

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

Факультет геології, географії, рекреації і туризму

Кафедра фізичної географії та картографії

До захисту допустити
Зав. кафедри _____ доцент **Анатолій БАЙНАЗАРОВ**
«_____» _____ 2025 р.

**ГЕОІНФОРМАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РОЗВИТКУ ВОДНОЇ ЕРОЗІЇ
В МЕЖАХ БОГОДУХІВСЬКОГО РАЙОНУ ХАРКІВСЬКОЇ ОБЛАСТІ
КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА БАКАЛАВРА**

Виконав: студент 4-го курсу д.ф.н,
групи ГФ- 41
спеціальність: 106 Географія
освітня програма: Фізична географія,
моніторинг і кадастр природних ресурсів
Віталій Віталійович НАЗАРЕНКО
Науковий керівник:
доцент, к.геогр.н. Наталя БУБИР

Кваліфікаційна робота захищена з оцінкою

Голова ЕК **Валентина РЕДІНА**

Секретар ЕК **Тетяна БУЛГАКОВА**
«_____» _____ 2025 р.

Харків – 2025

ЗМІСТ

ВСТУП.....	3
РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИКО-МЕТОДИЧНІ АСПЕКТИ ГЕОІНФОРМАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ЕРОЗІЙНИХ ПРОЦЕСІВ	6
1.1. Підходи до моделювання ерозійних процесів та супутніх явищ спричинених ними.....	6
1.2. Використання середовища ГІС при моделюванні втрат ґрунту від водної ерозії	12
1.3. Прогнозування змін поверхні за допомогою ГІС-моделювання.....	15
1.4. Функціонування моделей WEPP і RUSLE в ГІС- середовищі.....	19
РОЗДІЛ 2. ПРИРОДНІ ПЕРЕДУМОВИ РОЗВИТКУ ЕРОЗІЙНИХ ПРОЦЕСІВ В МЕЖАХ БОГОДУХІВСЬКОГО РАЙОНУ ХАРКІВСЬКОЇ ОБЛАСТІ.....	30
2.1. Ендогенно-геологічна будова, морфологічна характеристика рельєфу та поширеність його форм	30
2.2. Кліматичні умови території та особливості їх основних показників.....	39
2.3. Розвиток гідрологічної мережі та її вплив на формування поверхні.....	43
2.4. Закономірності поширення ґрунтового покриття.....	47
РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ ВТРАТ ҐРУНТОВОЇ МАСИ ВНАСЛІДОК ВОДНОЇ ЕРОЗІЇ В МЕЖАХ БОГОДУХІВСЬКОГО РАЙОНУ	52
3.1. Підготовка вихідних даних та симуляція ерозії за моделлю WEPP.	52
3.2. Компонування даних та побудова моделі RUSLE.....	60
3.3. Просторово-територіальний аналіз отриманих даних за різними моделями.....	68
ВИСНОВКИ.....	76
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	78

ВСТУП

Земельні ресурси є основою для багатьох сфер господарської діяльності людини. В контексті України, це перш за все агросфера, лісове господарство та житловий фонд. Посилена антропогенна експлуатація земельних ресурсів призводить до посилення та каталізації існуючих негативних наслідків впливу природних факторів на землі.

Як і будь-якому іншому виду ресурсів, земельним ресурсам притаманний свій еволюційний шлях, що залежить від низки супутніх факторів, проте якщо серед них яскраво виокремлюється людська діяльність, той чи інший ресурс буде поступово йти шляхом деградації. Не виключенням є земельні ресурси, які піддаються виснаженню через розорювання територій під посівні площі, порушення рослинних угруповань внаслідок пожеж та навмисного знищення, вирубки захисних лісових насаджень, та низки інших процесів антропогенної діяльності.

Одним з наслідків деградації земельних ресурсів є проявлення та розвиток процесів зміни вигляду поверхні спричинених флювіальними процесами, а саме водною ерозією. Водна ерозія спричиняє не лише зміну рельєфу шляхом збільшення його глибини та густоти розчленування, а й призводить до змін у фізико-хімічному складі ґрунту, як невід'ємної складової земельних ресурсів. Зазвичай дані зміни мають негативний результат, що можна загалом описати як деградацію, спричинену вимиванням поживних речовин та мікроелементів з верхнього родючого шару, і, як наслідок, призводить до поступового зменшення родючості земель та збільшення фінансових витрат на її нормалізацію.

Для можливості контролю та упередження подальшого розвитку процесів водної ерозії та її наслідків слід впроваджувати дистанційні методи моніторингу та моделювання з використанням ГІС-середовища та

технологій, що вони надають. Перш за все дослідження подібного типу слід імплементувати на територіях, що вже мають значно розчленований рельєф, тобто є сприятливими для подальшого розвитку ерозійних процесів та мають високий рівень антропогенної експлуатації території. Прикладом таких територій виступає Богодухівський район Харківської області, що і обумовлює **актуальність** дослідження.

Об'єкт дослідження: процеси водної ерозії на території Богодухівського району Харківської області

Предмет дослідження: моделювання розвитку водної ерозії в межах Богодухівського району Харківської області засобами ГІС.

Метою роботи є дослідження особливостей розвитку водної ерозії в межах Богодухівського району Харківської області та моделювання засобами ГІС змін територіально-просторового розповсюдження й інтенсивності розвитку ерозійних процесів, вираженої у абсолютних показниках втрат ґрунтової маси, на території району.

Згідно мети дослідження сформовані наступні задачі:

1. Систематизувати існуючі зарубіжні та вітчизняні підходи до моделювання ерозійних процесів та супутніх явищ спричинених ними.
2. Проаналізувати досвід застосування геоінформаційних систем для проведення моделювання інтенсивності водної ерозії та зміни поверхні нею.
3. Виокремити найбільш оптимальні для території України, з точки зору мінімальної інформаційної затребуваності, можливості реалізації в ГІС-середовищі та репрезентативності вихідних даних, моделі прогнозування втрат ґрунтової маси та детально проаналізувати особливості їх функціонування.
4. Дослідити територію Богодухівського району Харківської області з точки зору основних факторних компонентів природи, що впливають на розвиток ерозійних процесів, а саме: геологічної,

морфологічної, морфометричної, кліматичної, гідрологічної та ґрунтової характеристик.

5. Змодельовати втрати ґрунтової маси внаслідок водної ерозії в межах Богодухівського району за попередньо обраними моделями у середовищі ГІС та провести аналіз і оцінку отриманих результатів.

До основних **методів**, які були використані під час **дослідження** відносяться: аналіз та систематизація літературних джерел; індуктивний, описовий, картографічний та статистичний методи під час дослідження і опису території Богодухівського району з точки зору основних ерозійно-формуєчих факторів; методи виміру та моделювання під час побудови та обрахунку результатів за допомогою ГІС-середовищ; геоінформаційний метод під час дослідження Богодухівського району та проведення і представлення результатів моделювання; статистичний метод під час обробки отриманих результатів моделювання.

Практичні дослідницькі **результати** були **представлені** на трьох конференціях, серед яких щорічна науково-практична конференція студентів та аспірантів «Географічні дослідження: історія, сьогодення, перспективи», присвяченої пам'яті професора Г. П. Дубинського [9, 10], X Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні технології землеустрою, кадастру та управління земельними ресурсами» [11].

Структура роботи: кваліфікаційна робота містить вступ, три розділи, висновки і списку використаних джерел. Обсяг роботи складає 85 сторінок, кількість ілюстрацій – 18, з яких 10 – картографічні зображення, кількість таблиць – 4, кількість використаних джерел – 73.

РОЗДІЛ 1

ТЕОРЕТИКО-МЕТОДИЧНІ АСПЕКТИ

ГЕОІНФОРМАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ЕРОЗІЙНИХ

ПРОЦЕСІВ

1.1. Підходи до моделювання ерозійних процесів та супутніх явищ спричинених ними

Ґрунтознавці починають розробляти моделі втрати ґрунту з поля, схилу або водозбору внаслідок водної ерозії з середини 1930-х років. Утім, у другій половині 1850-х років уже були розроблені методи гідрологічного моделювання стоку води з ділянки під час дощу. Однак кількісний опис впливу певних факторів на процеси змиву та безпосередня розробка формул для відповідних розрахунків і подальшого прогнозування ерозії призвели до створення перших математичних методів розрахунку активності водної ерозії наприкінці 30-х - на початку 40-х років ХХ-го століття. Дані формули представляли залежність втрат наносів і ґрунту від площі та основних компонентів [17, 44].

Розвиток ГІС і дистанційного зондування, а також загальний технологічний прогрес сприяли каталізації обчислювальних процесів і перенесенню їхніх якостей у просторовий вимір, оскільки польові методи вимірювання ерозії ґрунтів є трудомісткими, тривалими, обмеженими в гнучкості і важко порівнюваними, тобто неефективними для своєчасного втручання, особливо в сільському господарстві. Таким чином, планувалося отримати набагато реалістичніше моделювання водної ерозії за допомогою комп'ютеризації, але не всі труднощі в цьому контексті були подолані і досягнуті, і ГІС все ще не змогли повністю розкрити свій потенціал через низку різних проблем. Безперечно, ці моделі є досить ефективними, адже

лише з їх допомогою можна виміряти швидкість ерозії в регіоні та прийняти своєчасні рішення [27, 22].

Відтак, моделювання ерозійних процесів є частиною широкого комплексу методів оцінки ерозійної небезпеки територій, складовими якого є експертна оцінка впливу ерозійних чинників на територію; бальна оцінка за безрозмірними критеріями; методика зіставлення конкретних індикаторів, що провокують ерозію [17].

Одним з первинних і наразі дещо застарілих підходів до оцінки ерозійної небезпеки регіону є бальний метод, що вимірюється у вигляді безрозмірних рангових одиниць - класів, рангів тощо. Однак така оцінка є дуже суб'єктивною, що стає очевидним ще на етапі збору кількісних показників та побудови шкал. Сукупність усіх цих факторів унеможлиблює використання цього методу для основи розрахунку [18, 20].

Найбільш відомою моделлю для оцінки втрат ґрунту в Україні є модель, розроблена Українським науково-дослідним інститутом захисту ґрунтів від ерозії (УкрНДІЗГ). Ця математично-статистична модель була розроблена на основі даних, зібраних під час штучного зрошення різних ґрунтових покривів у різних сільськогосподарських регіонах України. Безпосередніми одиницями виміру є т/га за обрану одиницю часу. Загалом модель можна назвати коефіцієнтною, оскільки саме вони є основними показниками при розрахунку. До них в першу чергу відносяться кінетична енергія дощових опадів (кДж/м^2), відсотковий вміст глини, гумусу, однорідність аграрного фону, карбонатів, фактори рельєфу - крутизна схилу, експозиція, форма, довжина та ширина схилу, а також ефективність протиерозійних заходів. Як зазначалося, сфера застосування таких моделей досить обмежена через неможливість їх застосування до різних агрокліматичних умов, оскільки генетично ці моделі походять зі штучно зрошуваних територій [18, 20].

Важливий внесок у розвиток українських моделей ерозії зробили логіко-математичні моделі поверхневого стоку, розроблені Г.І. Швебсом, тобто їх базова та модифікована версії. Як приклад, було створено розрахунковий вираз для оцінки середнього багаторічного модуля зливого стоку, виміряного в т/га/рік. Модель орієнтована на гідравлічні та ерозійні властивості ґрунту, а також на врахування характеристик рельєфу (крутизна схилу, середній ухил) та протиерозійної стійкості рослинності. Модель була розроблена для двох сезонів - літньо-осіннього та зимово-весняного. Модифікована версія включає розширену кількість параметрів, пов'язаних з впливом агротехніки та практик управління ґрунтами, седиментацією та розширенням фізичних і гідравлічних властивостей конкретного ґрунту. Практичні випробування моделі на очисних спорудах довели її досить високу надійність [18, 20].

Загалом, у роботах зарубіжних ґрунтознавців та ерозіологів існує думка, що зазвичай існує два, рідше три класи моделей водної ерозії, основними з яких є емпіричні та фізично обґрунтовані, іноді виділяють концептуальні моделі. Однак, здавна існувала і до певної міри продовжує існувати неясність щодо класифікації моделей за структурою та просторовими зв'язками [17].

Емпіричним моделям зазвичай надають перевагу, коли розрахунки мають бути виконані з низькою кількістю та якістю вхідних даних. Таким чином, разом зі швидкістю розрахунків, простотою використання та низькою вартістю реалізації, цей тип моделей забезпечує хорошу основу для поверхневого попереднього аналізу ситуації. Однак всі розрахунки можуть бути зроблені тільки для конкретного моменту часу, тому моделі є статистичними і для певної географічної області, оскільки дані, отримані за її межами, в кінцевому підсумку дадуть некоректний результат [34, 43].

За своєю природою емпіричні моделі є експериментальними, тобто вони отримані на основі вимірювань вхідних і вихідних даних, які

використовуються для знаходження математичних залежностей між вимірними змінними. Основною проблемою таких моделей є проміжні змінні, які можуть спричинити алгоритмічні помилки в обчислювальному процесі [41].

До найбільш використовуваних моделей даного типу відносяться: Модель потенціалу ерозії (EPM), Універсальне рівняння втрат ґрунту (USLE), Переглянуте універсальне рівняння втрат ґрунту (RUSLE), Метод міжвідомчого комітету Південно-Західного регіону Тихого океану (PSIAC), Загальне максимальне добове навантаження (TMDL), Модель оцінки втрат ґрунту для Південної Африки (SLEMSA), Ерозія ґрунту на схилі 30 градусів (E_{30}) [58].

Особливої уваги заслуговує (R)USLE - найпоширеніша у світі сім'я емпіричних моделей прогнозування ерозії ґрунтів, яка має понад 1 200 застосувань (станом на 2021 рік). Основою розробки всіх моделей сімейства є Універсальне або переглянуте Універсальне рівняння втрати ґрунту, яке розглядає інтенсивність ерозії як мультиплікатор низки ключових ерозійних факторів, таких як дощова ерозія, ерозія ґрунту, вплив топографічних факторів, рослинний покрив, а також сільськогосподарські практики та методи, що використовуються для зменшення інтенсивності ерозії. Таким чином, основними похідними рівняннями є: MUSLE, MOSES, SEDD, SCUAF, WaNuLCAS, RUSLE2, USLE-SDR, USLE-SDR, з різним рівнем традиційної популярності та складності використання [55, 29, 65].

