, коли змивається верхній родючий шар, або глибокий, що призводить до формування ярів і глибоких розмивів. Найбільш активно водна ерозія проявляється на розораних схилах, особливо якщо оранка здійснюється вздовж схилу, що сприяє накопиченню води і посиленню змиву. Цю ситуацію ускладнює вирощування сільськогосподарських культур, які потребують великих площ живлення і додаткового зрошення, що може збільшувати ризик ерозійних процесів [17].

Вітрова ерозія або дефляція ґрунту виникає через видування верхнього шару ґрунту сильними вітрами. Вона особливо поширена на відкритих, незадернених територіях, характерних для степових, пустельних та пустельно-степових зон. Вітрова ерозія може проявлятися у формі місцевої (повсякденної) ерозії, зимового видування — коли сильні вітри взимку руйнують посіви, а також у вигляді пилових бур, які становлять найбільшу небезпеку, переносячи величезні обсяги ґрунту на великі відстані.

Місцева вітрова ерозія проходить поступово і зазвичай при помірній швидкості вітру, але її шкідливий вплив накопичується з часом. Зимове видування відбувається переважно на зораних полях, де слабка рослинність і недостатній захист роблять ґрунт уразливим. Пилові бурі є найінтенсивнішою формою вітрової ерозії і здатні призводити до значних втрат ґрунту та забруднення атмосфери пилом.

Причини прискореної ерозії часто пов'язані з безконтрольним вирубуванням лісів, що позбавляє землю захисного рослинного покриву. Коренева система дерев утворює міцну структуру, яка утримує ґрунт і запобігає його змиву. Після знищення лісового покриву земля стає більш вразливою. Крім того, розорювання луків, які зазвичай мають щільну трав'янисту дернину, призводить до збільшення ризику ерозії, адже дернина захищає ґрунт від змиву. Перевипасання худоби викликає швидке знищення трав'яного покриву та порушення структури ґрунту, що також сприяє його руйнуванню. Неправильне ведення землеробства, особливо відсутність сівоzmіни та орні роботи вздовж схилів, посилює змив ґрунту та знижує його родючість [15].

Ерозія ґрунту є практично незворотним процесом, оскільки втрачені через воду або вітер ґрунтові ресурси не можуть бути відновлені в сільськогосподарському циклі. В Україні площа ерозійно уражених земель перевищує 17 мільйонів гектарів. При цьому часто спостерігається поєднання різних типів ерозії, що ускладнює заходи з боротьби з цим явищем. Водна ерозія поширена на зрошуваних територіях, де проявляється у вигляді площинного змиву, намиття ґрунту та формування розмитих борозен. Найбільша частка змитих ґрунтів припадає на Луганську, Вінницьку, Дніпропетровську та Одеську області, де ця частка становить від 53% до 66% від загальної площі ріллі. Окрім зниження родючості, ерозія завдає значної шкоди інфраструктурі, замулюючи річки, руйнуючи сінокоси, пасовища і гідротехнічні споруди [16].

Фактори, які підсилюють розвиток водної ерозії, включають вирубування лісів, знищення трав'яного покриву, розорювання схилів, неглибоку оранку, інтенсивні опади і неправильні меліоративні заходи. Для вітрової ерозії

додатковими факторами є розорювання легких ґрунтів (піщаних та супіщаних), монотонне вирощування одних і тих самих культур протягом кількох років, а також помилки у меліорації [15].

Наслідки ерозійних процесів є значними і багатогранними. В першу чергу це втрата гумусу та поживних речовин, що безпосередньо знижує енергетичний потенціал ґрунту і його здатність підтримувати родючість. Особливо це помітно на темно-сірих опідзолених ґрунтах. Наприклад, у Київській області у слабозмитих і середньозмитих ґрунтах вміст гумусу зменшився на 0,2-0,3%, а запаси поживних речовин у метровому шарі — на 30-50 т/га у порівнянні з незмитими ділянками. Крім того, ерозія призводить до замулювання водойм, заповошування доріг, погіршення кліматичних умов через підвищене запилення повітря, а також зниження врожайності і якості сільськогосподарської продукції [13].

1.2 Оцінка ерозійної небезпеки ґрунтів України

Україна є однією з найбільших аграрних країн світу з великим потенціалом розвитку сільського господарства, маючи близько третини світових запасів чорноземів. Вона посідає провідні позиції на світовому ринку за виробництвом і переробкою соняшникової олії, зерна, меду та цукру [15]. Площа сільськогосподарських угідь становить 70,3 % від загальної території країни, з яких 81 % — це оброблювані землі. Чорноземи є найпоширенішими ґрунтами, займаючи 60,6 % сільськогосподарських земель, тоді як темно-сірі лісові ґрунти складають 21,3 %. Степова зона, що охоплює 41,5 % території України, є найбільшим природним комплексом і має понад 76 % сільськогосподарських угідь, з яких 63 % — оброблювані землі. Лісостепова зона займає 33 % території країни і відзначається високим рівнем оброблюваних сіножатей та земель, придатних для сільського господарства. Поліська зона, з великою кількістю лісів і кущів, має багато пасовищ, але площі під культивовані землі тут значно менші [16]. Ґрунти є найважливішим елементом навколишнього середовища, що визначає продуктивність сільськогосподарського виробництва, яка безпосередньо залежить

від їхнього стану. Основним чинником деградації ґрунтів в агроландшафтах України є ерозія, яка завдає значних економічних і екологічних збитків. Інтенсифікація ерозійних процесів призводить до суттєвої деградації ґрунтів та збитків у аграрному секторі. В Україні більше ніж 16 мільйонів гектарів земель піддалися ерозії, і цей процес продовжує поширюватися, охоплюючи кожен п'ятий гектар раніше неуражених територій. Особливо небезпечним є зниження рівня гумусу, основної органічної складової ґрунту, який на цих землях зменшився на 30–70 %. Яружна ерозія поширена на площах близько 157 тисяч гектарів, де сформовано приблизно 600 тисяч ярів. На рисунку 1 наведена карта еродованості ґрунтів України, що відображає ступінь ерозії по областях у відсотках [17].

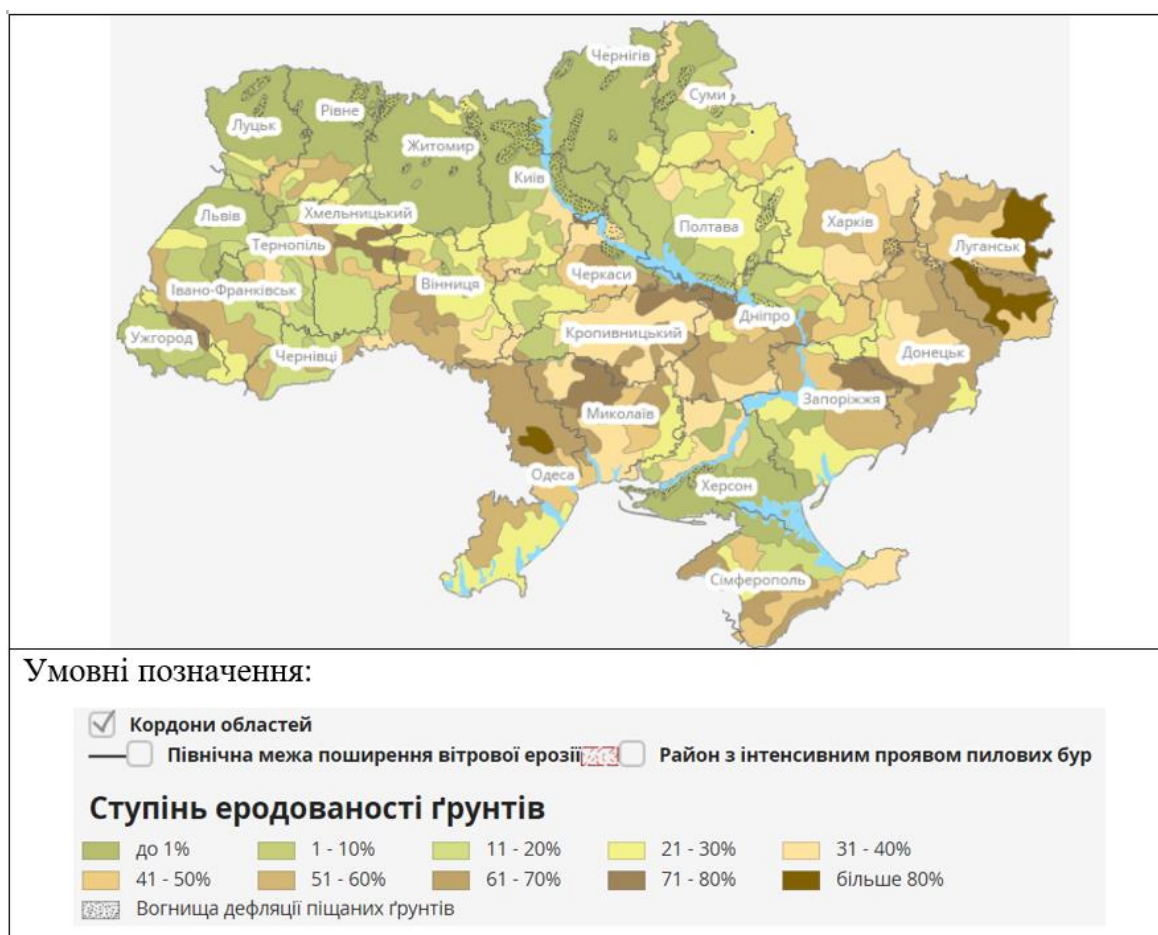


Рис. 1 – Карта еродованості ґрунтів України [17]

Аналіз показує, що найвищий рівень ерозії ґрунтів спостерігається в Луганській області, де еродовані ділянки займають значні площі та суттєво впливають на сільськогосподарський потенціал регіону. Водночас, найнижчий

рівень ерозійних процесів зафіксовано у Волинській (зокрема Луцькій), Рівненській, Житомирській та Чернігівській областях. Ці регіони характеризуються відносно стабільним станом ґрунтів, де ерозія проявляється значно слабше, порівняно з іншими територіями країни.