Що стосується фізично обґрунтованих моделей, то це насамперед математичні та обчислювальні моделі, які базуються на визначенні окремих і конкретних процесів (подій), що підлягають моделюванню, які, в свою чергу, ґрунтуються на фундаментальних фізичних законах. Ці закони фізики в основному включають поняття збереження маси, рівняння імпульсу та енергії для потоків і течій, а також рівняння збереження маси

для наносів. Часто такі моделі не є на 100% фізично стійкими, а самі вирази є надмірно параметризованими, оскільки вони базуються на виразах, розроблених на основі емпіричних підходів і припущень. Через велику кількість параметрів та необхідність їх калібрування за результатами фактичних спостережень виникає велика кількість невизначеностей у результатах, що зробить процес збору та обробки даних громіздким та складним за обсягом та точністю [43, 26].

За допомогою фізично обґрунтованих моделей можна оцінити втрати ґрунту на невеликих територіях, оскільки процес розрахунку в основному виконується для водозбору кожного окремого потенційного потоку, що часто відповідає існуючим тальвегам або більш детальним аналогам. У кращому випадку ці під-водозбори можна максимально об'єднати у водозбори для малих річок або місцевих ярів і балок. Моделювання для одного поля або схилу також є досить поширеним, оскільки при цьому зменшується кількість необхідних даних [21].

Моделі такого типу набули значного поширення в дослідженнях інтенсивності ґрунтових втрат в Україні. Однією з них є модель (формула) Державного гідрологічного інституту, яка дозволяє розрахувати середні значення зливового та весняного стоку для схилу або водозбору в залежності від потужності дренажного шару, типу тимчасової ерозійної мережі та виду сільськогосподарського використання земель в поточному та попередніх роках. Також можна виділити логіко-математичну модель Сурмача та формули розрахунку середньорічного змиву ґрунту від танення снігу та злив Срібного. Проте всі ці варіанти не є оптимальними для використання в різних кліматичних, ґрунтових і, головне, рельєфних умовах [18, 20].

Порівняно з емпіричними рівняннями, фізично обґрунтовані менш популярні, за винятком деяких випадків, коли процес моделювання подібний до експериментального. До основних моделей з динамічними

компонентами відносяться наступні: Симуляція реагування на середовище площі водозбору неточкового джерела (ANSWERS), Калькулятор впливу ерозії на продуктивність (EPIC), Динамічна імітаційна модель вододілу (DWSM), Хімічні речовини, стік та ерозія систем управління с/г (CREAMS), Європейська модель ерозії ґрунту (EUROSEM), Система моделювання ефектів навантаження на ґрунтові води від систем управління сільським господарством (GLEAMS), Великомасштабна модель водозбору (LASCAM), Середземноморська дослідницька програма опустелювання та землекористування (MEDALUS), Загальноєвропейська оцінка ризику ерозії ґрунту (PESERA), Проект прогнозування водної ерозії (WEPP), Модель ерозії ґрунту для середземноморських регіонів (SEMMED), EROSION-2D/3D [58].

Концептуальні моделі, які все частіше виділяють в окремий кластер, зазвичай є комбінацією емпіричних і фізичних моделей і використовуються переважно для загального огляду ситуації. Ці моделі зазвичай описують загальні процеси на водозборах без пояснення взаємодії ерозійних факторів. Відносно репрезентативні параметри також отримують шляхом калібрування за даними спостережень. В результаті, ці моделі дають гіпотетичне уявлення про якісні та кількісні зміни в ерозійній системі без урахування просторових і часових параметрів. У більшості випадків за основу моделі беруться емпіричні моделі водної ерозії, такі як USLE, які проходять певний процес «концептуалізації». О.О. Світличний та А.В. П'яткова зазначають, що не існує чіткого розмежування між емпіричним та концептуальним моделюванням, а також чітких критеріїв для їх класифікації [17, 43, 63, 23]

У деяких випадках існують також гібридні (напівемпіричні) моделі, які поєднують динамічні та емпіричні методи оцінки ерозійних процесів. Структура цих моделей є фізичною або концептуальною, конфігурація у просторі та часі базується на статистичних спостереженнях та регресійних

залежностях. Функції, які виконують ці моделі, не відрізняються від попередніх типів тим, що вони також дають базове розуміння фізичних процесів, які так чи інакше впливають на поверхневий стік, зберігаючи при цьому простоту використання і невелику кількість вхідних параметрів. Основними моделями цього типу є: MMMF, THORNES, USPED, SEDNET, SPL, SEAGIS, AGWA [43, 66].

Однак, окрім класифікації, що базується на характеристиках алгоритмічних процесів побудови моделей, існує ряд інших класів та підкласів моделей, що базуються на інших ознаках. Як зазначено вище, існує розрізнення за площею, яку найкраще охоплюють розрахунки моделі, тобто за ступенем дисперсності розрізняють моделі для окремих ділянок, схилів, водозборів та ландшафтів. За часом моделювання розрізняють усереднені моделі та моделі, що базуються на конкретних подіях. Існують також дві протилежні класифікації - детерміновані та стохастичні, де перші зображують процеси, які прогнозуються без випадкових впливів, а другі враховують випадкові явища та події, але обмежуються властивостями земної поверхні та маршрутизацією потоку, але цей напрямок є досить перспективним, оскільки краще розуміння сухопутного стоку та перенесення наносів повинно розширити стохастичне моделювання, оскільки воно ближче до реальних фізичних процесів [17, 44, 53].

1.2. Використання ГІС-середовищ при моделюванні втрат ґрунту від водної ерозії

Першими спробами реалізації математичних моделей ерозії ґрунтів у ГІС-середовищі вважається представлення моделі USLE в ГІС-пакеті на основі обробки космічних знімків VICAR/IBIS тестового полігону в штаті Каліфорнія в 1983 році. З середини 90-х років ГІС-технології почали використовуватися для безпосереднього просторового застосування

значно складніших моделей, у тому числі динамічних, протягом яких основним середовищем розробки та застосування моделей можна назвати ГІС-пакет GRASS, який був основним середовищем для піонерних досліджень та інтеграції моделей у ГІС [17, 52].

ГІС-моделювання, як і звичайне математичне моделювання, досліджує просторові взаємозв'язки між відділенням, транспортуванням і відкладанням ґрунтових мас і безпосередній вплив цих процесів на еволюційний вигляд поверхні ландшафту. ГІС-моделі водної ерозії підтримують управління геоприв'язаними даними, розрахунок вхідних параметрів для різних сценаріїв, просторовий аналіз результатів моделювання та їх ефективне впровадження. Основним споживачем результатів ГІС-моделювання ерозійних процесів є аграрний сектор, який в першу чергу орієнтований на збереженні ґрунтового покриву та родючості, контролі забруднення наносами, але також вимагає сталого військового землекористування та лісового господарства, особливо після лісових пожеж [52].

На думку Світличного О.О., основною вимогою до змісту математичної моделі є адекватний опис факторів з урахуванням просторової мінливості модельованого процесу, тоді як ГІС-пакет повинен коректно створювати та обробляти всі необхідні масиви даних. При цьому, основною проблемою взаємовідносин між ГІС і моделлю на початковому етапі розвитку є запізніле поширення перших серед громадськості, оскільки у 80-90-х роках базові версії математичних моделей вже були розроблені і активно функціонували без інтеграції в ГІС-середовище. Таким чином, сформувалися три основні типи взаємодії ГІС-пакету з моделлю: залучення комерційних ГІС-пакетів до підготовки вхідних і вихідних даних моделі (ГІС виступає як доповнення до моделі); максимальне використання можливостей ГІС-пакету - підготовка вхідних

і вихідних даних та повна реалізація моделі всіма можливими способами; використання окремих ГІС-процесів та елементів для моделювання [16].

Найбільш класичним прикладом використання специфічних ГІС-інструментів є побудова та аналіз цифрових ландшафтних моделей прямого впливу морфології ґрунтів та розташування і ступеню поширення певних форм на інтенсивність ерозійних процесів, оскільки ландшафтні параметри використовуються у значній частині моделей. Класичним джерелом даних про рельєф довгий час були результати векторизації ізогіпс топографічних і загальних фізико-географічних карт, що є досить тривалим і ресурсномістким процесом, але сьогодні вчені все частіше використовують готові ЦМР з відкритим доступом, отримані в результаті різних космічних місій і проектів (SRTM, ALOS, ASTER), які набагато простіші у використанні і надають значно детальнішу інформацію про структуру рельєфу регіону [3, 8].

Щодо методів та підходів до застосування моделей прогнозування втрат ґрунтів від водної ерозії в ГІС-середовищі, то ситуація різниться залежно від типу моделі (емпірична, фізично обґрунтована) та часового масштабу моделі. Наприклад, сімейство моделей USLE, реалізованих на основних ГІС-платформах, використовує для розрахунків інструменти картографічної алгебри, що дозволяє розраховувати значення сітки для великих площ без прив'язки до водозбірних басейнів або окремих схилів. У цьому випадку кожен піксель має фіксований розмір, який є уніфікованим для всіх індикаторів, а все рівняння розраховується з використанням фіксованого значення для конкретного індикатора, і, відповідно, всі початкові розрахунки індикаторів виконуються за допомогою алгебри карт або шляхом обробки первинних даних (ЦМР, NDVI) [52, 57].

Більшість моделей ерозії ґрунтів та флювіальної еволюції рельєфу інтегровані безпосередньо в ГІС-продукти у вигляді різних надбудов,

модулів, розширень тощо, завдяки чому досягається певна автономність, оскільки збір вхідних даних може бути інтегрований у ці надбудови. Однією з перших моделей для тестування такого сценарію була GeoWEPP, розроблена зі спеціального графічного інтерфейсу користувача для Windows та інтегрована в ArcView, ArcGIS, а віднедавна і у QGIS. Крім того, велика кількість повноцінних ГІС-моделей (MapWinSWAT) або окремих функціональних блоків (ерозія лісових доріг, орних земель, пасовищ на основі WEPP) доступні і реалізовані у веб-інтерфейсі, що ще більше спрощує їх використання [52, 59].

Найновіші моделі, що використовують інтерфейси ГІС, вивчають ерозійні та седиментаційні процеси з дуже високою роздільною здатністю, використовуючи повторювані зображення поверхні від наземних сканерів LiDAR, що дозволяє створювати детальні матриці висот, хоча і не на великих площах [52].

1.3 Прогнозування змін поверхні за допомогою ГІС-моделювання

Прямим наслідком інтенсивної водної ерозії ґрунту, окрім утворення змитих ґрунтів, є розвиток процесів зміни поверхні рельєфу ландшафтів, що перш за все найяскравіше проявляється утворенням первинних еволюційних форм ярів – борозен, вимоїн та лощин. І хоч частина результатів діяльності тимчасових водотоків, так звані ефемерні яри, щорічно руйнуються та заповнюються під час обробітку ґрунту, тоді як інша частина, яка не зникає під антропогенним впливом, продовжує еволюціонувати до набуття рис повноцінного яру або балки, та перетворюються у повноцінний елемент флювіального мезорельєфу. Саме задля моніторингу подібних процесів, які вийшли з під антропогенного контролю, та прогнозування їх подальшого розвитку з часовою

перспективою в сотні років, створені моделі еволюції ландшафтів (LEM), які використовують для створення висновків про вірогідність гіпотез про еволюцію тієї чи іншої форми рельєфу [45, 64].

Найперші LEM були концептуальними, тобто представлялися у вигляді графічних діаграм еволюції рельєфу під комбінованою дією ендотекзогенезу. Перші розробки подібних рішень велися вже наприкінці 19 ст, та давали розуміння потенційного ходу еволюції поверхні, проте саме вони дали поштовх до створення сучасних розрахункових систем. Як можна зрозуміти сучасні LEM є набором математичних рівнянь інтегрованих у геоморфологічні транспортні функції [64].

Класифікація моделей зміни, або ж еволюції, поверхні ландшафтів розподілена на три основних класи: кількісні – динамічний та просторово чіткий аналіз ландшафтів та їх змін у часі за допомогою комп'ютерного програмного забезпечення; концептуальні (якісні) – словесне зображення, яке описує еволюційну послідовність розвитку ландшафту протягом геологічного часу; фізичні – акт імітації процесів, які діють у ландшафтах у зазвичай меншому просторовому та часовому масштабі. Наразі кількісне моделювання є найбільш багатофункціональним та, як результат, найбільш поширеним, через свою процедурність, описовість, постдиктивність та прогнозованість [62].

Виділяється також розподіл моделей за їх фізичним реалізмом. Так моделі з сильною фізичною основою, які базуються на обчислювальній гідродинаміці, можуть бути придатними для дослідження ландшафтів у дуже малих масштабах, де рух частинок є гіпотетичним, такими моделями є OpenFOAM, SPHysics. Таким чином, для збільшення масштабів збільшують обчислювальні витрати, проте через це дані моделі не виходять за межі малих водозборів, ярів або балок [64].

У випадку технічної реалізації моделей еволюції ландшафтів, то безпосереднє моделювання відбувається за трьома координатами поверхні,

тобто моделі тривимірними, проте не завжди справджується дана закономірність оскільки більшість LEM не використовують вертикальну вісь повністю, через що доречним є термін 2.5 D-простір [64].

Моделі еволюції ландшафтів, зазвичай використовують дані ГІС і його середовище як вхідні матеріали або платформу для їх отримання, проте безпосередні розрахунки та симуляції відбуваються у сторонньому програмному забезпеченні розробленому спеціально для забезпечення функціонування моделей. Проте в міру розвитку ГІС-середовищ, відбувається низка інтеграцій з модельним середовищем через свого роду мости, для покращеного аналізу результатів, зберігання та управління даними. Одним з таких є набір інструментів ArcEvolve для пакету ArcView, який створює графічне розширення у відповідному ГІС-пакеті для моделі SIBERIA. Слід також зауважити, що дані модельні підходять використовують досить об'ємний обсяг розрахункових параметрів, кількість яких в деяких випадках сягати сотні [52, 28].

Одним з найпопулярніших сімейств споріднених моделей LEM, є CAESAR, де оригінальна модель є клітинно-автоматною моделлю, що імітує потік води через ландшафт, річкову ерозію, відкладення наносів і ерозійні процеси на схилах пагорбів. Поточною ітерацією моделі являється CAESAR-Lisflood, яка використовує більш фізично обґрунтовану фізичну компоненту поверхневого стоку. В даній моделі враховується формування нових потоків, заповнення дна водойм алювієм і, відповідно, блокування течії та інше. Модель підходить як для водозбірних басейнів, так і для річкового русла, також в межах часового масштабу обмеження сягають тисячолітніх масштабів. Моделі CLiDE та LSDTopoTools є похідними від CAESAR, де в першому випадку вона є заснована на материнській моделі із додаванням компонентів для підземних вод, тоді як друга містить лише гідродинамічну модель на основі материнської, в той час як сама LEM

взята з іншої моделі, а саме FastScape, де підвищено ефективність маршрутизації потоку, що є слабким місцем у більшості LEM [64].

Окрім існування веб-рішень для моделювання ґрунтових втрат, існують відповідні рішення і для моделювання еволюції рельєфу. Одним з таких є модель WILSIM, яка хоч і має досить просте та наближене відображення зміни поверхні, надає розуміння того як низка змінних впливає на еволюцію ландшафтів. Слід зазначити, що дана модель, як і велика кількість подібних, робить акцент на урахуванні ендегенезу, тобто тектонічних рухів, утворенні піднять, прогинів, а також літологічному складі материнської породи [47].

Однією з унікальних моделей, є модель CHILD, яка відрізняється від багатьох інших використанням у своїй технічній реалізації трикутної нерегулярної сітки (TIN) на противагу традиційній дискретній прямокутній сітці. Представлення моделі у вигляді TIN надає перевагу у її гнучкості представленні різномасштабних особливостей ландшафтів, проте додає складності через необхідність конвертації растрових даних у TIN-формат [64].

Таким чином, окрім прогнозування динаміки розвитку яружно-балкових систем, слід звертати увагу на потенційні місця утворення ярів меншого порядку у межах водозбору першого яру, що реалізується за допомогою імовірнісних моделей, побудова яких тісно переплетена з моделями втрат ґрунту. У більшості моделей проявляється закономірність розрахунків на основі великої кількості певних ерозійних факторів, головним чином похідні дані обрахунків від ЦМР, літологічна інформація, землекористування, характеристики ґрунтового покриття, кліматичні і дренажні показники, характеристики можливого водного потоку. Проте окрім стандартних обрахунків безпосередньо в ГІС, або за допомогою вже згадуваних доповнень чи плагінів, в прогнозуванні місць розвитку ярів є напрацьовані підходи для застосування алгоритмів машинного навчання,

які покращують та збільшують продуктивність дерев класифікації для кожного можливого місця розвитку яру, що сприяє обмеженню надмірного калібрування показників моделі [56, 21].

1.4. Функціонування моделей WEPP і RUSLE в ГІС-середовищі

Для аналізу інтенсивності процесів водної ерозії було обрано дві моделі прогнозування втрат ґрунтової маси – WEPP та RUSLE. Головними причинами даного вибору є широкі можливості використання перелічених моделей в фізико-географічних та агро-кліматичних умовах України, що неодноразово доводилося, як вченими-ерозієзнавцями так і науковими інституціями, що займаються вивченням ґрунтів та ерозійних процесів. В свою чергу, іншою головною вимогою під час вибору моделі була можливість імплементувати розрахунки на територію Богодухівського району, за умов обмеженої інформації з польових вимірів, а також відсутності показників з метеостанцій [20, 2].

Проте, у випадку обох моделей зазначається необхідність проведення спеціальних додаткових досліджень та верифікації для можливості використання їх результатів в практичних цілях на території України. В свою чергу, в дослідженнях, що проводилися Ачасовим А.Б., описується модель WEPP, як достовірний компонент протиерозійного менеджменту земельних угідь у межах степової та лісостепової зон, з необхідністю стандартизації показників здатності ґрунту до ерозії в умовах України. Проте дані дослідження спрямовувалися головним чином на локальні дослідні поля та окремі земельні угіддя, що розташовані в межах схилу одного водозбору [1, 30, 2].

Модель WEPP (Проект прогнозування водної ерозії) належить до фізичних моделей для прогнозування втрат ґрунту внаслідок водної ерозії і є найбільш поширеною групою моделей. Це імітаційна модель безперервного процесу ерозії, яка може бути застосована до профілів

схилів і невеликих водозбірних басейнів. Ця модель була ініційована Службою сільськогосподарських досліджень Міністерства сільського господарства США у 1985 році для заміни широко використовуваного на той час Універсального експерименту з визначення втрат ґрунту (USLE), який був застарілим і не міг повністю задовольнити зростаючі потреби. Модель була опублікована в 1995 році як результат більш ніж 50 польових експериментів з вимірювання впливу опадів на різні ґрунти та поверхні землі.

Якщо розглядати процеси які лежать в основі WEPP, то до основних об'єктів чи явищ відносяться: клімат, інфільтрація, водний баланс, ріст рослин і розкладання залишків, обробіток ґрунту та його консолідація для прогнозування поверхневого стоку, відкладення та надходження наносів у різних часових масштабах, включаючи окремі зливи, місячні підсумки, річні підсумки або середньорічні значення, засновані на основі даних за кілька десятиліть [2].

Для зручного і зрозумілого обробітку і візуалізації вихідних результатів, для WEPP проводилася поступова інтеграція в різні графічні інтерфейси, одними з яких стали платформи ГІС, а саме ArcView 3.2, куди у 2002 році, як спеціальний плагін/розширення був інтегрований прототип Геопросторового інтерфейсу для WEPP (GeoWEPP), який дозволяв через ГІС завантажити основні параметри для моделювання – ЦМР, ґрунтовий покрив та землекористування.

Як результат еволюції, модель у влітку 2024 була інтегрована в інтерфейс QGIS в якості додаткового плагіну, теж саме стосується і ArcGIS, проте остання версія даного ПЗ для якої вийшов реліз GeoWEPP є ArcMap 10.4, що все ще робить можливим використання моделі на новіших версіях, проте виникнення різного роду помилок під час симуляцій більш ймовірно. Плагін GeoWEPP дозволяє за допомогою зрозумілого доданого

інтерфейсу інструментів реалізувати основні дії для запуску проведення моделювання втрат ґрунту.

Основним з них є модифікація розмежування мережі каналів, яка будує маршрутну мережу тальвегів на основі двох параметрів ЦМР: Critical Source Area - Критична зона джерела (CSA) та Minimum Source Channel Length - Мінімальна довжина каналу джерела (MSCL), які безпосередньо залежать від роздільної здатності моделі рельєфу. Для першого параметра значення за замовчуванням становить 5 га, тобто для формування мінімального каналу його площа водозбору повинна бути не менше 5 га. MSCL - це найкоротша відстань, яку повинен пройти канал першого порядку, щоб з'єднатися з меншим каналом, значення за замовчуванням - 100 метрів, але в будь-якому випадку значення слід обирати залежно від розміру території та характеристик ЦМР.

Оскільки GeoWEPP створена для безпосереднього моделювання втрат ґрунту у межах схилу, або водозбірного басейну, то наступною ключовою функцією є побудова цих під-водозбірних басейнів, які завжди формуються навколо тальвегу і складаються з трьох частин - лівого та правого схилів і виток (рис. 1.1).

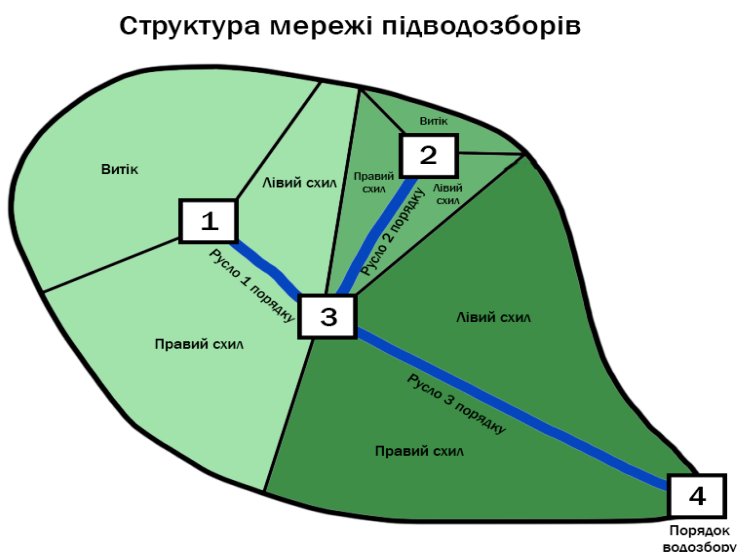


Рис. 1.1. Схематичне зображення структури водозборів при побудові WEPP (створено автором на основі даних [36])

Закінчується водозбір у тій точці на потоці, яку обирає користувач як кінцеву точку всього басейну, куди буде прямувати весь потік, його енергія і утворений седимент. Загалом ці дві дії можна вважати кінцевими, для того щоб отримати певний результат від моделювання, адже шари ґрунту, землекористування та кліматичні показники будуть згенеровані автоматично зі стандартними значеннями, тоді як показники клімату існують у вигляді бази даних про 100-річний період спостережень з метеостанцій по всій території США. Створення даних файлів відбувається в середовищі самої моделі WEPP, після чого шляхом додавання до директорії архіву плагіна та його перевстановлення, імпортується в ГІС, де його вже буде використовувати GeoWEPP.

В результаті після того як всі вимоги до початку моделювання були виконані, тобто створені всі необхідні растрові, текстові та особливі файли, можна розпочати моделювання. Існує два результуючі шляхи, які залежать від обраного методу симуляції, перший з яких це метод водозбору, де береться кожний схил пагорба водозбору, та «усереднюється» значення профіля схилу пагорба, призначається спільний ґрунт і землекористування, шляхи водних потоків комбінуються в один суцільний який буде найкраще представляти даний схил. Цифрова модель рельєфу є ключовим елементом у побудові всього процесу моделювання GeoWEPP, отже лівий і правий береги та суб-басейни витоку будуються на основі цих даних, а параметри CSA і MSCL відіграють ключову роль у визначенні басейнів. Інші морфометричні характеристики території, такі як профіль і довжина схилів, також отримуються з ЦМР і використовуються для введення даних про водозбір у WEPP, але інша інформація, наприклад, форма поперечного перерізу, може бути надана користувачем за можливості.

Після побудови «репрезентативного» профілю схилу для симуляції моделі WEPP на під-водозборі використовується інформація з ЦМР про русло потоку, враховуючи всі численні шляхи якими вода рухається до

пониження рельєфу, від комірки сітки ЦМР локально від комірки сітки з найбільшою висотою в межах під-водозбору до місця з локальним пониженням. Для кожного русла розраховується просторове розташування комірок на шляху потоку, відстань від кінцевої комірки на каналі вздовж шляху потоку та градієнт схилу на кожній комірці.

При використанні другого методу моделювання за траєкторією потоку всі значення диференціації ґрунтів і рослинності розглядаються і використовуються унікально, тобто моделювання виконується для кожного квадрата сітки. Цей метод, у кілька разів більш трудомісткий (моделювання площі 500 км² з роздільною здатністю 50х50 м зайняло близько 12 годин) порівняно з методом водозбору, але він більш точно відображає ситуацію в кожному місці на схилі, дозволяючи краще зрозуміти ситуацію, але для великих площ моделювання перший метод є кращим вибором.

RUSLE - переглянуте універсальне рівняння втрат ґрунту, розроблене в результаті численних експериментів, досліджень і вимірювань з 1930-х по 1970-ті роки. Міністерство сільського господарства США (USDA) було головним ініціатором всієї програми. Першим результатом десятиліть практичної і теоретичної роботи стало емпіричне модельне рівняння USLE, яке оцінює середньорічну швидкість водної ерозії в абсолютній масі на одиницю площі. Однак головною особливістю цієї моделі була її просторова обмеженість, оскільки вона була застосовна лише до невеликих сільськогосподарських ділянок і представляла лише територію первинних досліджень, а саме Сполучені Штати Америки.

Таким чином після випуску оновленої версії – RUSLE, наприкінці 1980-х, модель проявила більший попит серед користувачів цільової аудиторії, продемонструвавши більшу гнучкість у більшій кількості умов, завдяки поєднанню попередніх емпіричних підходів та нових процесно-

орієнтованих, що дозволило проводити моделювання без обмежень до ґрунтових сільськогосподарських угідь.

Головна мета використання даної моделі, являє собою оцінювання довгострокових ерозійних процесів площинного та борознового типу. Проте RUSLE, з моменту її створення, не передбачувалася для використання для території глибоких ярів, берегів річкових долин, або не порушених антропогенним впливом лісових масивів. На відміну від попередньо розглянутої моделі GeoWEPP, RUSLE не надає інформацію про осадонакопичення седименту, що переноситься з водозборів.

Модель-рівняння RUSLE набула значно ширшого поширення в дослідженнях різних за кліматичними та рельєфними особливостями, територій в межах України, оскільки є значно простішим у використанні та легко адаптується під будь-які умови. Також значно розширився масштаб досліджень, оскільки вони не обмежені локальними водозборами, та можуть поширюватися на великі адміністративно-територіальні одиниці, або навіть природні зони [19, 12, 15].

Рівняння даної моделі, побудоване на основі добутку цільових коефіцієнтів, що описують певні фактори природнього середовища, що впливають на показники інтенсивності втрат ґрунту, та має наступний вигляд:

$$A = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P \quad (1)$$

де A безпосередній показник втрат ґрунту на одиницю площі на рік, R – ерозійність опадів, K – піддатливість ґрунту до ерозії, LS – невимірний показник впливу довжини та крутизни схилу, C і P – невимірні показники впливу на ерозійність вирощуваних культур (типу землекористування), і технологій, що використовуються для зменшення або запобігання впливу ерозії на територію угідь.

Під поняттям ерозійність опадів, при описі R - коефіцієнта, розуміється факторність впливу опадів та штормів на ерозію ґрунту.

Загалом даний фактор є річним, тобто є середньорічною функцією, що розраховується на базі тривалих та чітких спостережень за кінетичною енергією крапель дощу протягом 30-ти хвилинної найбільшої інтенсивності, через що вимірюється в МДж·мм/га·год·р. Проте даний спосіб потребує суттєво детальних даних, що ускладнює розрахунок для менш досліджених регіонів.

Як результат було розроблено досить багато рівнянь для різних територій, з різними початковими даними та різною їх частотою. Однак у більшості випадків використовується значний часовий обсяг даних про середню та максимальну кількість опадів від 23 до 27 років. Для визначення R-фактора були використані щомісячні дані про опади, оскільки вони є більш доступними, ніж детальні дані про шторми. Відповідно до отриманих рівнянь, були створені картографічні зображення ерозійності опадів у різних регіонах, загалом це Південно-Східна Азія, США, Центральна Америка, Океанія, та інші країни тропічного поясу.