Щороку через ерозійні процеси в Україні втрачається величезна кількість ґрунту — від 300 до 600 мільйонів тонн. Ці втрати несуть значні екологічні та економічні наслідки, оскільки разом із ґрунтом зникають важливі поживні речовини, такі як гумус, азот, фосфор і калій. Наприклад, щорічні втрати гумусу сягають приблизно 15 мільйонів тонн, азоту — до 900 тисяч тонн, фосфору — близько 900 тисяч тонн, а калію — приблизно 12 мільйонів тонн. Ці величини суттєво перевищують обсяги поживних речовин, які надходять до ґрунту з внесенням мінеральних добрив, що свідчить про значну деградацію родючості ґрунтів та зниження їх здатності підтримувати сільськогосподарське виробництво.

Наслідком ерозії є суттєве зниження врожайності на уражених ґрунтах — в середньому на 20–60 % у порівнянні з нееродованими землями. Це призводить до масштабних втрат сільськогосподарської продукції. За експертними оцінками, через ерозію щорічно втрачається від 9 до 12 мільйонів тонн зернових культур, що спричиняє економічні збитки, які перевищують 10 мільярдів доларів на рік. Таким чином, ерозія не лише шкодить природі, а й негативно впливає на продовольчу безпеку країни та її економічний добробут.

Особливо гострою є проблема вітрової ерозії, яка щороку впливає на понад 6 мільйонів гектарів земель, а під час пилових бур цей показник може збільшуватися до 20 мільйонів гектарів. Вітрова ерозія сприяє здуванню верхнього родючого шару ґрунту, що ускладнює ведення сільського господарства та призводить до подальшого виснаження земель.

Не менш значущою є водна ерозія, яка руйнує понад 13,3 мільйона гектарів сільськогосподарських угідь, що становить близько 32 % від усієї площі сільськогосподарських земель України. З цієї кількості орними землями є 10,6 мільйона гектарів. Крім того, понад 4,5 мільйона гектарів земель країни знаходяться у стані середньої або сильної ерозії, а близько 68 тисяч гектарів

повністю позбавлені гумусового горизонту, що суттєво знижує їхню родючість і продуктивність. Такі тенденції створюють загрозу для сталого розвитку аграрного сектору і підкреслюють необхідність нагальних заходів для охорони та відновлення ґрунтів.

У зв'язку з цими викликами, для забезпечення стабільного і сталого розвитку сільського господарства в Україні необхідно впроваджувати комплексну систему заходів, спрямованих на запобігання ерозійним процесам та відновлення деградованих земель. До таких заходів належать агроеліоративні практики, які включають оптимізацію сівозмін, застосування ґрунтозахисних технологій, гідромеліоративні роботи, спрямовані на регулювання водного режиму, а також організаційно-господарські стратегії, які передбачають раціональне використання земельних ресурсів. Важливою складовою є також лісомеліорація, яка допомагає стабілізувати ґрунтовий покрив і запобігати вітровій ерозії. Ефективність цих заходів значною мірою залежить від науково обґрунтованого проектування, що базується на точних дослідженнях, комплексному аналізі стану ґрунтів і моделюванні ерозійних процесів. Такий системний підхід дозволить суттєво знизити негативний вплив ерозії на екологічну ситуацію та аграрний потенціал країни, сприятиме збереженню родючості ґрунтів і покращенню економічних показників сільськогосподарського виробництва [18][19].

1.3 Математичне моделювання і прогнозування водної ерозії на основі моделі WEPP

Математичне моделювання відіграє ключову роль у комплексному вивченні та прогнозуванні водної ерозії, адже цей підхід дозволяє врахувати велику кількість факторів, які безпосередньо впливають на деградацію ґрунтів. Однією з важливих переваг математичних моделей є здатність інтегрувати різноманітні природні та антропогенні змінні, що формують ерозійні процеси. Зокрема, серед основних факторів, які враховуються при моделюванні, є тип ґрунту, що визначає його структуру, проникність, водоутримуючу здатність і стійкість до руйнування.

Рослинне покриття виступає як природний бар'єр, що знижує силу струменя води і таким чином захищає ґрунт від розмиву. Рельєф місцевості, включаючи нахили схилів та їх довжину, впливає на швидкість руху поверхневих вод і відповідно на інтенсивність ерозійних процесів. Важливе значення мають також кліматичні умови, такі як кількість і інтенсивність опадів, температура повітря, вологість, які безпосередньо визначають потенціал водної ерозії.

Окрім природних факторів, в моделі враховують агротехнічні заходи, які можуть суттєво змінити ситуацію. До них належать технології обробітку ґрунту, сівозміна, використання рослинних покривів, внесення добрив та інших агропрактик, які впливають на структуру ґрунту та його здатність протистояти ерозії. Такий комплексний підхід дозволяє отримати більш точні й детальні прогнози про розвиток ерозійних процесів у конкретних умовах.

Використання математичних моделей для прогнозування водної ерозії забезпечує можливість просторово-часового аналізу, що є надзвичайно важливим для планування заходів із захисту ґрунтів. Ці прогнози допомагають не лише оцінити поточний стан ґрунтового покриву, але й передбачити можливі зміни в майбутньому під впливом кліматичних коливань, збільшення інтенсивності опадів чи змін у землекористуванні. Це особливо актуально в контексті глобальних змін клімату, які посилюють ризики ерозії та деградації ґрунтів.

Таким чином, математичне моделювання є незамінним інструментом для розробки ефективних заходів щодо захисту ґрунтів, оптимізації агротехнічних практик і забезпечення сталого розвитку сільського господарства. Воно дозволяє системно підходити до оцінки ерозійної небезпеки і розробляти стратегії, які максимально зменшують негативний вплив ерозії на екосистеми та агровиробництво [18-20].

Однією з найпоширеніших і науково обґрунтованих моделей для прогнозування водної ерозії є модель WEPP (Water Erosion Prediction Project), розроблена Національною лабораторією дослідження ерозії ґрунтів США та офіційно представлена у 1995 році [21]. Ця модель базується на фізичних принципах процесів водної ерозії і використовує щоденне імітаційне моделювання

змін у стані ґрунту, рослинного покриву та рельєфу місцевості. Завдяки цьому WEPP дає змогу досить точно оцінювати інтенсивність ерозійних процесів, а також обсяги виносу та накопичення ґрунтових матеріалів на різних просторових масштабах — від окремих полів до масштабів регіонів [22].

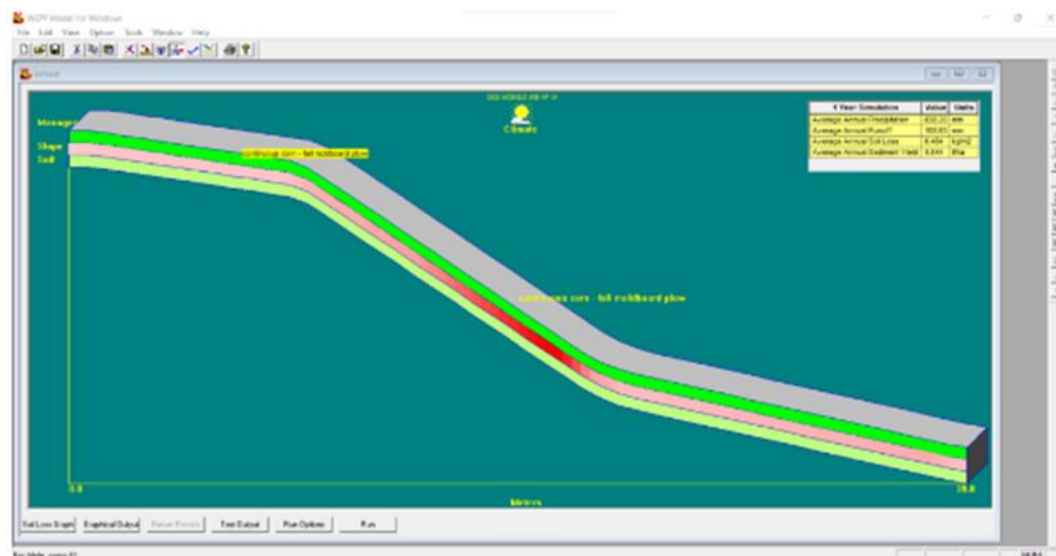


Рис. 2 – Інтерфейс ПЗ WEPP

Модель WEPP значно зменшує необхідність проведення масштабних і дорогих польових експериментів і вимірювань, дозволяючи замість цього здійснювати чисельні симуляції різних сценаріїв управління ґрунтами. Це дає змогу оцінити ефективність різних агротехнічних заходів, таких як зміни у сівозміні, застосування рослинного мульчування, створення захисних смуг і інших методів боротьби з ерозією. Використання моделі допомагає визначити оптимальні стратегії для збереження родючості ґрунтів і забезпечення довгострокової стабільності агроландшафтів, що є надзвичайно важливим для сталого розвитку сільського господарства [23, 24].

Крім того, модель WEPP є надзвичайно корисним інструментом для прогнозування впливу кліматичних змін на процеси водної ерозії, оскільки вона враховує широкий спектр кліматичних параметрів, таких як інтенсивність і частота опадів, температура повітря, а також зміни в сезонних і річних кліматичних режимах. Завдяки цьому модель дозволяє оцінювати, як саме зміни клімату можуть впливати на ерозійні процеси в різних регіонах, зокрема на посилення або

зниження інтенсивності ерозії, що має важливе значення для прогнозування довгострокових змін у родючості ґрунтів та продуктивності сільськогосподарських угідь. Особливо актуальним це є в умовах зростаючої глобальної мінливості клімату, коли коливання погодних умов, частіше виникнення екстремальних явищ, таких як сильні зливи чи посухи, можуть значно підвищувати ризики деградації ґрунтового покриву та призводити до значних втрат урожаю.

Таким чином, використання моделі WEPP сприяє більш комплексному і науково обґрунтованому підходу до управління ґрунтовими ресурсами, об'єднуючи дані про кліматичні умови, фізичні характеристики ґрунту, а також агротехнічні і екологічні фактори. Це дозволяє не лише оцінювати поточний стан ерозійних процесів, а й розробляти ефективні стратегії боротьби з водною ерозією, що включають оптимізацію агротехнічних заходів, впровадження систем захисного землеробства, лісомеліоративні роботи та інші заходи, спрямовані на збереження і відновлення родючості ґрунтів. Завдяки цьому забезпечується підтримка сталого розвитку сільського господарства, зниження економічних збитків від ерозії та покращення екологічної ситуації в агроландшафтах [20, 21].

РОЗДІЛ 2. УМОВИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ ВОДНОЇ ЕРОЗІЇ ҐРУНТІВ

2.1 Характеристика території дослідження

Краснокутська об'єднана територіальна громада (ОТГ) розташована в південній частині Харківської області України. Ця територія характеризується сприятливими умовами для сільськогосподарського виробництва завдяки родючим ґрунтам, помірному клімату та розвиненій інфраструктурі. Основними напрямками аграрного виробництва є вирощування зернових культур, таких як пшениця, кукурудза та ячмінь, а також технічних культур, зокрема соняшнику. Окрім того, розвинене тваринництво, зокрема молочне скотарство та свинарство. Сільськогосподарські підприємства громади активно впроваджують сучасні агротехнології та методи управління, що сприяє підвищенню ефективності виробництва та збереженню екологічного балансу.

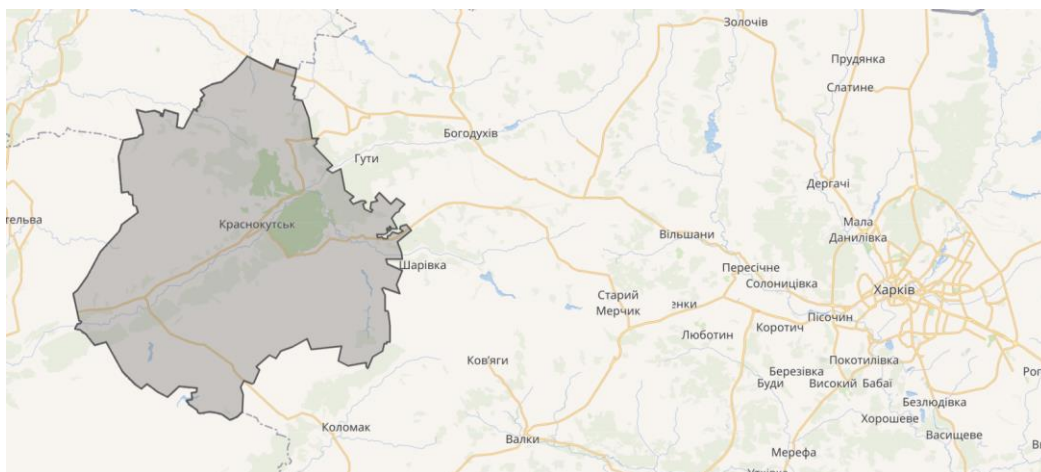


Рис. 3 – Місцезорядування місця дослідження

Для проведення моделювання за допомогою моделі WEPP були використані типові параметри, характерні для природно-кліматичної зони лісостепу, адже саме в цій зоні розташований об'єкт нашого дослідження. Модель вимагала детального опису ґрунтового профілю, тому було враховано структуру ґрунтових шарів з глибиною від 0 до 800 мм. На кожному рівні ґрунту були задані фізико-хімічні характеристики, які включають вміст різних фракцій — піску, глини, а також

органічної речовини, що є важливим фактором для утримання вологи і живлення рослин. Окрім цього, в моделі враховувалась катіонно-обмінна ємність (СЕС), яка характеризує здатність ґрунту утримувати поживні елементи. Початковий рівень вологості ґрунту було встановлено на рівні 75%, що відповідає типовим стандартним умовам для лісостепової зони України.

Важливими параметрами для визначення еродованості ґрунту, які використовуються моделлю WEPP, є Interrill Erodibility — показник еродованості міжряддя (тобто втрати ґрунту через поверхневий стік між окремими борознами або рядами), та Rill Erodibility — еродованість у ріллі (утворення невеликих водних жолобів). Ці параметри в моделі автоматично розраховуються на основі фізико-хімічних характеристик ґрунту, що дозволяє отримати більш точні та надійні результати при прогнозуванні водної ерозії.

Для проведення дослідження було вибрано модельне сільськогосподарське поле, розташоване на території Краснокутської об'єднаної територіальної громади (ОТГ). Це поле було обране з урахуванням різноманітності рельєфних особливостей, що дозволяє оцінити вплив водної ерозії на ділянки з різним нахилом і протяжністю схилів. Для більш точного аналізу рельєфу було визначено чотири умовні відрізки схилів, кожен з яких характеризується різними показниками довжини і кута нахилу (рис. 4).



Рис. 4 - Модельне сільськогосподарське поле з поділом на відрізки для аналізу водної ерозії

Перший відрізок має довжину 244 метри і включає декілька частин з різним кутом нахилу, що варіюється від 0,57% до 4,12%. Така різноманітність нахилів дає змогу вивчити, як на одному і тому ж відрізку змінюється інтенсивність водного стоку та ерозії в залежності від крутизни схилу (рис. 5).

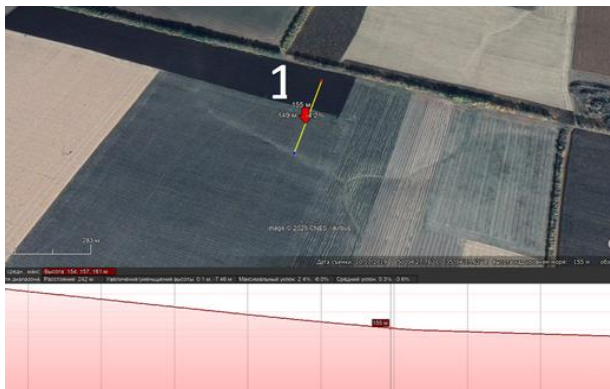


Рис. 5 – Відрізок № 1

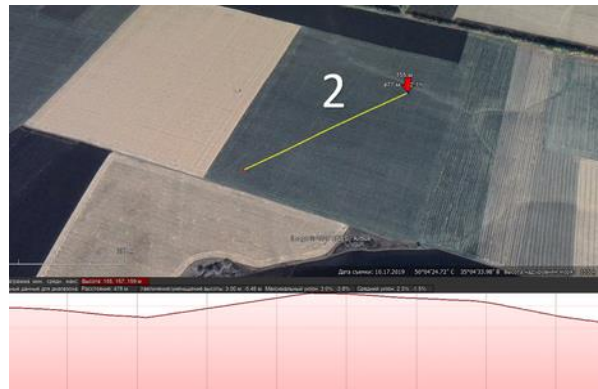


Рис. 6 – Відрізок № 2

Другий відрізок є найдовшим і становить 584 метри. Він складається з трьох частин, де кут нахилу коливається від повністю горизонтального 0% до 1,65%. Цей відрізок дозволяє проаналізувати вплив досить пологого рельєфу на процеси стоку води та розмиву ґрунту (рис. 6).

Третій відрізок має довжину 378 метрів і складається з двох частин. Одна частина характеризується крутим нахилом 3,0%, тоді як інша є більш пологою — 0,9%. Така контрастність кутів нахилу дає змогу розглянути різні сценарії водної ерозії на межі різних рельєфних умов (рис. 7).



Рис. 7 – Відрізок № 3

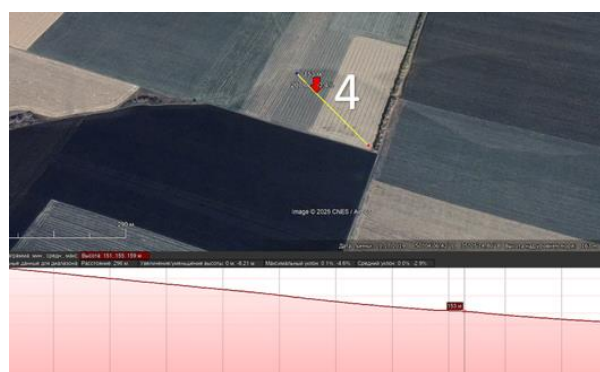


Рис. 8 – Відрізок № 4

Четвертий відрізок, довжиною 285 метрів, має кут нахилу 2,81%, що є середнім показником для цієї території. Цей відрізок слугує для вивчення ерозійних процесів на помірно крутих схилах (рис. 8).