Якщо проводити виміри на мало досліджених територій, найкращим показником буде виступати абсолютний показник кількості опадів протягом року, що у ГІС-середовищі реалізується за допомогою растрових зображень, де кожний піксель комірки відповідає показнику середньої кількості опадів за період від 10 до 20 років, за для нівелювання впливу деяких посушливих або дощових років.

Переходячи до аналізу K-фактору, слід зазначити що першочергово він являє собою відображення втрат ґрунту, спричиненого низкою властивостей та характеристик. При початковій розробці даного фактору враховувалося те, що втрати ґрунту будуть відбуватися внаслідок ерозійного впливу опадів на голий, нещодавно оброблений ґрунт, що розташований на схилі без протиерозійних заходів. Чим більший показник коефіцієнта, тим вищу схильність до ерозії має той чи інший тип ґрунту.

Майже у всіх випадках рівнянь для розрахунку даного фактору використовуються такі основні показники: вміст текстурних елементів – піску, мулу, глини, органічної речовини, інколи його кислотність, водопроникність. Як і попередній показник, К-фактор має одиниці вимірювання, які мають наступний вигляд у системі СІ: $t \cdot \text{га} \cdot \text{год} / \text{га} \cdot \text{МДж} \cdot \text{мм}$. Слід також пам'ятати, що дані рівняння можуть добре себе проявляти на одних територіях, та досить не передбачувано на інших, адже не враховується регіональна особливість ґрунтів, перш за все мова йде про азональні ґрунти.

LS-фактор є комбінованим показником, що складається з довжини (L) та крутизни (S) схилу, які впливають на розвиток ерозійних вимоїн, борозен, що в свою чергу є основними носіями втрат ґрунтової маси зі схилу. Першою проблемою, що виникали при використанні LS-факторі в моделі USLE, була його обмеженість використання до складних форм рельєфу.

З розвитком ГІС-технологій стало популярним визначати коефіцієнт L S як функцію площі, що спричиняє підвищення схилу, або акумуляцію потоку по відношенню до схилу, завдяки широкому впровадженню цифрових моделей рельєфу, високої роздільної здатності, в поєднанні з ГІС-технологіями. Початкова формула для коефіцієнта L S передбачає, що схил має рівномірний градієнт, а будь-які нерівні схили потрібно розбити на менші ділянки з рівномірним градієнтом, щоб зробити формулу більш точною.

Подальші дослідження впровадили методи ГІС-технологій з роботою з растровими форматами та їх опрацювання різними інструментами, для побудови растрів акумуляції потоку, крутизни схилів та інших. На основі цих растрів і будується більшість популярних рівнянь LS-фактору. Для водозбірних або польових обстежень, ЦМР достатньої точності (~15 метрів або точніше) і використання підходу з використанням LS-фактору, який

враховує акумуляцію стоку, є більш корисним для визначення найбільш важливих чутливих ділянок для цілеспрямованих підходів в управлінні.

Коефіцієнт покриття та управління (С) визначається як відношення обсягу втрат ґрунту на землях з певним покриттям та управлінням до обсягу втрат ґрунту на «чисто обробленому пару». Першочергово коефіцієнти втрат ґрунту були отримані шляхом поєднання підфакторів наприклад, попереднього обробітку ґрунту, рослинного покриву, і шорсткості, які потім були використані в поєднанні з R-фактором для отримання С-фактора. Але даний підхід був релевантним лише для локальних територій окремих полів, адже був необхідний ретельний моніторинг всієї управлінської діяльності.

Для вирішення цієї проблеми існує інший метод визначення коефіцієнта С - нормалізований вегетаційний індекс (NDVI), який розраховується за допомогою супутникових знімків. Однією з переваг використання NDVI є те, що завдяки супутниковим знімкам дослідники можуть визначити вплив конкретної рослинності на сезонну ерозію ґрунту та визначити ключові періоди року з точки зору ризику ерозії ґрунту.

У досліджуваних районах, де кількість опадів сильно коливається протягом року, сезонна рослинність може відігравати важливу роль у збільшенні або зменшенні інтенсивності ерозії ґрунту. Також слід враховувати особливості рослинності кожного регіону та її тип, адже на деяких територіях умовні лісові масиви та луки можуть мати занадто високі значення, через що потрібно використовувати інші попередньо підібрані табличні показники для кожного типу культури або рослинного угруповання.

Коефіцієнт практик підтримки (Р) визначається як відношення втрат ґрунту внаслідок застосування певного методу управління (контурний обробіток, поперечна оранка, терасування) до втрат ґрунту внаслідок обробітку ґрунту вздовж профілю схилу. Чим ефективнішими є практики

у зменшенні ерозії ґрунту, тим нижчим є показник P . У більшості випадків значення коефіцієнтів P можна взяти з літератури; якщо не спостерігається жодних допоміжних методів, то коефіцієнт P дорівнює 1. Іншою можливою причиною, чому дослідження можуть ігнорувати P -фактор, є природа обраних C -факторів. Деякі C -фактори вже враховують наявність допоміжного фактора, такого як міжрядне вирощування або контурний обробіток.

Окрім того, що для оцінки P фактору, потрібне знання практик, які впроваджуються на тому чи іншому угідді, можна також використовувати і табличні значення відносно нахилу території: чим більша крутизна схилу тим більший показник P -фактору, що значно спрощує роботу при відсутності повної інформації про територію. Також є варіанти розрахунку показника, коли комбінуються дані методи. В такому випадку коефіцієнт варіюється в залежності від того, яка крутизна схилу притаманна тому чи іншому виду землекористування.

Проведення розрахунку всіх коефіцієнтів моделі на сьогоднішній день є можливим у будь-якому ГІС-середовищі, що підтримує піпксельний розрахунок растрових зображень на основі математичних виразів. Як результат моделювання також отримується растрове зображення добутку всіх попередньо розрахованих растрів-факторів, з роздільною здатністю, що відповідає розрахунковим растрам. Звичайно найкращим варіант, коли зображення є детальним, має високу просторову роздільну здатність, проте задля об'єктивності отриманих результатів виміри повинні проводитися відштовхуючись від закладеної одиниці площі – гектару.

Результати порівняльної характеристики показників інтенсивності втрат ґрунту за моделями RUSLE та WEPP доводять, що кращі результати на території басейну річки для другого варіанту в 3,5 рази. Проте обидві моделі переоцінили вихід осаду майже в 5 разів, порівняно з реальними

спостережуваними явищами, що є характерним для низки великої кількості моделей різного типу [22].

Простежується суттєва різниця між змодельованими показниками для різних типів культур, що зростають на земельних угіддях. Так RUSLE демонструє досить близькі до польових вимірів показники втрати ґрунту для пшениці та вівса, проте для всіх інших культур значення є завищеними. Інтенсивність ерозії розрахована за допомогою WEPP та генератора клімату CLIGEN (генератор використовується в даному дослідженні) надають загалом вищі значення, ніж ті що були обраховані генератором BPCDG. Проте все ж модель WEPP надає найбільш адекватну оцінку втрат ґрунту для типу клімату близького до середземноморського та азональних типів ґрунтів [57].

Дослідження порівняння в подібних кліматичних умовах, але на територіях уражених пожежами, демонструють недооцінку втрат ґрунту в кожній з моделей, що корелюється з неадекватним відображення коефіцієнтів піддатливості згорілого ґрунту до ерозії [32]. Поряд із цим, результати досліджень, що проводилися в тропічних регіонах Бразилії, свідчать про відносну близькість змодельованих показників до реальних, однак у RUSLE має місце незначна недооцінка порівняно з польовими вимірами, тоді як для WEPP цей розрив менший [28].

РОЗДІЛ 2

ПРИРОДНІ ПЕРЕДУМОВИ РОЗВИТКУ ЕРОЗІЙНИХ ПРОЦЕСІВ В МЕЖАХ БОГОДУХІВСЬКОГО РАЙОНУ ХАРКІВСЬКОЇ ОБЛАСТІ

Богодухівський район – адміністративно-територіальна одиниця, що знаходиться на території північно-західної частини Харківської області, була сформована в результаті адміністративно-територіальної реформи 19 липня 2020 року. Складовими району є територіальні громади: міські – Богодухівська, Валківська, та селищні – Коломацька, Краснокутська та Золочівська. Площа території району складає близько 4,51 тис. км², кількість населення 128,4 тис. осіб, кількість населених пунктів – 353.

2.1. Ендогенно-геологічна будова, морфологічна характеристика рельєфу та поширеність його форм

У геоструктурному відношенні територія Богодухівського району повністю лежить у межах Дніпровсько-Донецької западини (ДДЗ), яка є частиною Сарматсько-Туранського лінеamentу, або ж прогину, що входить до складу Східноєвропейської дорифейської платформи. У свою чергу, ДДЗ - це досить вузький (60-120 км) рифтовий пояс, який простягається з південного сходу на північний захід від Донецької складчастої споруди до Чернігівського виступу і має довжину близько 600 км, а паралельно північному заходу западини простягаються Воронежські антиклінальні схили, які, подібно до південно-східних схилів Українського щита, є периферійними окраїнами зануреного центрального грабена.

Відповідно, основна територія Богодухівської та Золочівської громад знаходиться в межах Північного борту ДДЗ, окрім останньої, частина якої заходить на Воронежський кристалічний масив. Спільні ознаки

розміщення мають Краснокутська та Валківська громади, які своєю центральною частиною знаходяться на Північній прибортовій зоні грабена, ширина якого варіюється від 10-20 км до 30-35 км, тоді як крайні північні та південні виступи лежать на Північній бортовій зоні і Центральній приосьовій зоні грабену відповідно. У випадку Коломацької громади її основна частина знаходиться на території Центральної приосьової зони грабену, тоді як на півночі розміщена частина Північної прибортової зони.

У даному випадку Дніпровсько-Донецький авлакоген має коритоподібну форму в центральній частині видовженого грабену, і відповідно Північний борт, прибортова зона та північ Центральної приосьової частини є основними геологічними структурами представленими на території району.

Північна бортова зона і одночасно південний схил Воронежського масиву перекриваються осадам товщиною близько 500-3500 м. Занурення в бік грабену відбувається під кутам від 1-2° до 5-6°. В той же час прибортова північна зона має більш стрімке занурення фундаменту і відповідно більшу товщину осадового чохла. Занурення фундаменту в безпосередній рифтовій зоні доволі значне і варіюється від 12,5 до 20 км.

Перекриваючі породи головним чином сформовані в девоні, коли швидкість седиментації сягала близько 10-40 м/млн. р., в період 375-360 млн. років тому – 250 м/млн. р, в карбоні – 10 м/млн. р., у карбоново-перському переході близько 25-30 м/млн. р., відповідно в мезозої та кайнозої швидкість осадонакопичення складала декілька метрів на мільйон років, що не відрізняється від звичайного платформного.

Девонські та нижньокарбонові відклади, які перекривають рифтову зону представлені пісковиками, аргілітами, вапняками, доломітами, кам'яною сіллю, мергелями та вулканогенними породами, головним чином туфами. Бортові зони вкриті породами середнього і частково нижнього карбону та представлені пісковиками, аргілітами, вапняками, доломітами.

Карбонові, пермські, мезозойські та кайнозойські осади перекривають як рифт, так і борти западини повсюдно, та представлені пісками, глинами, крейдою і мергелем.

У геоморфологічному відношенні територія Богодухівського району своєю південно-західною частиною розміщена на Полтавській пластово-аккумулятивній рівнині на палеогенових і неогенових відкладах, тоді як північна та північно-західна відноситься до Середньоруської області пластово-денудаційних височин на неогенових- палеогенових та крейдових відкладах.

За генетико-морфологічною класифікацією на території району виражені наступні типи рівнин: основну центральну частину району займають лесові позальодовикові піднесені розчленовані рівнини, північну частину Золочівської громади займають аккумулятивно-денудаційні піднесені останцево-горбисті, місцями з переходами в грядово-горбисті рівнини, центрально-західна частина Валківської громади – позальодовикові піднесені сильно розчленовані лесові рівнини, крайній південний-захід Краснокутської – прильодовикові піднесені розчленовані лесові рівнини.

Закономірність поширення алювіальних рівнин зумовлена приналежністю до сучасних річкових долин, адже в долинах річок Мерло, Мерчик, Коломак, Орчик, Уди, Лопань, Мож поширені алювіальні заплавні тераси голоцену. Перші і другі надзаплавні тераси характерні для долин річки Мож та Уди, та в місці впадіння Мерчика в Мерло і сформовані верхньому антропогені. Четверті і п'яті надзаплавні нерозчленовані тераси поширені в долині річки Мерло, формування яких припадає на середній та нижній антропоген.

У рельєфному відношенні для західної частини Богодухівського району домінантними типами форм рельєфу є плоскі та слабо хвилясті рівнини, плоскі, дрібногорбисті, піднесені, відносно вирівняні та

розчленовані балками лесові рівнини, що зумовлено приналежністю до Приворсклинського плато, яке значно розчленоване притоками Ворскли, ярами та балками. Схоже поширення основних рельєфних угруповань є характерним і для іншої півночі району, проте розвиненість яружно-балкових систем є більшою, але різниться глибина розчленування, поверхня урізноманітнена курганами, степовими блюдцями та ерозійними лощинами. Поверхня південно-східної частини Богодухівського району доволі рівнинна, розповсюджені плоскі та слабохвилясті рівнини в долинах річки Мож та її приток, проте досить виражено розчленована долинами менших водотоків, балок та ярів.

Показники середньої висоти місцевості над рівнем моря для території району складає близько 182 м, проте у розрізі громад показники дещо диференціюються, через що найбільш височинними громадами є Золочівська (195,5 м), Богодухівська (187,7) та Валківська (186,7 м), тоді як середня висота для території Коломацької громади становить 173,6 м, найбільш низинною є Краснокутська громада, середня висота якої становить близько 166 м (рис. 2.1).

Відповідно, дана закономірність напряду відображається у розміщенні абсолютних мінімальних та максимальних висот місцевості. Так найвища точка району (254 м) розміщена поблизу с. Лютівка, Золочівської громади, за декілька кілометрів від місця витоку р. Грайворонка та р. Мерло, тобто на межі їх вододілу. В той же час, найнижча точка району (105 м) знаходиться в заплаві Мерли, поблизу ботанічного заказника місцевого значення «Капранський».

Найвищий загальний рівень рельєфу знаходиться на межиріччях Ворскла – Мерло, Мерло – Уди, Коломак – Мерло та Мож-Мерчик, де позначки абсолютних висот сягають від 160-180 м до 200-220 м на вододільних плато.