Зібрані дані про рельєф дозволили не лише детально оцінити потенційні ризики водної ерозії на кожному із зазначених відрізків, а й зрозуміти закономірності розподілу стоку води, концентрації ерозійних втрат та їх залежність від крутизни і довжини схилів. Аналіз рельєфу у поєднанні з фізико-хімічними параметрами ґрунтів є ключовим для розробки ефективних агротехнічних заходів, які зможуть мінімізувати втрати ґрунту і забезпечити стійке використання земельних ресурсів на території дослідження.

2.2 Методика моделювання процесів водної ерозії

Для моделювання процесів водної ерозії на сільськогосподарській ділянці, розташованій у Харківському районі Харківської області, було використано програмний комплекс Water Erosion Prediction Project (WEPP), призначений для роботи в середовищі Windows. У дослідженні застосовувалися методи математичного моделювання та прогнозування, які забезпечують точну оцінку ерозійних процесів і їхнього впливу на ґрунтову структуру.

Програма WEPP має широкі функціональні можливості для моделювання різноманітних ландшафтів, зокрема схилів і малих водозбірних площ. Це дозволяє детально відтворювати рельєф, характеристики ґрунтів, типи рослинного покриву та агротехнічні заходи, що впливають на рівень ерозії. Користувач має змогу повністю контролювати вхідні параметри моделі та адаптувати їх до реальних умов конкретної території.

Зручні веб-інтерфейси забезпечують швидкий доступ до вбудованих баз даних, які містять інформацію про ґрунти, кліматичні характеристики та агрофони. Це дає змогу швидко налаштувати модель для прогнозування ерозійних процесів з урахуванням місцевих природних і господарських особливостей.

На рисунку 9 представлено головне вікно програми, що використовувалась для побудови моделі водної ерозії. Саме через цей інтерфейс виконується запуск симуляцій та налаштування параметрів, які визначають результати моделювання.

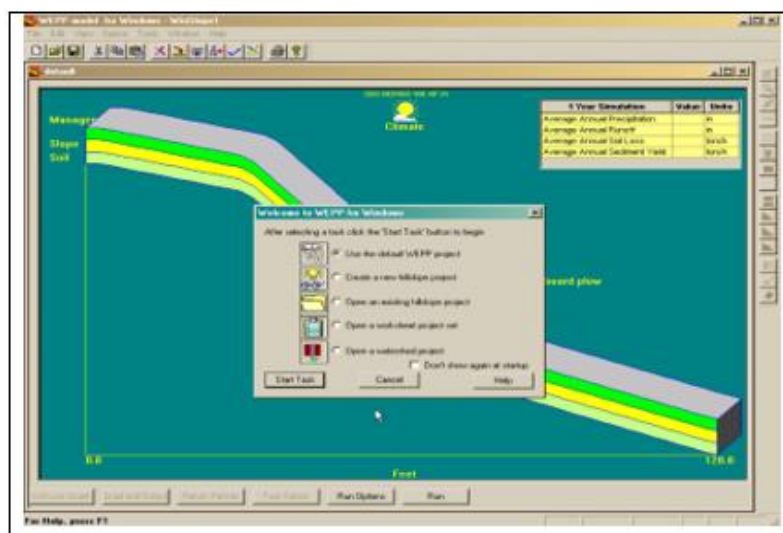


Рис. 9 – Загальний вигляд екрану запуску WEPP

Початковий екран програми WEPP дає змогу користувачу обрати між запуском стандартного проєкту або використанням інших функцій, таких як створення нового проєкту, відкриття вже збережених файлів чи пакетної групи проєктів [21].

Після визначення типу проєкту користувач переходить до графічного інтерфейсу, де відображається профіль схилу з поділом на окремі ділянки. Тут також відкривається доступ до баз вхідних даних і до інструментів для перегляду отриманих результатів (рис. 10).

Запуск моделі WEPP відбувається після внесення всіх необхідних параметрів за допомогою кнопки «Run», розташованої в нижній частині екрана. Після завершення розрахунків результати виводяться у вигляді таблиці у правому верхньому куті інтерфейсу. Програма враховує широкий спектр факторів, що спричиняють ерозійні процеси. Перед початком роботи користувач має обрати одиниці вимірювання – у цьому дослідженні застосовувалась метрична система.

Розділ «Рельєф» містить дані, що дозволяють докладно описати форму схилів за наявності інформації про їх довжину (у метрах) і крутизну (у відсотках). Розрахунок ерозійного змиву проводиться по профілях, які прокладаються по напрямках стоку води – від верхніх точок схилу до нижніх, перпендикулярно до горизонталей. Для цього зазвичай використовуються топографічні карти з масштабом від 1:10 000 до 1:25 000 [22].

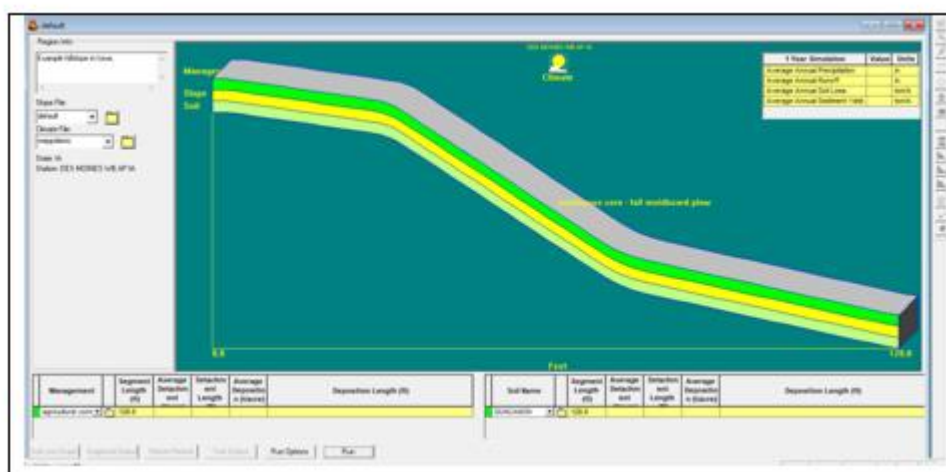


Рис. 10 – Графічне зображення профілю схилу з різними областями

Блок «Ґрунт» відповідає за характеристику ґрунтового покриву досліджуваної території, зокрема за його протиерозійну здатність, що є ключовим параметром у моделюванні процесів водної ерозії. Інтерфейс екрану «**Soil Database Editor**», на якому відображається наявна інформація про ґрунт, представлено на рис. 2.6 [28].

У верхній частині редактора розміщено загальні відомості про ґрунт, де зазначаються його основні характеристики. Нижня частина містить таблицю для введення кількісних показників, таких як потужність горизонту, вміст глинистих часток, органічної речовини, піску, кам'янистість, а також смність катіонного обміну. Усі ці дані вводяться вручну для кожного типу ґрунту, що дозволяє максимально точно адаптувати модель до реальних умов конкретної ділянки.

Блок «Клімат» є ще одним важливим компонентом програмного комплексу WEPP. Його призначення полягає у моделюванні кліматичних умов, які

безпосередньо впливають на ерозійні процеси — насамперед це інтенсивність та частота опадів, температурний режим, швидкість вітру та інші атмосферні фактори, що можуть змінюватися упродовж року.

Користувач вводить у відповідні поля дані про середню кількість опадів, температуру повітря, швидкість вітру та інші показники, які формують водний режим території. Ця інформація необхідна для оцінки стоку, інфільтрації води та рівня ґрунтового змиву, а також для визначення ефективності впроваджених протиерозійних заходів. Інтерфейс блоку дозволяє як імпортувати дані з готових кліматичних баз, так і вводити їх вручну.

Окрім того, у цьому блоці можна проаналізувати сезонну динаміку опадів та оцінити її вплив на розвиток ерозії. На рис. 2.8 продемонстровано інтерфейс блоку, який ілюструє введення даних та надає доступ до додаткових функцій — наприклад, до налаштування інтенсивності опадів з урахуванням географічних і кліматичних відмінностей конкретної місцевості.

У верхній частині спливаючого вікна користувач бачить перелік доступних метеостанцій і штатів США, з яких можна обрати джерело кліматичних даних для моделювання. Проте адаптованої метеобазы для України наразі не передбачено. У зв'язку з цим під час дослідження в межах Харківської області було застосовано стандартні кліматичні дані, що відповідають зливам із імовірністю 10% — тобто таким, що трапляються приблизно раз на десять років. Хоча такий підхід не забезпечує повної відповідності місцевим умовам, він дозволяє здійснити попереднє оцінювання ризиків.

Для підвищення точності прогнозів у подальших дослідженнях доцільно використовувати метеодані, адаптовані до українських кліматичних умов. Це сприятиме більш достовірному моделюванню стоку, інтенсивності злив та ризиків ерозійного руйнування ґрунтів.

РОЗДІЛ 3 РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ ВОДНОЇ ЕРОЗІЇ ҐРУНТІВ

У цьому дослідженні ми провели моделювання процесів водної ерозії ґрунтів для чотирьох різних відрізків території, що репрезентують характерні ділянки сільськогосподарських угідь, які відрізняються за рельєфом, структурою ґрунтів і іншими фізико-географічними характеристиками. Метою моделювання було кількісно оцінити рівень ерозійних втрат і визначити, які відрізки є більш уразливими до ерозійних процесів унаслідок сильних злив.