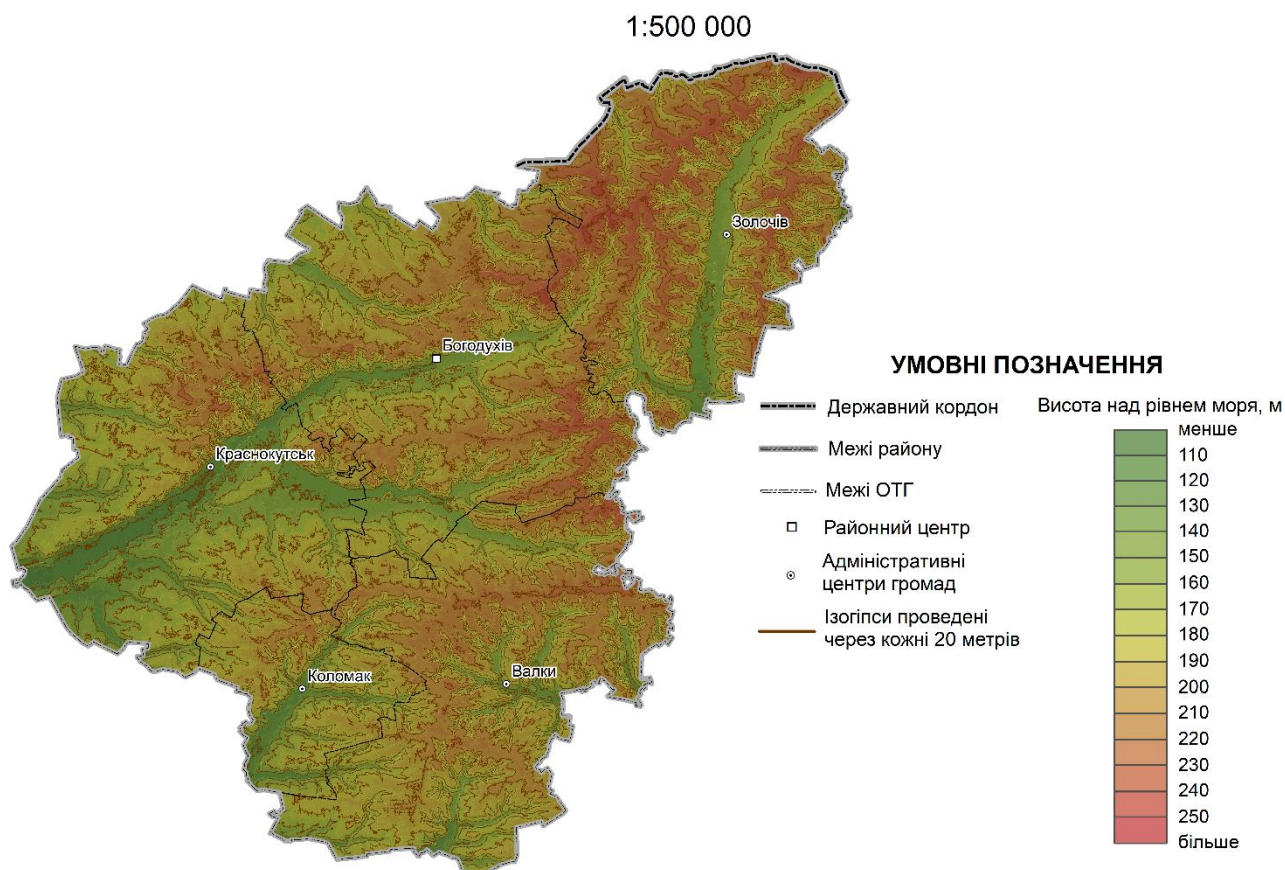


Рис. 2.1. Рельєф території Богодухівського району

Найбільш низинний рельєф (середні висоти 110-130 м) характерний для долин річок Мерло та Мерчика, а саме у місці їх злиття, з подальшим пониженням далі за течією, та у місці впадіння в Мерло її лівобережних приток – Ковалівки та Грузької. Подібна ситуація з пониженням долинного рельєфу після злиття басейноформуючої річки з найбільшою її притокою, прослідковується з долиною Коломака, де після злиття з Шляховою, долина розширюється, а абсолютні висоти зменшуються.

Переходячи до опису геоморфологічних показників рельєфу території Богодухівського району, слід зазначити, що головним джерелом даних для проведення аналітичних розрахунків, виступали набори даних цифрових моделей рельєфу з роздільною здатністю 12,5 м/піксель створених Японським агентством аерокосмічних досліджень за допомогою радіолокаційної супутникової місії ALOS PALSAR. Отже, було проаналізовано одні з головних морфометричних показників, а саме

горизонтальне та вертикальне розчленування рельєфу (рис. 2.2), які у першому випадку характеризують насиченість території тальвегами від постійних, тимчасових або потенційних водотоків, тоді як глибина розчленування являє собою різницю найвищої та найнижчої абсолютних висот на одиницю площі.

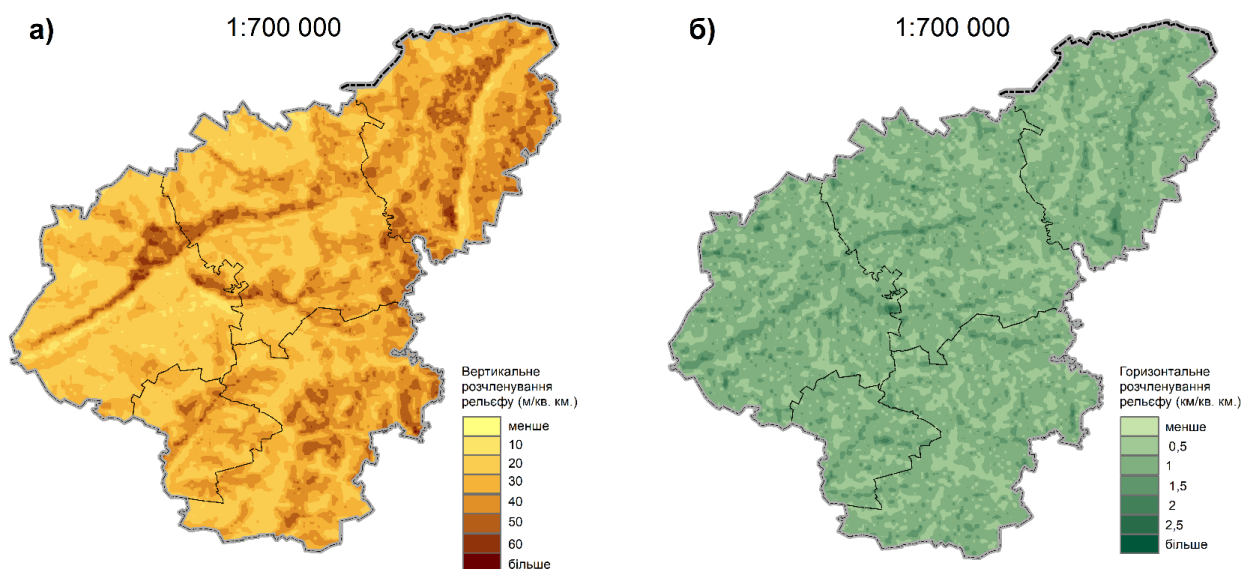


Рис. 2.2. Показники густоти розчленування рельєфу території Богодухівського району: а) вертикального, б) горизонтального

Середнє горизонтальне розчленування рельєфу території Богодухівського району становить 0,68 км/кв. км., для територій окремих громад даний показник наступний: Валківська – 0,66; Золочівська – 0,67; Богодухівська – 0,68; Коломацька – 0,71; Краснокутська – 0,72. У просторовому відношенні найбільш вираженими ділянками є долини найбільших річкових систем, які сформували розгалужену систему водозбору у безпосередній близькості на своїх право- та лівобережних бортах.

В той же час середнє вертикальне розчленування рельєфу території Богодухівського району становить 25,18 м/кв. км., для територій окремих громад даний показник складає: Валківська – 26,8 м/кв. км.; Золочівська – 29,99 м/кв. км.; Богодухівська – 24,14 м/кв. км.; Коломацька – 24,64

м/кв. км.; Краснокутська – 20,39 м/кв. км. Без адміністративної прив'язки показник середнього вертикального розчленування рельєфу території Богодухівського району найбільше виражений на правобережжі всіх основних постійних водотоків, що є абсолютно характерним для флювіального типу рельєфу, коли правобережні схили за рахунок генетичного розвитку річкової долини, характеризуються значними абсолютними висотами.

Наступною важливою морфометричною характеристикою поверхні є її кут нахилу, або ж крутизна, яка має безпосередній вплив на інтенсивність розвитку ерозійних процесів та утворення різного ступеня змитості ґрунтів. В цілому для території Богодухівського району притаманний наступний розподіл поверхні за нахилом території (рис. 2.3), де прослідковується чітко виражене домінування крутизни в $2-3^\circ$, яка поширена на 116 тис. га.

Слід зауважити, що суттєву частку площі району займають території з нахилом який дорівнює 0° , тобто абсолютно рівні поверхні, без суттєво вираженого нахилу за тим чи іншим азимутом (81,5 тис. га), які є характерними для безпосередньо річкових долин, тальвегів великих балок та вододільних плато.

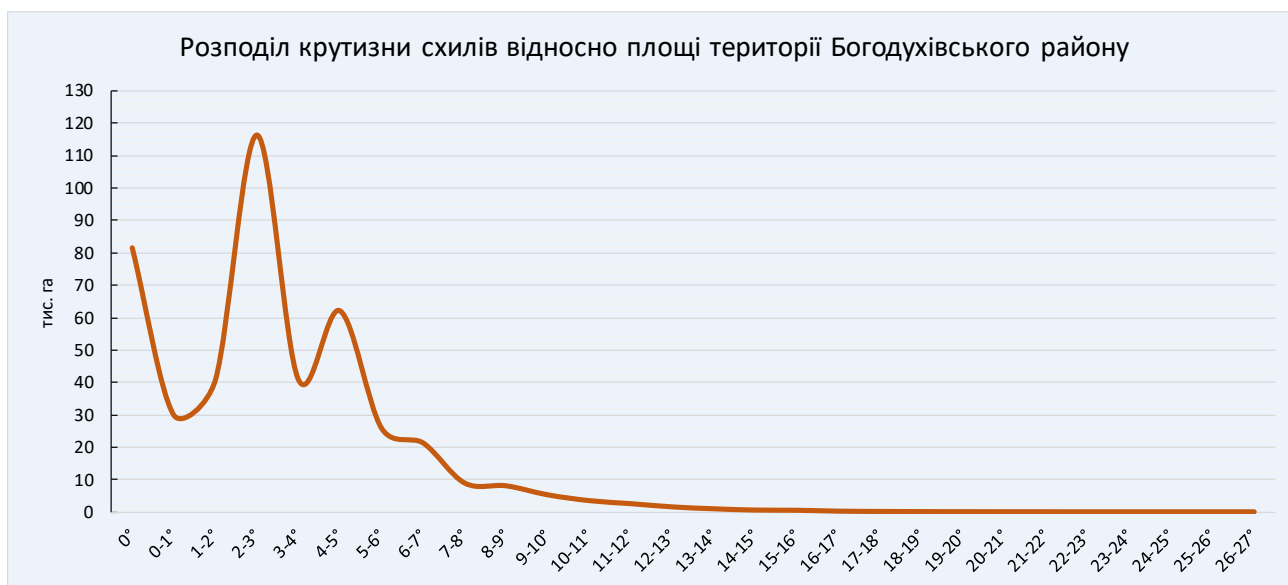


Рис. 2.3. Поширеність крутизни поверхні на території Богодухівського району

Проте як видно з графіку, чим більше зростає ухил території, тим інтенсивніше зменшується його поширеність, так схили крутизною від 10° до 27° , поширені на менш ніж 10 тис. га., та головним чином тяжіють до вже вище згаданих правобережних бортів річкових долин, а також є широко поширеними на правих та лівих схилах ярів та балок меншого порядку. Існування схилів будь-якої крутизни так чи інакше провокує утворення або розвиток змитих і еродованих ґрунтів, відсоток та ступінь змитості яких, на пряму збільшується з крутизною схилу. Так починаючи від ухилу території в 7° , нееродованих ґрунтів майже не існує, а при нахилі поверхні $10-12^\circ$, майже половина ґрунтів залягаючих на схилах буде середньо- або сильно змитими. Коли крутизна поверхні сягає від 1° до 5° , лише половина ґрунтового покриття буде слабоеродованою, що хоч і виглядає досить оптимістично, проте може вносити свої корективи у подальший розвиток ерозійних процесів при нераціональному поєднанні факторів.

Експозиція схилів характеризує поверхню за визначенням азимута або сторони світу на яку вона орієнтовано похилена. Так для території Богодухівського району найбільш поширеною є південно-західна та північно-східна експозиції схилів (рис. 2.4), тобто два протилежні напрямки, які поширені на 12,2% і 11,2% території району відповідно. Чималу площу займають північна, південна та північно-західна і південно-східна експозиції, знов же таки протилежні напрямки, які формуються як ліво- та правобережні схили будь-якого водотоку. Проте 18%, або ж 812,2 км² території не має нахилу поверхні, тобто як і у випадку з крутизною схилів, є абсолютно або переважно вирівняними. Дані закономірності прямо пропорційно співвідносяться з напрямком течії постійних водотоків та басейноформуючих ярів і балок, адже при оберненні на пряму двох протилежних азимутів схилу ерозійної долини, легко визначити переважаючий напрямок залягання тальвегів. Тобто, якщо на території

Богодухівського району найпоширеніша орієнтація схилу це південний-захід – північний-схід, то відповідно протилежний напрямок руху північний-схід – південний-захід буде найпоширенішим в контексті орієнтації протікання водотоків.