Ми задали параметри зливого дощу — обсяг зливи становив 55 мм для кожного відрізка. Цей показник відображає інтенсивність атмосферних опадів, яка могла б викликати поверхневий стік води з полів. Було прийнято, що така кількість опадів характерна для потужної короткочасної зливи, яка потенційно може спричинити значне змивання ґрунтового покриву.

На кожному з відрізків був розрахований обсяг поверхневого стоку, тобто кількість води, яка не інфільтрується в ґрунт, а стікає по поверхні, маючи ерозійну здатність. Цей показник коливався від 24,32 мм до 24,68 мм, що свідчить про близькі, але не ідентичні умови стікання води — імовірно, через відмінності в ґрунтах, ухилі місцевості або ступені ущільнення поверхні.

Цей параметр показує, скільки ґрунту було втрачено з одиниці площі (в $\text{кг}/\text{м}^2$) внаслідок дії потоку води на місці. Найбільші ерозійні втрати ($0,034 \text{ кг}/\text{м}^2$) були зафіксовані на трьох з чотирьох відрізках, що може вказувати на спільні чинники — наприклад, відносно крутий схил, слабку структуру ґрунту або відсутність рослинного покриву.

Цей параметр показує, скільки ґрунту було втрачено з одиниці площі (в $\text{кг}/\text{м}^2$) внаслідок дії потоку води на місці. Найбільші ерозійні втрати ($0,034 \text{ кг}/\text{м}^2$) були зафіксовані на трьох з чотирьох відрізках, що може вказувати на спільні чинники — наприклад, відносно крутий схил, слабку структуру ґрунту або відсутність рослинного покриву.

Відрізок 1 характеризується середнім рівнем ерозійної небезпеки. Обсяг зливи склав 55 мм, а обсяг поверхневого стоку — 24,59 мм, що свідчить про значну

частину опадів, яка не була поглинута ґрунтом. Ерозійні втрати ґрунту становили $0,034 \text{ кг/м}^2$, що є типовим показником для відкритої поверхні з незначним захистом. Транзитні втрати ґрунту склали $0,251 \text{ т/га}$, що вказує на помірне переміщення ґрунтових мас за межі ділянки. Цей відрізок потребує спостереження й оптимізації агротехнічних заходів з урахуванням збереження водно-фізичних властивостей ґрунту (рис. 11).

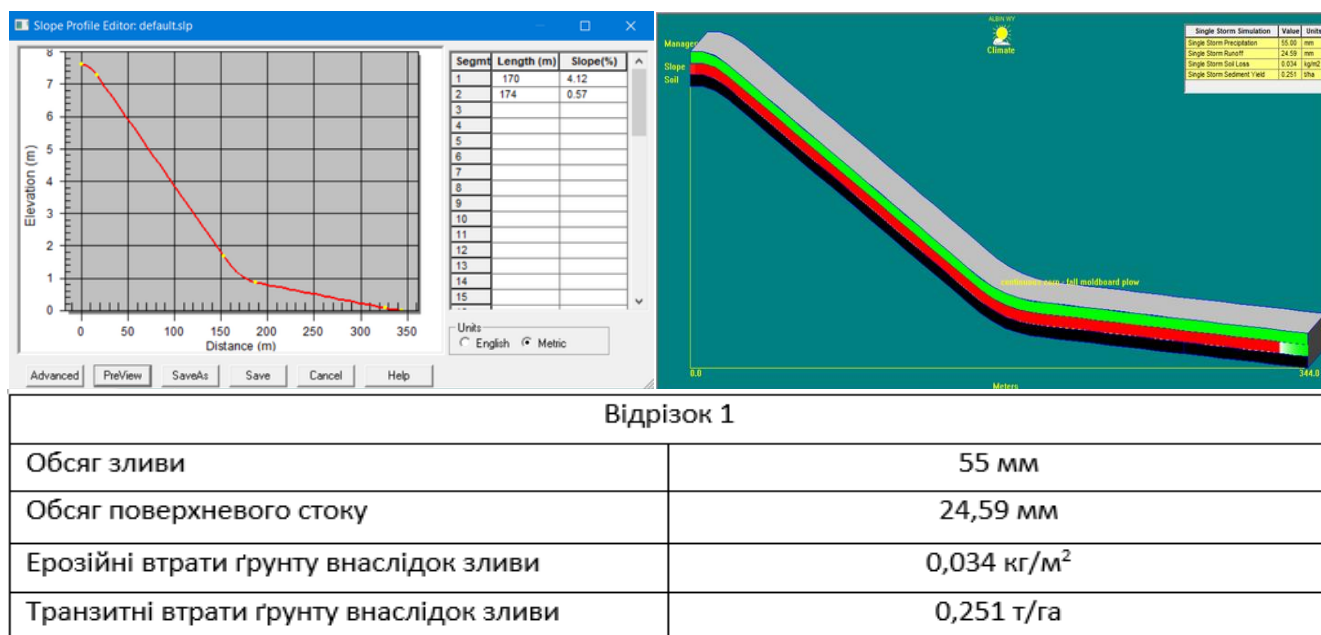


Рис. 11 - Результати моделювання ерозійного процесу на відрізку 1

Відрізок 2 виявився найменш ерозійно активним серед досліджених. Незважаючи на такий самий обсяг зливи — 55 мм, поверхневий стік був трохи нижчим — 24,32 мм. Ерозійні втрати склали лише $0,030 \text{ кг/м}^2$, а транзитні втрати — $0,175 \text{ т/га}$, що є найнижчим значенням серед усіх чотирьох ділянок. Це може свідчити про більш сприятливі умови: пологіший рельєф, стабільну структуру ґрунту або наявність залишків рослинності, що знижують інтенсивність змиву. Цей відрізок можна розглядати як зразковий з погляду природної стійкості до водної ерозії (рис. 12).

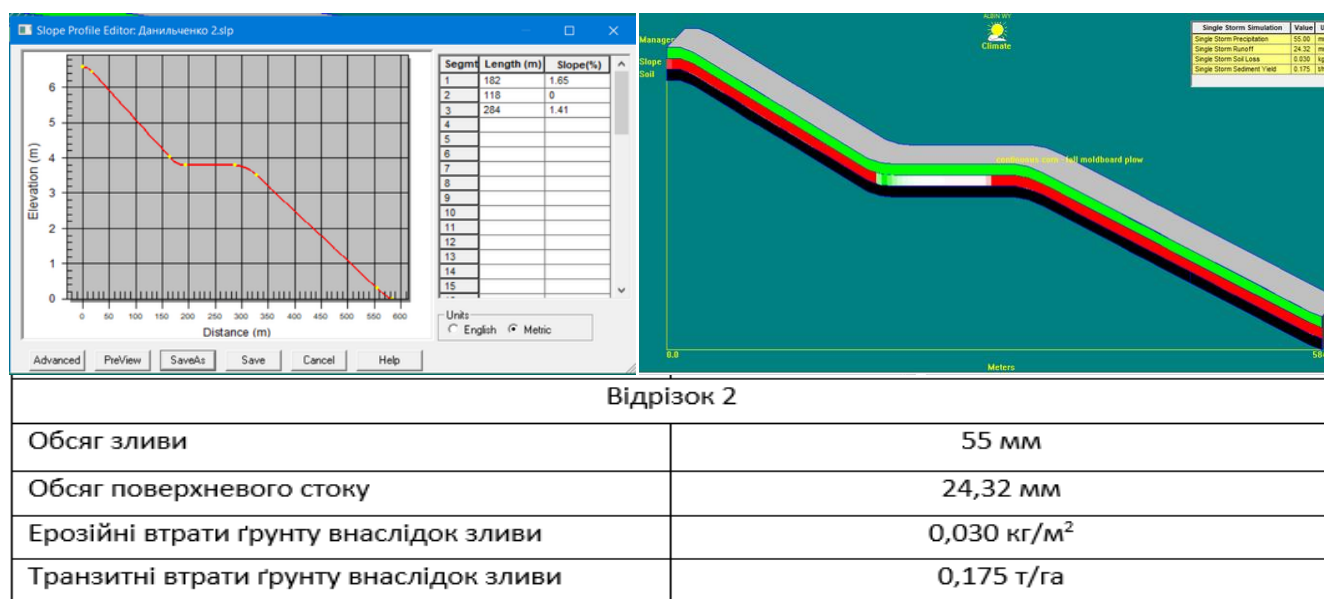


Рис. 12 - Результати моделювання ерозійного процесу на відрізку 2

Відрізок 3 демонструє підвищену ерозійну активність. Хоча обсяг зливи й поверхневого стоку (24,59 мм) аналогічний до відрізка 1, транзитні втрати ґрунту тут значно більші — 0,335 т/га. Це свідчить про те, що ґрунт легко змивається й активно транспортується водою за межі ділянки. Ерозійні втрати залишаються на рівні 0,034 кг/м², але висока транзитність вказує на те, що рельєф, можливо, має більш крутий ухил або лінійні форми розмиву, які сприяють переміщенню частинок. Відрізок потребує першочергового втручання для зменшення ерозійних процесів (рис. 13).

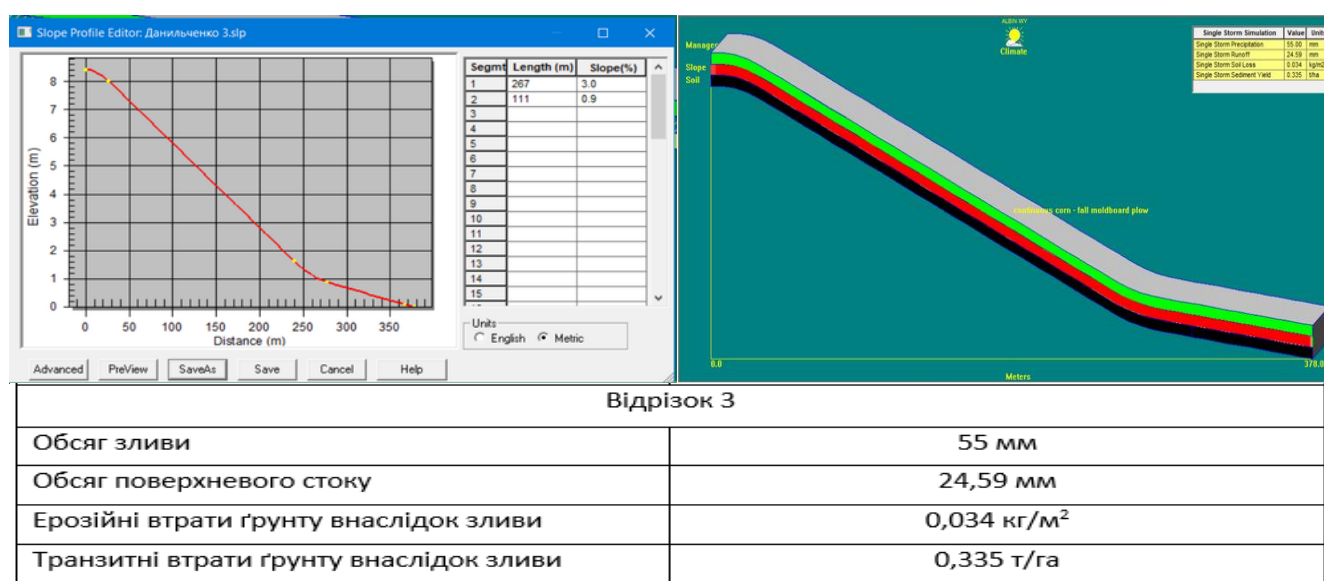


Рис. 13 - Результати моделювання ерозійного процесу на відрізку 3

Відрізок 4 також знаходиться в зоні високої ерозійної небезпеки. Поверхневий стік тут найвищий серед усіх відрізків — 24,68 мм, а транзитні втрати ґрунту досягли максимального значення — 0,337 т/га. Ерозійні втрати становлять 0,034 кг/м², як і на двох інших більш ерозійно вразливих ділянках. Це свідчить про недостатню стійкість ґрунту до гідродинамічного впливу та про те, що ця ділянка, ймовірно, має несприятливе поєднання крутизни, текстури ґрунту та можливої відсутності протиерозійних заходів. Необхідне запровадження ґрунтозахисних технологій, таких як залуження, контурна оранка або впровадження мульчування (рис. 14).

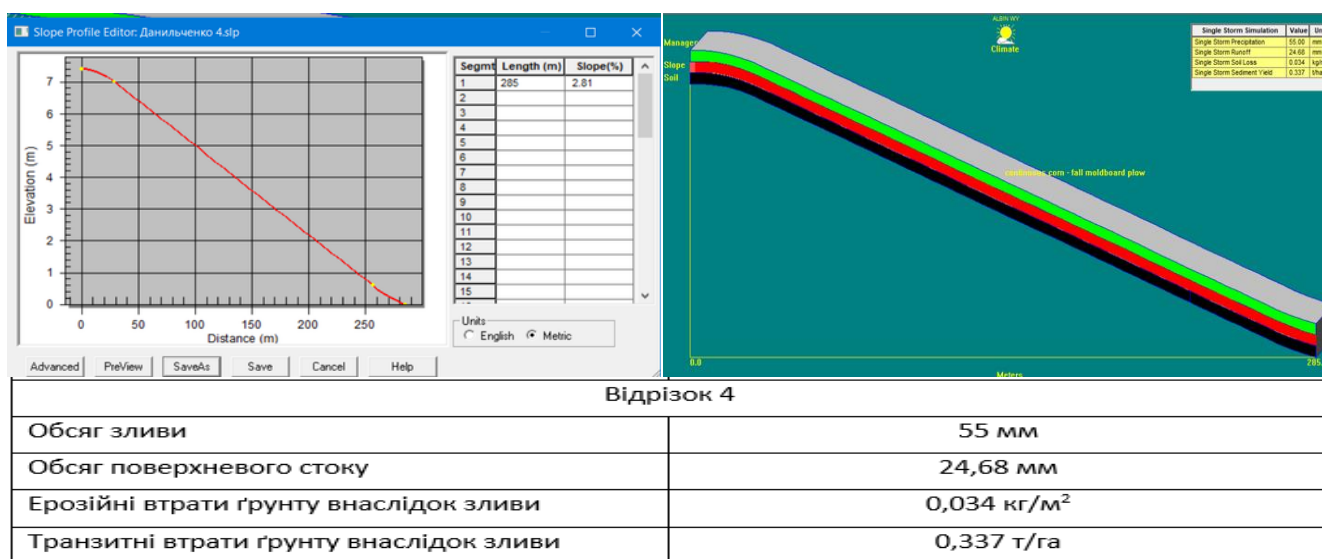


Рис. 14 - Результати моделювання ерозійного процесу на відрізку 4

Загальний аналіз результатів моделювання ерозійних процесів на чотирьох відрізках дозволяє зробити кілька важливих висновків. Незважаючи на однакові кліматичні умови (обсяг зливи 55 мм на всіх ділянках), рівень ерозійних і транзитних втрат суттєво відрізняється. Це свідчить про значний вплив локальних факторів — таких як рельєф, тип ґрунту, рослинний покрив, крутизна схилів і характер землекористування — на інтенсивність водної ерозії. Зокрема, другий відрізок демонструє мінімальні втрати ґрунту, що може бути пов'язано з кращим природним захистом або меншою інтенсивністю використання земель. Натомість третій та четвертий відрізки виявилися найбільш уразливими — з максимальними значеннями транзитних втрат ґрунту.

Такі результати підтверджують доцільність застосування диференційованого підходу до боротьби з ерозією залежно від конкретних умов ділянки. Найбільш ерозійно-небезпечні території потребують першочергового впровадження комплексу ґрунтозахисних заходів. Серед них особливо актуальними є: залуження схилів, впровадження контурної (поперечно-схилової) оранки, створення протиерозійних лісосмуг, мульчування поверхні, використання сидератів та мінімізація обробітку ґрунту. У перспективі, поєднання моделей просторового аналізу та польових досліджень дає змогу ефективно прогнозувати ризики водної ерозії та формувати обґрунтовану стратегію сталого використання агроландшафтів.

Одним із ефективних ґрунтозахисних заходів, який заслуговує на особливу увагу, є впровадження багаторічних насаджень. Цей метод дає змогу суттєво знизити ризики водної ерозії, особливо на схилових землях та в умовах інтенсивного використання сільськогосподарських угідь. Багаторічні рослини — як плодові культури, так і енергетичні, декоративні або кормові види — мають добре розвинену кореневу систему, яка не тільки ущільнює ґрунт і зменшує його змивання, але й покращує його структуру, аерацію та здатність до вологозбереження.

Крім того, багаторічні насадження постійно вкривають поверхню землі, що зменшує вплив дощових крапель на ґрунт, знижує інтенсивність поверхневого стоку і сприяє більш рівномірному просочуванню вологи. У випадках, коли насадження формуються у вигляді смуг уздовж горизонталей або контурів схилів, вони можуть виконувати функцію природного бар'єру, який затримує змивні маси ґрунту і сприяє його накопиченню, тобто фактично зупиняє розвиток ерозійних процесів.

Таким чином, впровадження багаторічних насаджень на ерозійно небезпечних ділянках не тільки сприяє збереженню ґрунтового покриву, але й підвищує агроекологічну стійкість території, забезпечує додаткове джерело продукції (фрукти, корм, деревина), покращує мікроклімат, а також сприяє

біорізноманіттю. Такий підхід є довгостроковим і екологічно обґрунтованим рішенням у системі сталого землекористування.

Після проведення моделювання фактичного стану ерозійних процесів ми здійснили повторне моделювання з урахуванням одного з ґрунтозахисних заходів — висіву багаторічних трав. Це дало змогу оцінити ефективність даного заходу шляхом порівняння отриманих результатів зі значеннями, зафіксованими у початковій моделі. Зокрема, аналіз показав зменшення як обсягів поверхневого стоку, так і ерозійних та транзитних втрат ґрунту на кожному з відрізків.

Відрізок 1. За умов посіву багаторічних трав обсяг зливи залишився незмінним — 55 мм, однак обсяг поверхневого стоку зменшився до 20,53 мм, що є суттєво нижчим за показник фактичного стану. Ерозійні втрати ґрунту знизилися до 0,024 кг/м², а транзитні — до 0,075 т/га, що свідчить про майже трикратне зменшення втрат у порівнянні з початковими даними (рис. 15).