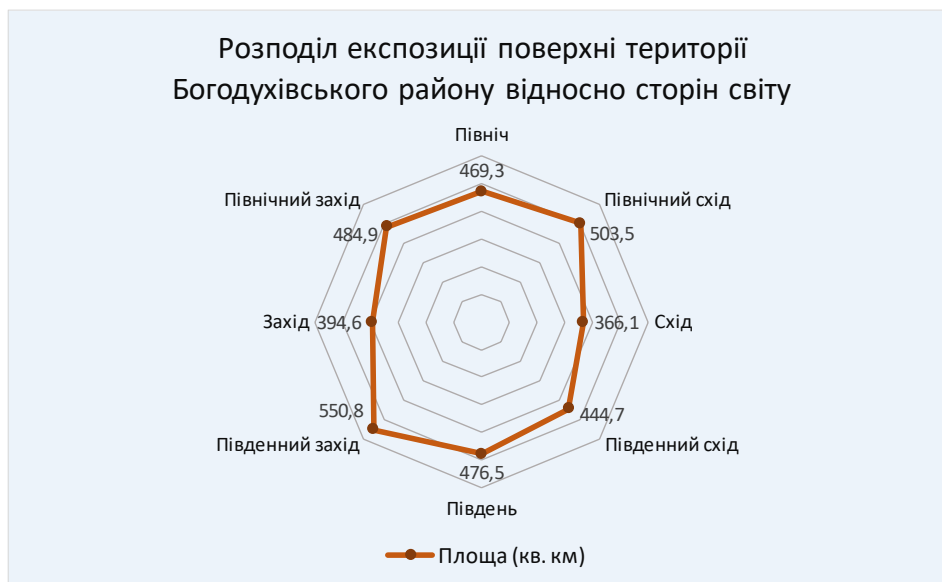


Рис. 2.4. Орієнтація схилів відносно сторін світу для поверхні району

Таким чином експозиція є важливим фактором при аналізі ерозійного розвитку території, адже вона впливає на низку мікрокліматичних показників, які напряду впливають на інтенсивність змивових процесів. Так на північних та західних схилах формується вищий сніговий покрив, і відповідно через кількість снігу збільшується весняний стік, тоді як на південних та східних схилах даний стік буде інтенсивнішим через надходження більшої кількості сонячного тепла, і відповідно інтенсивніше сніготанення. Проте завдяки більшій кількості снігу на північних і східних схилах, кількість запасів вологи в ґрунті буде більшою, що впливає на розвиток рослин, та їх можливості закріплення ґрунту і акумуляції краплинної ерозії та схилових водних потоків.

Залежність інтенсивності змиву ґрунтового покриву також існує і від форми схилу, як у відношенні вертикальної (поперечної) так і

горизонтальної кривизни. Для території Богодухівського району характерний 31% поверхні який у вертикальному профілі має випуклу вгору форму, яка виступає каталізатором прискорення водного потоку, адже крутість даних схилів зростає до підніжжя, 29,8% мають ввігнуту форму, нахил яких зменшується до низу, тобто сприяють частковій акумуляції кінетичної енергії потоку, і 39,1% лінійну форму схилу, з відносно рівномірним нахилом поверхні.

У відношенні горизонтальної кривизни, або тієї що перпендикулярна до напрямку максимального нахилу 20,4% площа поверхні Богодухівського району мають випуклу форму, тобто та що ділить схиловий потік на дві частини та розносить його в протилежні боки, 19,3% поверхні мають ввігнуті схили тобто ті що концентрують потік в одну лінію до підніжжя, 60,3% території мають лінійну форму схилу, яка площинно розподіляє потік за схилом. В обох випадках кривизни схили все одно являються слабовипуклими та слабоввігнутими, адже їх кривизна знаходиться в межах -10% – 10% за величиною кривизни.

2.2. Кліматичні умови території та особливості їх основних показників

У кліматичному відношенні територія Богодухівського району належить до східного кліматичного району лісостепової зони північної атлантико-континентальної кліматичної області, що формує гумідний континентальний клімат без посушливого сезону з тривалою сніжною зимою та теплим або спекотним літом, з відносно рівномірним розподілом опадів протягом року. Для даного типу клімату характерне м'яке літо з довгою холодною зимою, не виключенням є короткочасні посушливі періоди з дуже спекотною погодою.

Як видно з кліматограми середньомісячного розподілу кліматичних

показників для території Богодухівського району в період 2010 – 2023 рр. (рис. 2.5), найтеплішим місяцем є липень, що характеризується середньомісячною температурою близько $+21^{\circ}\text{C}$, що є характерною ознакою вологого континентального клімату, відповідно середньомісячна температура найхолоднішого місяця – січня, сягає менше -3°C , і дорівнює $-5,3^{\circ}\text{C}$. Період з від’ємними температурами триває з грудня до лютого з середньою температурою близько $-3,7^{\circ}\text{C}$. Однак слід зазначити, що останнім часом має місце збільшення середньорічних температур, наявність спекотного періоду влітку та малосніжної зими, що можна розглядати як прояви глобального потепління.

Вегетаційний період для основної частини рослин починається з кінця березня–початку квітня з середніми добовими температурами від $+5^{\circ}\text{C}$ і закінчується в кінці жовтня, що є важливим у контексті розвитку кореневої системи та закріпленні нею ґрунтової маси, та захисті стебловою частиною від ерозійної діяльності краплинної дощової ерозії.



Рис. 2.5. Середньомісячна температура та кількість опадів для території Богодухівського району за період 2010-2023 рр.

Середня річна кількість опадів протягом періоду 2010 – 2023 років складає близько 582 мм, проте слід зауважити, що їх розподіл на пряму варіюється від конкретного року, але загальні тенденції зберігаються в

доволі визначених межах. Найбільша кількість опадів припадає на літній та зимовий періоди, а саме близько 160 мм для кожної пори року відповідно, тоді як найменша кількість опадів випадає навесні (125,5 мм) та восени (135,5 мм). Якщо характеризувати без прив'язки до пір року, то період травня-липня є найбільш дощовим з кількістю опадів до 180 мм. Значна кількість опадів взимку в поєднанні з від'ємними показниками температури сприяє накопиченню снігового покриву висотою від 20 до 40 см. Відповідно дані фактори сприяють накопиченню великої кількості потенційної вологи, яка при збільшенні середньомісячної температури на понад 5°C, буде спричиняти активне сніготанення і відповідно концентроване вивільнення вологи у вигляді насичених водотоків.

У просторовому розрізі Богодухівського району (рис. 2.6), простежується загальна широтна тенденція розподілу кількості опадів зі збільшенням з півдня та південно-східного напрямку на північний схід, де в фіксується зона локального максимуму річної кількості опадів в більше ніж 630 мм. Отже, в адміністративному відношенні найбільший показник середньорічної кількості опадів в межах Богодухівського району має Золочівська громада (610,5 мм), а найменша річна кількість опадів характерна для території Валківської громади (566,5 мм).

Температурний режим на території Богодухівського району має менш виражену широтну залежність. Так загалом по району середньорічна температура складає +8,4 °C, найтеплішими є Валківська та Коломацька громади з середньорічним показником +8,47 °C, тоді як у Богодухівській громаді даний показник найменший і складає +8,33 °C, але оскільки різниця складає 0,15 °C, можна стверджувати про відносну однорідність термічних умов в межах району.

Територію Богодухівського району перетинає липнева ізотерма +22°C по лінії Пархомівка-Краснокутськ-Коломак-Валки-Старий Мерчик, з виступом на північний-схід в районі населених пунктів Мурафа-Шарівка,

та продовжується у меридіальному напрямку Вільшани-Козача Лопань.

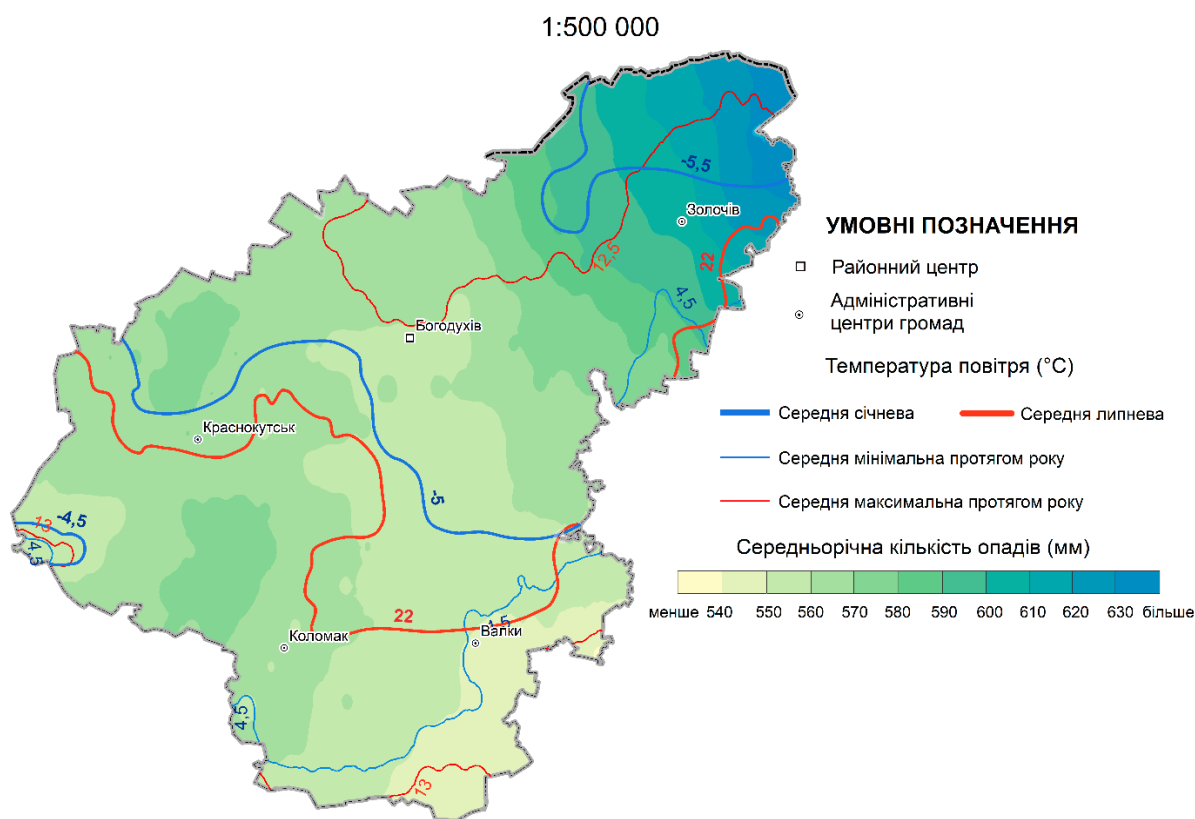


Рис. 2.6. Кліматичні умови території Богодухівського району за період 2010-2023 рр.

Січневі ізотерми перетинають територію району три рази: виступом в районі Капранського $-4,5^{\circ}\text{C}$; по схожому шляху з липневою ізотермою, ізотерма -5°C простягається по лінії Пархомівка-Валки; ізотерма $-5,5^{\circ}\text{C}$ проходить по лінії Івашки-Козача Лопань, з виступом на південь в районі с. Лютівка.

Тенденція зміни кліматичних показників на території Богодухівського району за середньостроковий досліджуваний період, демонструє, що середньорічні показники середньої мінімальної та максимальної температур, а також кількості опадів, мають курс на поступове збільшення (рис. 2.7). Так річна кількість опадів за 14-річний період, при розрахунку лінійним трендом, в середньому збільшилася на 30-40 мм, проте як можна бачити з річного розподілу опадів період 2021-2023

років є найбільш вологим, тоді як перед ним, у період 2019-2020 фіксується локальна депресія. Подібна ситуація прослідковується і з термічними показниками, адже середня мінімальна температура збільшилася на близько 1,2 °С, тоді як середня максимальна на менше 1 °С, через, що дані зміни напряму впливають на зміну початкових та кінцевих дат морозного періоду, теплого вегетаційного періоду та інших залежних аспектів середовища. Проте дана тенденція може пояснюватися річними амплітудами тих чи інших конкретних років, так і в даному випадку можна прослідковувати підвищення всіх трьох показників за період 2021-2023 років, який розпочався після більшого температурного піку 2019-2020 років.

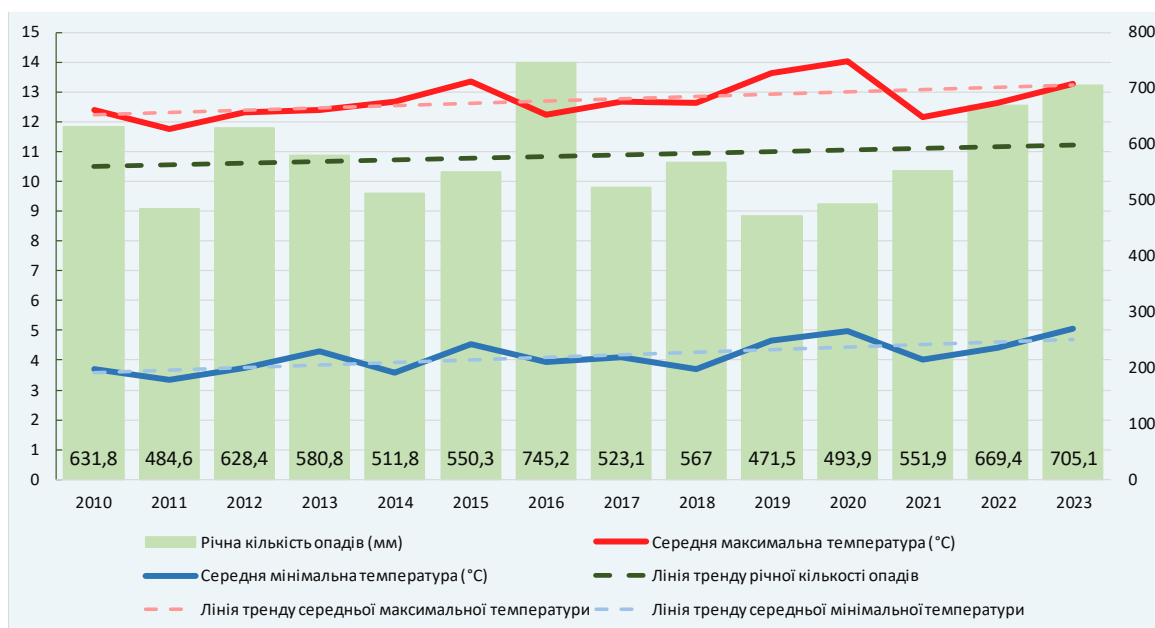


Рис. 2.7. Середньорічні кліматичні умови території Богодухівського району

2.3. Розвиток гідрологічної мережі та її вплив на формування поверхні

Загалом територія Богодухівського району належить до двох основних річкових басейнів – Дніпра і Сіверського Дінця. В свою чергу

дані басейни діляться на шість басейнів меншого порядку: Ворскли – лівої притоки Дніпра, Уди, Мож – правих притоків Сіверського Дінця, Коломаку і Мерло – лівих притоків Ворскли, Орчику – правої притоки Орелі.