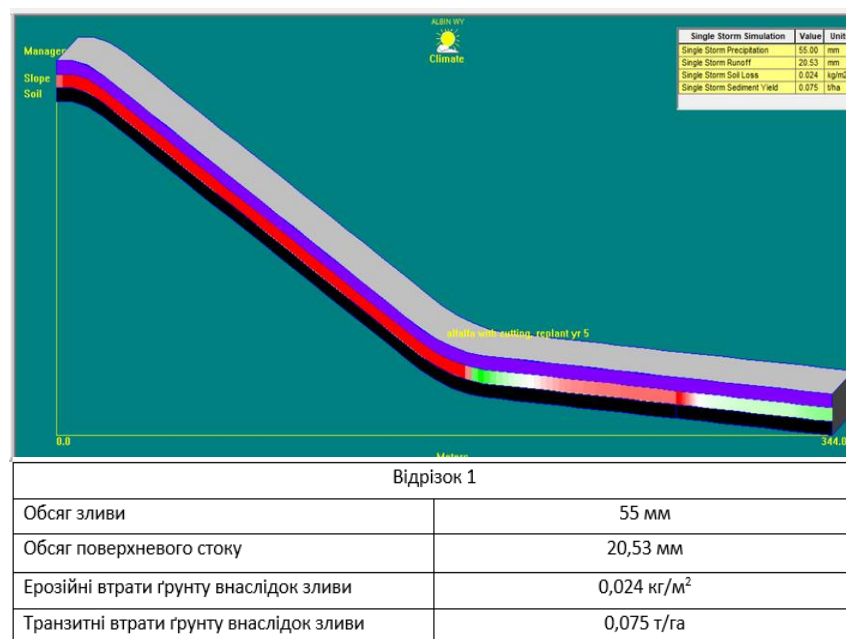


Рис. 15 - Результати моделювання ерозійного процесу на відрізку 1 (після рекомендацій)

Відрізок 2. Після впровадження заходу обсяг поверхневого стоку становив 20,27 мм, а ерозійні втрати зменшилися до 0,025 кг/м². Транзитні втрати ґрунту також знизилися — до 0,145 т/га, що підтверджує позитивний ефект заходу на даній ділянці (рис. 16).

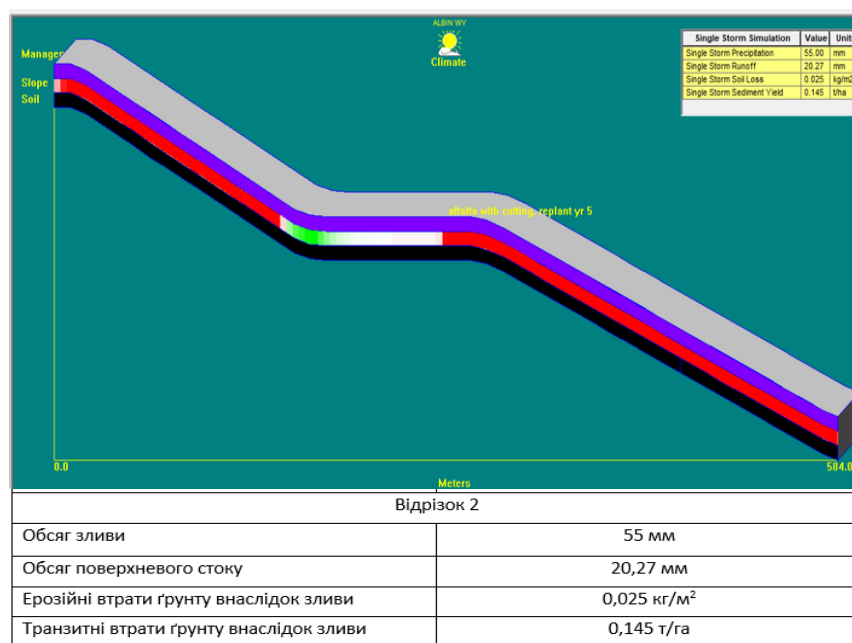


Рис. 16 - Результати моделювання ерозійного процесу на відрізку 2 (після рекомендацій)

Відрізок 3. Обсяг стоку в умовах захисного покриття з багаторічних трав склав 20,53 мм, ерозійні втрати ґрунту зменшилися до 0,026 кг/м², а транзитні — до 0,148 т/га. Зменшення показників втрат вказує на стабілізацію ґрунту та уповільнення ерозійних процесів (рис. 17).

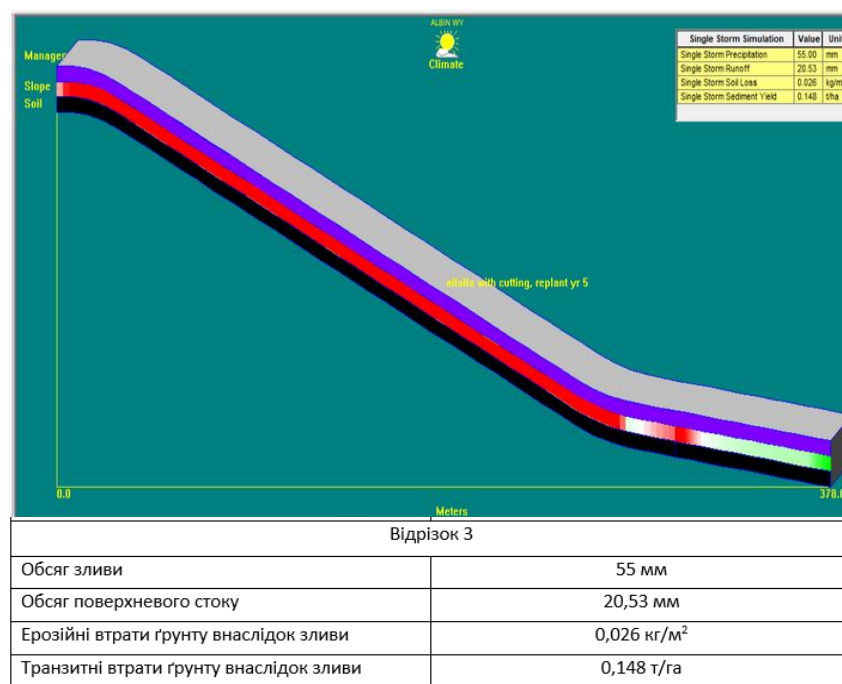


Рис. 17 - Результати моделювання ерозійного процесу на відрізку 3 (після рекомендацій)

Відрізок 4. Незначне зменшення обсягу поверхневого стоку до 20,62 мм, а також зниження ерозійних втрат до 0,028 кг/м² і транзитних втрат до 0,279 т/га демонструють, що навіть на ділянках з вищими початковими втратами впровадження багаторічних насаджень може мати значний ґрунтозахисний ефект (рис. 18).

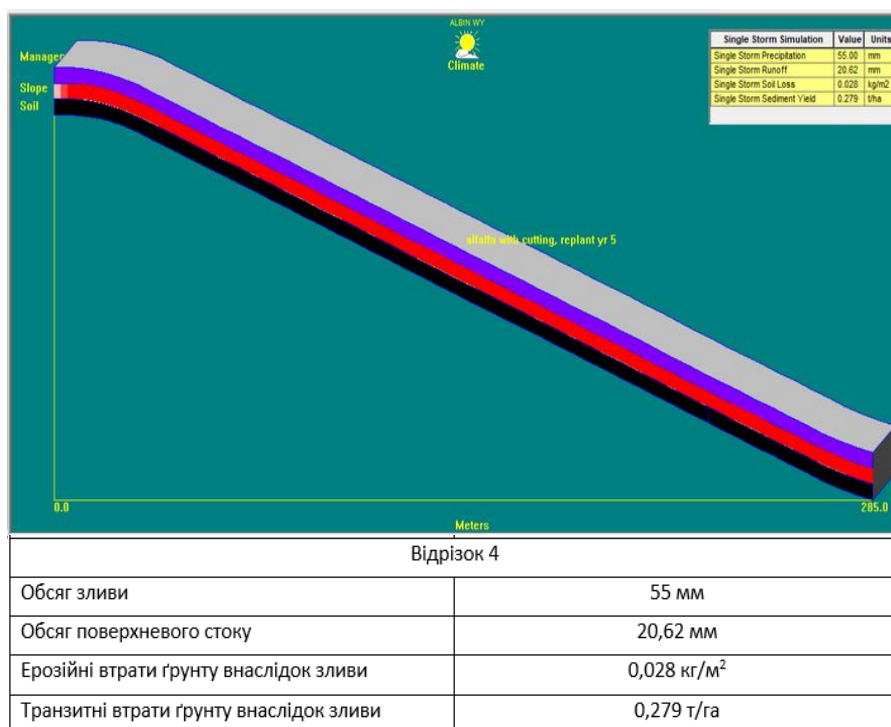


Рис. 18 - Результати моделювання ерозійного процесу на відрізку 4 (після рекомендацій)

Загалом отримані результати підтверджують ефективність застосування багаторічних трав як одного з найдієвіших заходів боротьби з водною ерозією. Зменшення інтенсивності поверхневого стоку, стабілізація ґрунтового покриву та зниження втрат ґрунту вказують на доцільність впровадження таких заходів на ерозійно небезпечних ділянках. Це є важливим етапом у формуванні стратегії сталого землекористування та збереження родючості українських земель.

На рис. 20-22 наведено дані, згруповані у вигляді графіків, які наочно демонструють зміну основних показників до та після впровадження посіву багаторічних трав.