Найдовшою річкою, яка протікає територією району, є Мерло з довжиною близько 94 км, другою за довжиною є Уди (54,7 км), довжина Коломака складає 32,5 км, Мож і Орчику – близько 16 км. Річка Ворскла безпосередньо не протікає територією Богодухівського району, проте значна кількість лівих приток формують відповідний водозбір у північно-західній частині району. Басейни даних водотоків мають дрібніший розподіл водозборів (рис. 2.8) і знаходяться в межах району: р. Грузька-р. Турушка, р. Карамушина, р. Черемушна, р. Івани, р. Мерефа – Мож, що загалом формує водозбір площею 369,26 км²; р. Грушева, р. Вишнева, р. Суха балка – Орчик (167,8 км²); р. Шляхова, балка Бузова, р. Каленикове, р. Чутівка – Коломак (500,66 км²); р. Лозова, р. Грайворонка, р. Безімянка, р. Братениця-р. Шийчино, р. Івани, р. Березівка, р. Весела, р. Охтирка, р. Хухра, р. Котельва, р. Котелівка – Ворскла (1015 км²).

Водозбір річки Уди в межах Богодухівського району, з площею в 741 км², складається з низки ярів і балок та створених на них загатних водосховищ, проте головними річковими під-басейнами є водозбори р. Рогозянка-р. Кадниця – праві притоки, та ліва - р. Лопань з її схожим типом водозбору, який формується з низки безіменних ярів та балок. Також незначна частина водозбору належить витoku р. Криворотівка – правої притоки р. Уди.

Найбільший водозбірний басейн (1714,25 км²) в межах Богодухівського району має річка Мерло, який формується безпосередньо з Мерли та її приток, та головної притоки р. Мерчик і його приток. Основними водозбірними водотоками Мерчика є наступні ліві притоки: Мокрий Мерчик, Мандричина, Княжна, балка Бузова.



Рис. 2.8. Басейни водозборів та гідрологічна мережа території Богодухівського району

Що стосується р. Мерло то ситуація доволі схожа, адже в межах району, у водозборі річки домінують ліві притоки, як то: Яр Лозовий, Яр Козин та Семенів, долина Дідова та Липова, р. Грузька та Яр Чаговець, р. Ковалівка. Також слід відмітити, що окрім вище перерахованих водотоків, водозбору

р. Мерло характерна загальна висока розчленованість ярами та балками меншого порядку, особливо на правобережжі в місці впадіння Мерчика в Мерло.

Загальна довжина постійних та пересихаючих водотоків, які розміщені в межах Богодухівського району, складає близько 908 км. Густота річкової мережі, як пропорція суми довжин усіх водотоків до площі того чи іншого басейну, або іншої окресленої території, в межах Богодухівського району сягає $0,2 \text{ км/км}^2$, що є трохи нижче середнього показника для Харківської області.

Площа водного дзеркала статистичних водних об'єктів на території Богодухівського району, антропогенних та природних за генезисом, складає близько 61 км^2 , найбільшою водоймою є Рогозянське водосховище, розташоване на річці Уди, являє собою руслове загатне водосховище з площею близько 6 км^2 . Подібний тип створення та функціонування має більшість водойм району, які були штучно утворені шляхом перекриття постійного водотоку річки, балки або яру загатною спорудою (найчастіше земляний насип), через що їх форма нагадує трикутник, з основою на місці греблі, а ерозійна улоговина є місцем концентрування основної маси води. Також зі штучних водних об'єктів широко поширені дренажні та іригаційні канали, які широко представлені в долині річки Мерло, починаючи від Богодухова і вниз за течією, яскраво вираженими вони також є на ділянці Мерчика в районі с. Шарівка, та на інших рівнинних лучно-заплавних територіях долин річок.

Характерними ознаками морфометричних показників річкових долин, їх приток та супутніх яружно-балкових систем для водозбору річок Коломак, Орчик та Мерло вниз за течією від місця злиття з Мерчиком та південно-західних приток р. Ворскла є балкоподібна форма долини у верхів'ї водотоків, що змінюється нижче за течією на асиметричну з переривистим крутим правим бортом та полого-терасованим лівим. У

р. Мерло кількість терас може досягати п'яти. Асиметричні борти з високим і крутим правим та похилим терасованим лівим бортами також притаманні долинам водотоків басейну Уди, де кількість терас може сягати від 3-4 до 7-9, проте водотоки меншого порядку зазвичай мають балкоподібні та малорозвинуті долини. Річка Мож у верхів'ї має балкоподібну форму долини, проте вниз за течією правий схил стає більш крутим, а безпосередньо долина суттєво збільшується в ширину до 7-8 км, кількість лівобережних терас може варіюватися від 4 до 8.

2.4. Закономірності поширення ґрунтового покриття

Територія Богодухівського району відноситься до лісостепової зони чорноземів типових і сірих лісових ґрунтів лівобережної високої провінції східної підпровінції, що безпосередньо свідчить про домінування та поширеність відповідних типів ґрунтів на території дослідження (рис. 2.9). Так абсолютно переважаючим типом ґрунту у глобальному масштабі є чорноземи типові у поєднанні з чорноземами реградованими, які займають близько 51% площ земель сільськогосподарського призначення на території району або ж близько 2300 км². Найпоширенішим видом являються чорноземи типові малогумусні та чорноземи сильнореградовані, остання характеристика притаманна більше ніж 80% усіх типових чорноземів району, що загалом спровоковано остепнінням опідзолених ґрунтів та заміною лісової рослинності на трав'яну, внаслідок чого прослідковується окарбоначування у верхньому горизонті і краща гумусованість (3,5-5,5%).

Малогумусні чорноземи поширені головним чином на вододільних плато між ерозійними формами рельєфу будь-якого порядку та розміру та складають 44% від загальної площі чорноземів типових та реградованих. Поширеність чорноземів типових іншого ступеня гумусованості має

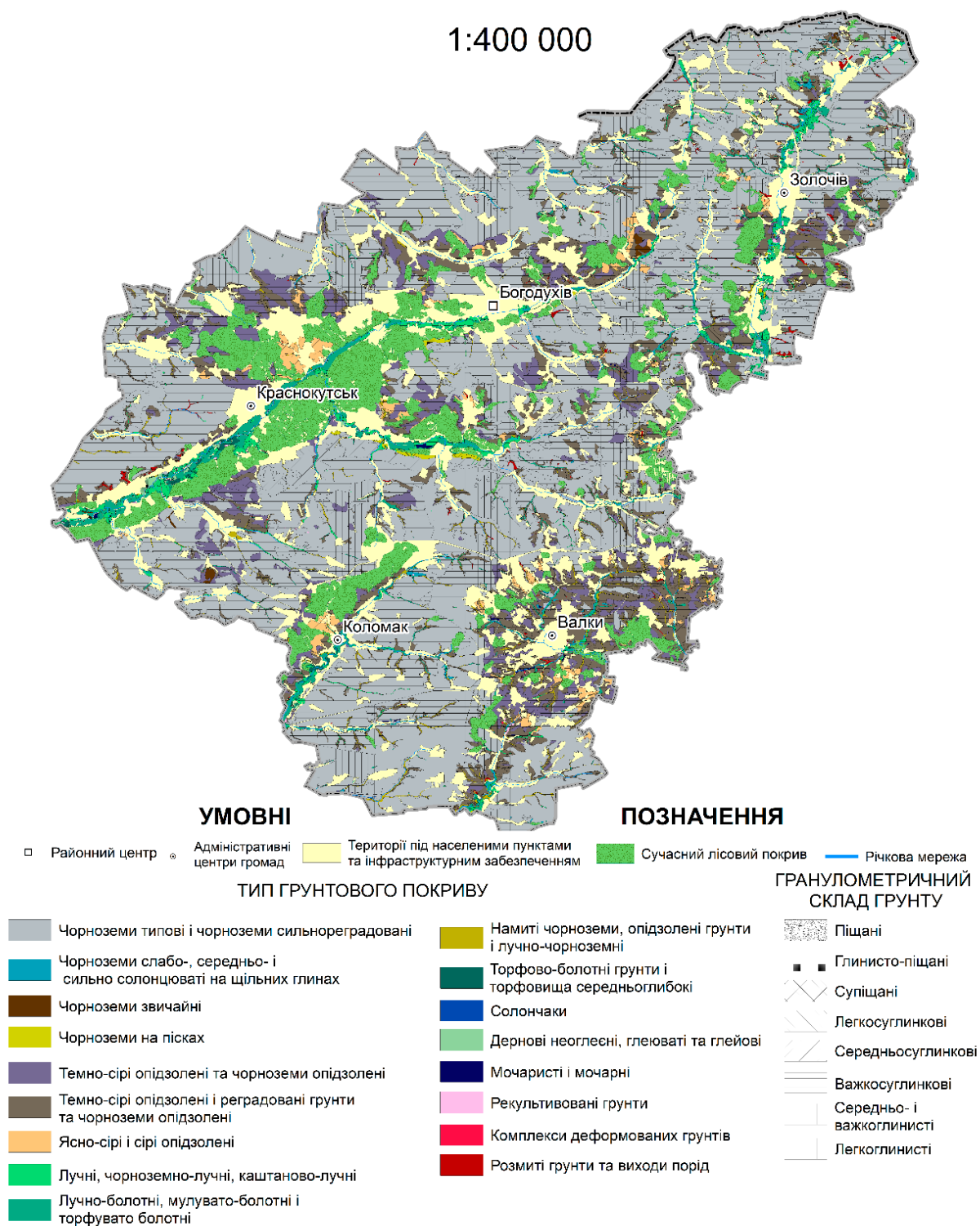


Рис. 2.9. Поширеність основних агроґрунтових груп на землях сільськогосподарського призначення території Богодухівського району

меншу залежність від макрорельєфних особливостей території. Так середньогумусні чорноземи залягають на крайньому півдні району та

півночі Золочівської і Богодухівської громад, слабогумусні поширені досить не виражено.

Чорноземи типові у поєднанні з чорноземами сильнореградованими різного ступеню змитості займають площу району близько в 900 км², найпоширенішими є слабозмиті (86% від загальної кількості змитих чорноземів типових), що характерні для схилів ярів та балок різного порядку. Ступінь змитості ґрунтів збільшується з наближенням до тальвегу, а у деяких випадках чітко прослідковується на правобережних бортах через особливості крутизни поверхні, проте дані випадки поширені набагато менше.

Другою за величиною площі групою ґрунтів на території Богодухівського району є темно-сірі опідзолені ґрунти у поєднанні з чорноземами опідзоленими, які поширені на близько 725 км². Для майже всіх підтипів темно-сірих ґрунтів характерним є як сильний, так і слабкий ступінь реградації, теж саме стосується і чорноземів опідзолених, де окрім реградації присутні ознаки всіх ступенів змитості та оглеєння як усього профілю, так і не вище ілювіального горизонту. Яскраво поширена дана агрогрупа на території Валківської громади на місці водозбору витoku р. Мож та її приток, а також на обох схилах р. Оріль, правобрежжі р. Мерло, р. Лопан, р. Коломак, р. Мерчик, р. Грузька та низки інших приток Ворскли, окрім цього широко представлені дані ґрунти на придонних схилах ярів та балок.

Іншою досить поширеною агроґрунтовою групою являються лучні ґрунти та низка їх типів, підтипів і поєднань з іншими типами ґрунтів, через що їх загальна площа складає до 160 км². До даної групи належать лучно-чорноземні, лучно-каштанові, лучні, чорноземно-лучні, каштаново-лучні, лучно-болотні, мулуватоболотні і торфуватоболотні ґрунти. Крім цього для кожного агровиду є характерним той чи інший ґрунотвірний процес, серед яких можна виділити осолодіння та засолення різного ступеню та

глибини, що зумовлено близьким розташування мінералізованих ґрунтових вод та відповідно специфічним водним режимом. Головним ареалом поширення даних ґрунтів виступають знижені та добре підземно зволожені ділянки рельєфу, тобто долини річок, ярів та балок, які найбільш яскраво виражені в заплаві Мерли, Мерчика, Коломака та Уд.

Однією з останніх поширених груп ґрунтів є ясно-сірі та сірі опідзолені різного ступеню оглеєння та змитості. Загалом даний тип був сформований на ділянках з підвищеним зволоженням, як правило западинах або плоских вододілах зі слабким дренажом. На території Богодухівського району це рочзленовані правобережні області місць злиття річок Мерло-Мерчик, Коломак-Шляхова, а також витік Мжі, Черемушної, Криворотівки та безпосередньо Мерли. Оглеєння виникає при неглибокому заляганні поверхневих вод, проте лише 1,5 км² даних ґрунтів на землях сільськогосподарського призначення мають дану виражену ознаку.

Однією із серйозних проблем ґрунтового покриття Богодухівського району є поширеність кислих ґрунтів, тобто таких які мають показник рН менше 7, що безпосередньо впливає як на рослинний покрив, так і на можливості їх антропогенного використання. Площа таких ґрунтів у Краснокутській громаді складає близько 23,5 тис. га, у Валківській - 16,3 тис. га, у Золочівській – 18,8 тис. га, у Богодухівській – 13,2 тис. га.

Стосовно гранулометричного складу ґрунтового покриття, то найпоширенішими є важко- та легкоглинисті ґрунти, характерні для 1820 км² та 1147 км² земель сільськогосподарського призначення. У багатьох випадках перший гранулометричний склад є характерним не лише для вирівняних поверхонь, а й для схилів яружно-балкових систем, тоді як легкоглинисті ґрунти головним чином залягають на вододільних плато. Гранулометричний склад піщаного, супіщаного, легко- та середньосуглинового типу найяскравіше виражений в долинах та заплавах

річкових систем та на днищах ярів і балок, тим паче простежується тенденція пом'якшення гранулометричного складу із наближенням до осьової частини ерозійної форми рельєфу.

РОЗДІЛ 3

МОДЕЛЮВАННЯ ВТРАТ ҐРУНТОВОЇ МАСИ ВНАСЛІДОК ВОДНОЇ ЕРОЗІЇ В МЕЖАХ БОГОДУХІВСЬКОГО РАЙОНУ

3.1. Підготовка вихідних даних та симуляція ерозії за моделлю WEPP

Як зазначено вище, основними вихідними даними для початку моделювання інтенсивності змиву ґрунтового шару за моделлю GeoWEPP є растри цифрової моделі рельєфу, землекористування та ґрунтового покриву, і, за умов потреби більшої точності та релевантності результатів, допоміжні файли до них. Вихідна ЦМР роздільної здатності 12,5 м на піксель, виявилася занадто детальною, через що її завантаження було неможливим. В результаті експериментальних досліджень найбільш оптимальною роздільною здатністю було обрано 50 м на піксель, що цілком відповідає значним розмірам та кількості водозборів на території Богодухівського району Харківської області. Зважаючи на обмеження програмного забезпечення до об'ємів завантажених даних, в якості методу моделювання було обрано метод моделювання за частинами водозборів як такий, що дозволяє завантажити дані та запустити симуляцію.