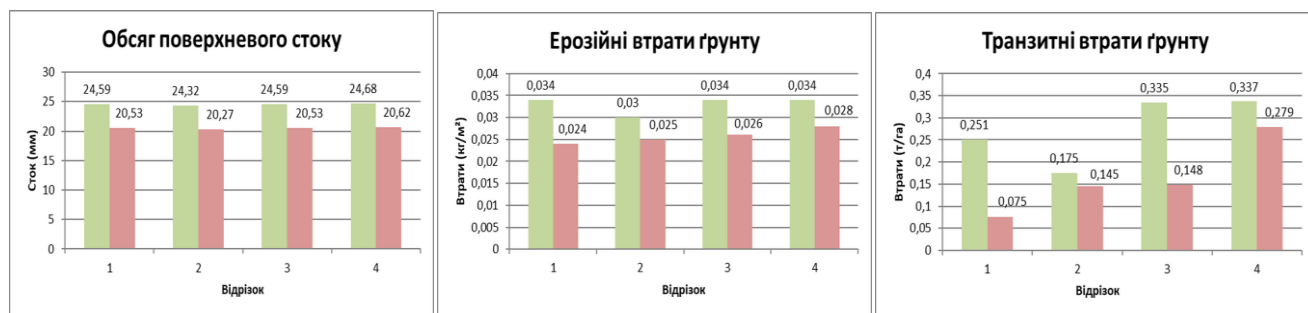


Рис. 20 - 22 - Графічне зображення змін впливу ерозії на ґрунти після застосування рекомендацій

Чітко простежується загальна тенденція до зменшення поверхневого стоку, а також ерозійних і транзитних втрат ґрунту на всіх чотирьох досліджених відрізках. Найбільш виражений позитивний ефект спостерігається на Відрізку 1, що свідчить про доцільність впровадження такого ґрунтозахисного заходу саме на ділянках з високим ризиком розвитку ерозійних процесів.

Загалом результати моделювання підтверджують, що застосування багаторічних трав є ефективним і екологічно обґрунтованим методом зниження інтенсивності водної ерозії в умовах Краснокутської ОТГ, сприяючи збереженню ґрунтового покриву та підвищенню стійкості агроландшафтів.

ВИСНОВКИ

На основі отриманих результатів моделювання можна сформулювати низку обґрунтованих практичних рекомендацій, що мають важливе значення для зменшення інтенсивності водної ерозії ґрунтів у межах Краснокутської територіальної громади.

Насамперед, модель WEPP продемонструвала високу ефективність як інструменту оцінки ерозійних процесів. Завдяки її застосуванню стало можливим не лише візуалізувати проблемні ділянки, а й провести кількісний аналіз, що враховує рельєф місцевості, кліматичні умови, характеристики ґрунту та особливості агротехнічного обробітку. Це дозволяє приймати науково обґрунтовані управлінські рішення, спрямовані на захист ґрунтів.

Одним із ключових висновків, що випливають з моделювання, є ефективність запровадження багаторічних трав як ґрунтозахисного заходу. Після зміни агрофону з традиційного чорного пару на покрив багаторічних трав, на всіх досліджених відрізках спостерігалось суттєве зменшення поверхневого стоку, прямих ерозійних втрат ґрунту, а також транзитних втрат, які мають довгостроковий негативний ефект на родючість земель. Наприклад, на Відрізку 1 втрати зменшилися майже на 70 %, що є переконливим доказом доцільності використання цього заходу, особливо на схилових землях.

Ще один важливий аспект — вплив рельєфу. Моделювання підтвердило, що крутіші та довші схили мають значно вищий рівень ерозійного навантаження. Проте навіть на таких ділянках запровадження покривної рослинності забезпечило зниження втрат ґрунту на понад 50 %, що підкреслює необхідність комплексного підходу до землекористування — із урахуванням як природних умов, так і типу агротехнологій.

Крім того, результати моделювання свідчать про доцільність зміни традиційних практик обробітку ґрунту. Зокрема, відмова від обробітку вздовж схилів на користь контурного землеробства (обробіток у напрямку горизонталей рельєфу) також може дати помітний ефект у зменшенні ерозії.

На основі всього вищезазначеного можна запропонувати такі практичні рекомендації для господарств Краснокутської ОТГ:

1. Впроваджувати сівозміни з багаторічними травами, особливо на ерозійно небезпечних схилах.
2. Уникати використання чорного пару на чутливих ділянках — він суттєво підвищує ризик ерозії.
3. Перейти на контурний обробіток, який зменшує швидкість поверхневого стоку та відповідно — втрати ґрунту.
4. Регулярно застосовувати моделі типу WEPP для моніторингу та прогнозування ситуації, виявлення критичних зон і адаптації заходів залежно від природних умов і погодних змін.

Таким чином, проведене дослідження підтвердило, що комплексна оцінка ризику ерозії має ґрунтуватися не лише на спостереженнях, а й на точному кількісному моделюванні, що дозволяє не просто зафіксувати факт деградації, а й вчасно запобігти її розвитку. Такі підходи сприяють збереженню родючості ґрунтів, сталому веденню сільського господарства та довгостроковій екологічній рівновазі агроландшафтів в умовах посилення кліматичних викликів і зміни господарських стратегій.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Швець В. С., Ященко П. Т., Зозуля А. І. *Ґрунтозахисне землеробство*. Київ: Агроосвіта, 2019.
2. Morgan R. P. C. *Soil Erosion and Conservation* (3rd ed.). Blackwell Publishing, 2005.
3. Негрей М. Г. *Водна ерозія ґрунтів: оцінка, моделювання, управління*. Харків: ХНАУ, 2021.
4. Мартинюк О. В. *Ерозія ґрунтів та заходи боротьби з нею*. Київ: НАУ, 2017.
5. Pimentel D. Soil erosion: A food and environmental threat // *Environment, Development and Sustainability*. 2006. Vol. 8, № 1. P. 119–137.
6. FAO. *Status of the World's Soil Resources*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2015.
7. Pimentel D. Soil erosion: A food and environmental threat // *Environment, Development and Sustainability*. 2006. Vol. 8, № 1. P. 119–137.
8. Favis-Mortlock D. *Modelling Soil Erosion by Water*. Springer, 2017. — 212 p.
9. Nearing M. A. Process Studies of Hillslope Erosion // *Journal of Soil and Water Conservation*. 2001. Vol. 56, № 4.
10. Bazzoffi P., Fantechi R., Guerri G. *Land Degradation and Desertification in Europe*. Wiley, 2010. — 382 p.
11. FAO. *Status of the World's Soil Resources*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2015. — 650 p.
12. Morgan R. P. C. *Soil Erosion and Conservation*. 3rd ed. Blackwell Publishing, 2005. — 304 p.
13. Adhikari B., Nadella K. Ecological economics of soil erosion: a review of the current state of knowledge. *Annals of the New York Academy of Sciences*. 2011. Vol. 1219(1). Pp. 134–152. <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.2010.05910.x>.
14. Bakker M. M., Govers G., Jones R. A., Rounsevell M. D. A. The Effect of Soil Erosion on Europe's Crop Yields. *Ecosystems*. 2007. Vol. 10(7). Pp. 1209–1219. <https://doi.org/10.1007/s10021-007-9090-3>.

15. Dennis C. Flanagan, James R. Water Erosion Prediction Project (WEPP) : Windows Interface Tutorial. Indiana, 2002. 75 p.
16. Kucher A. Sustainable soil management in the formation of competitiveness of agricultural enterprises: monograph. Plovdiv: Academic publishing house «Talent», 2019. 444 p. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.19554.07366>.
17. Kucher A. Economics of soil erosion in Ukraine. Proceedings of the Global Symposium on Soil Erosion (c. Rome, 15–17 May 2019). Rome: FAO, 2019. Pp. 628–632
18. Nearing, M. A., Pruski, F. F., & O'Neal, M. R. (2004). Expected climate change impacts on soil erosion rates: A review. *Journal of Soil and Water Conservation*, 59(1), 43–50. <https://doi.org/10.2489/jswc.59.1.43>
19. Flanagan, D. C., & Nearing, M. A. (1995). USDA Water Erosion Prediction Project: WEPP – Version 95.0 User Summary. USDA Agricultural Research Service. <https://www.ars.usda.gov/research/publications/publication/?seqNo115=109802>
20. Liu, B. Y., & Nearing, M. A. (1998). A GIS-based Water Erosion Prediction Project (WEPP) model for soil erosion assessment at watershed scale. *Environmental Modelling & Software*, 13(4), 377–382. [https://doi.org/10.1016/S1364-8152\(98\)00027-6](https://doi.org/10.1016/S1364-8152(98)00027-6)
21. Flanagan, D.C., Nearing, M.A. (Eds.). (1995). *USDA Water Erosion Prediction Project: Hillslope Profile Model Documentation*. NSERL Report No. 10. USDA Agricultural Research Service, National Soil Erosion Research Laboratory, West Lafayette, IN.
22. Nearing, M.A., Risse, L.M., Foster, G.R. (1989). *A process-based soil erosion model for USDA-Water Erosion Prediction Project technology*. Transactions of the ASAE, 32(5), 1587-1593. <https://doi.org/10.13031/2013.31036>
23. Zhang, X., Nearing, M.A., Zhang, Q. (2002). Application of the WEPP model to plot, field, and watershed scales. *Catena*, 47(2), 191-209. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(01\)00176-9](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(01)00176-9)
24. Foster, G.R., Flanagan, D.C., Nearing, M.A., et al. (2017). *Water Erosion Prediction Project (WEPP) Model*. In: *Encyclopedia of Soil Science*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781315116590-34>