Під час підготовки вихідних даних для моделювання за GeoWEPP було виявлено кілька програмно-технічних особливостей, що вплинули на підготовку даних. Так, традиційно підготовлені ЦМР водозборів повинні бути повністю знаходитися в растрі, але, оскільки програмне забезпечення TOPAZ (Topography ParameteriZation), яке є частиною WEPP і відповідає за обробку растрів рельєфу, не може повністю визначити межі вододілів, і при використанні інструменту побудови водозборів буде отримана замкнена помилка. Тому було вирішено робити відступ від вододільної межі на декілька десятків кілометрів під час обрізання растру для

моделювання. По-друге, якщо моделювання проводиться для території великого річкового басейну, наприклад річки Мерла, традиційно слід використовувати растр ЦМР, який містить територію починаючи від безпосереднього витоку головної річки. Однак, у нашому випадку через охоплення усього басейну, суттєво збільшується обсяг вихідного файлу. Таким чином, потрібно балансувати між розміром охопленої території та обсягом вихідного файлу, що в результаті призвело до виокремлення басейну р. Ковалівка в межах басейну р. Мерло (в околицях населених пунктів Капранське, Зубівка, Комарівка) під час підготовки даних для нашого дослідження.

Після завантаження ЦМР було побудовано мережу тальвегів, яка б найбільш детально охоплювала основні форми флювіального рельєфу. Коригувалася дана мережа за допомогою вище згаданих показників CSA та MSCL, внаслідок чого було обрано параметри в 20 га і 600 м для басейнів річок меншого розміру, як то: Коломак, Мож, Орчик, лівих притоків Ворскли та Ковалівки. Для басейна річки Мерло до впадіння р. Ковалівка, та басейну р. Уди було використано показники CSA та MSCL, що дорівнюють 40 та 1200 відповідно, адже при нижчих показниках, симуляція ерозійних процесів на значній території з великою кількістю під-водозборів не запускала.

Наступним пунктом збору даних є тип землекористування або рослинність, яка зростає на території. В даному випадку обмежень в розмірах растру або прив'язки до водозборів немає, що спрощує обробку та завантаження даних для симуляції. Для отримання даного растру був використаний знімок Sentinel-2, за середину червня 2024 року, який був прокласифікований в залежності від необхідних критеріїв (рис. 3.1), а саме було виокремлено наступні класи: листяні ліси, вічнозелені ліси, сади, чагарники, пасовища/трав'яна рослинність, виходи піску/глини, житлова забудова, насадження зернових культур, насадження просапних культур та

відкриті водойми.

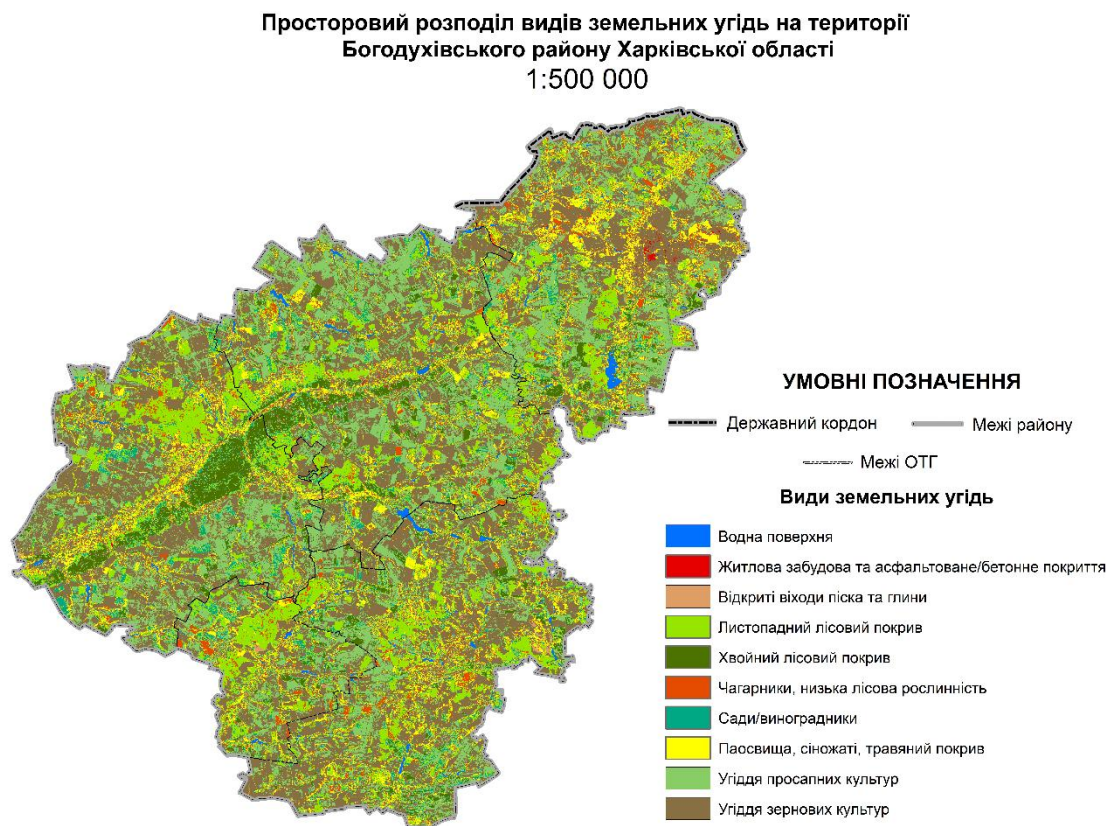


Рис. 3.1. Основні класифіковані види земельних угідь на території Богодухівського району

На основі даного растру була створена атрибутивна таблиця, яка відповідала базі даних землекористування - .txt файлу який «пов'язував» значення в комірках растру з файлами землекористування (.rot), які були вбудовані безпосередньо у WEPP, та містили інформацію про періоди висадки культури, дозрівання, збирання, глибину та тип оранки, або якщо це природня місцевість вік рослинності, її висоту та вплив пожеж. Через широку базу даних, яку надає WEPP, та значну кількість описових показників стандартні файли .rot повною мірою підходили для використання та опису земельних угідь Богодухівського району, хоч і були створені як результат досліджень на території США.

Найбільш масивним кластером вхідних даних є ґрунтовий покрив, який має подібну до землекористування структуру функціонування: формується растр ґрунтового покриття і через .txt файли йде прив'язка до вбудованих WEPP-файлів, що описують ґрунтовий шар за показниками здатності до ерозії. На основі карти ґрунтів (рис. 2.9) було виокремлено 11 типів ґрунтового покриття. Однак, проте якщо у випадку землекористування спеціальні WEPP-файли, створені для території США частково збігалися з ситуацією Богодухівського району і могли видати репрезентативний результат, то файли .sol, що і містять опис ґрунту, по-перше були в іншій класифікації, які не була схожою з українською або класифікацією ФАО, а по-друге включали назву місця звідки були взяті проби або де проводилися прямі польові дослідження на спеціальних поливних майданчиках. Для вирішення даної проблеми постала необхідність створити власні файли .sol, що описували б ґрунтовий покрив території Богодухівського району. На основі узагальнених даних від ФАО про фізичний та хімічний склад різних типів ґрунтів, була створена таблиця первинних вхідних даних, а саме: частка вмісту піщаної фракції, глиняної, дрібнопіщаної, вмісту органічної речовини, СЕС (ємність катіонного обміну) та частка скелету ґрунту. На основі даних показників та згідно формул, які надавалися USDA для опису процесів, що відбуваються у WEPP, були розраховані наступні показники для верхнього шару ґрунту: Interrill Erodibility (K_{ib}), Rill Erodibility (K_{rb}), Critical Shear (τ_{cb}), Effective Hydraulic Conductivity (K_b).

Перший показник (K_{ib}) характеризує міжсмугову еродованість, тобто на скільки свіжооброблений ґрунт буде піддаватися водній ерозії, теж саме стосується і розмивності ґрунту (K_{rb}) та критичного напруження зсуву (τ_{cb}), які були розраховані для базових ситуації, тобто того ж самого свіжообробленого ґрунту. Ефективна гідравлічна провідність (K_b) незмінна в часі та вказує на те як практики управління ґрунтом впливають

на його еродованість.

Показник міжсмугової еродованості K_{ib} був розрахований за наступною формулою за умови, що поверхневі ґрунти містять 30% або більше фракції піску:

$$K_{ib} = 2728000 + 19210000 \text{ vfs} \quad (2)$$

Де, vfs – частка дуже дрібної піщаної фракції, при вмісті піску більше 0,4 потрібно використовувати значення 0,4. Якщо ґрунт містить менше 30% піску використовувалась наступна формула:

$$K_{ib} = 6054000 - 5513000 \text{ clay} \quad (3)$$

Де, clay – частка глиняної фракції, при вмісті глини менше 0,1 потрібно використовувати значення 0,1.

Значення розмивності ґрунту K_{rb} та критичного напруження зсуву τ_{cb} , були розраховані за відповідними формулами, які використовуються у випадку коли ґрунт має 30% або більше піску:

$$K_{rb} = 0.00197 + 0.030 \text{ vfs} + 0.03863 e^{-184 \text{ orgmat}} \quad (4)$$

$$\tau_{cb} = 2.67 + 6.5 \text{ clay} - 5.8 \text{ vfs} \quad (5)$$

Відповідно, vfs – частка дуже дрібної піщаної фракції, clay – частка глиняної фракції, orgmat – частка органічної речовини, яка дорівнює 1,724 вмісту органічного вуглецю. Якщо вміст дрібного піску менше 0,4 потрібно використовувати значення 0,4, при глині більше 0,4 використовують 0,4 тоді як при вмісті органіки менше 0,0035 застосовується відповідне значення. Дані формули змінюються, якщо в ґрунті міститься менше 30% піску, тоді їх вигляд стає наступним:

$$K_{rb} = 0.0069 + 0.134 e^{-20 \text{ clay}} \quad (6)$$

$$\tau_{cb} = 3.5 \quad (7)$$

Якщо вміст фракції глини менше 0,1, то використовується значення 0,1.

Оцінювання ефективної гідравлічної провідності виконується, якщо її вміст менше або рівний 40% за наступною формулою:

$$K_b = -0.265 + 0.0086 (100 \text{ sand})^{1.8} + 11.46 \text{ CEC}^{-0.75} \quad (8)$$

Якщо вміст глини більше 40%, формула розрахунку наступна:

$$K_b = 0.0066e^{(2.44 / \text{clay})} \quad (9)$$

Показник CEC відповідає за ємність катіонного обміну ґрунту та вимірюється в мекв/100г, який повинен завжди бути більшим за 1, за для правильної роботи рівнянь.

Розроблені значення (табл. 3.1) з урахуваннями залежностей були внесені до програми WEPP, перетворені на відповідні файли .sol, та використані файлом зв'язку для використання при моделюванні.

Останніми показниками, які були додані для початку симуляції ерозії за моделлю WEPP, є 100 річні дані про щомісячну кліматичну ситуацію. Оскільки в версії GeoWEPP для QGIS, наразі відсутня можливість створення свого файлу про кліматичні показники, а можливий лише вибір з наявних в наборів даних, було обрано набір даних з метеостанції в центральній-південній частині штату Мічиган, США, який з можливих варіантів був найбільш схожим на ті умови, які притаманні території Богодухівського району Харківської області. Перевагами використання наведених даних є те, що інформація вже міститься у готових файлах, описує середньорічні показники мінімальної, максимальної і середньої температури, кількість опадів, кількість штормів, переважний напрямок вітрів, кількість сонячної радіації, глибину промерзання ґрунту та інше. Безумовно для більшої точності отриманих даних краще провести збір цих даних безпосередньо щодо території дослідження, однак, по-перше, це довготривалий процес, а по-друге, мало ймовірно отримати всі вище перераховані показники в репрезентативному вигляді.

Таблиця 3.1

Характеристики фізико-хімічного складу ґрунтів Богодухівського району та їх здатність до еродованості

Глибина шару	0-300 мм								
Назва ґрунту	Intertial Erodibility	Rill Erodibility	Critical Shear	Eff Hydr Conductivity	Пісок %	Глина %	Органіка %	СЕС meq/100g	Дрібний пісок %
Темно-сірі опідзолені та чорноземи опідзолені	5647920	0,0171	1,2665	1,271	76	14,1	0,41	8,6	15,2
Чорноземи опідзолені	4506846	0,0054	2,222	0,489	46,3	28,8	1,27	19,9	9,26
Лучно-каштанові	4138014	0,0042	1,8515	0,407	36,7	23,1	2	20,3	7,34
Лучно-болотні мулуватого-болотні торфуватого-болотні	5502700	0,1409	0,35	0,416	0	0	41,46	108,8	0
Розмиті	5167670	0,0093	1,4745	0,973	63,5	17,3	0,76	10,7	12,7
Лучно-чорноземні	4057332	0,0042	2,95	0,285	34,6	43,3	1,82	27,5	6,92
Ясно-сірі опідзолені	6089750	0,016	0,766	2,757	87,5	6,4	0,47	2,8	17,5
Мочаристі	3424299	0,0069	2,95	0,208	26,4	47,7	2,44	30,1	5,28
Чорноземи типові	3965124	0,0039	1,8905	0,308	32,2	23,7	3,04	24,5	6,44
Дерново-підзолисті	5336718	0,0063	0,584	1,993	67,9	3,6	1,65	3,9	13,58
Солончаки	4387744	0,0155	2,456	0,63	43,2	32,4	0,4	13,9	8,64

Таким чином, після підготовки трьох вихідних компонентів та вибору найбільш оптимально схожої за кліматичними умовами досліджуваної території метеостанції в межах США, були запущені процеси симулювання змиву та перевідкладення ґрунтової маси для кожного річкового водозбору, або окремої його притоки, у часових межах, що дорівнювали одному року. Результати моделювання, були представлені у вигляді растрів, де кожний мікроводозбір мав своє значення вихідних параметрів. Змодельовані растри ґрунтових втрат (рис. 3.2) і ґрунтонакопичення (рис. 3.3) були сформовані в єдину мозаїку, що повністю охоплювала територію Богодухівського району, за виключенням однієї відсутньої ділянки поблизу с. Капранське.

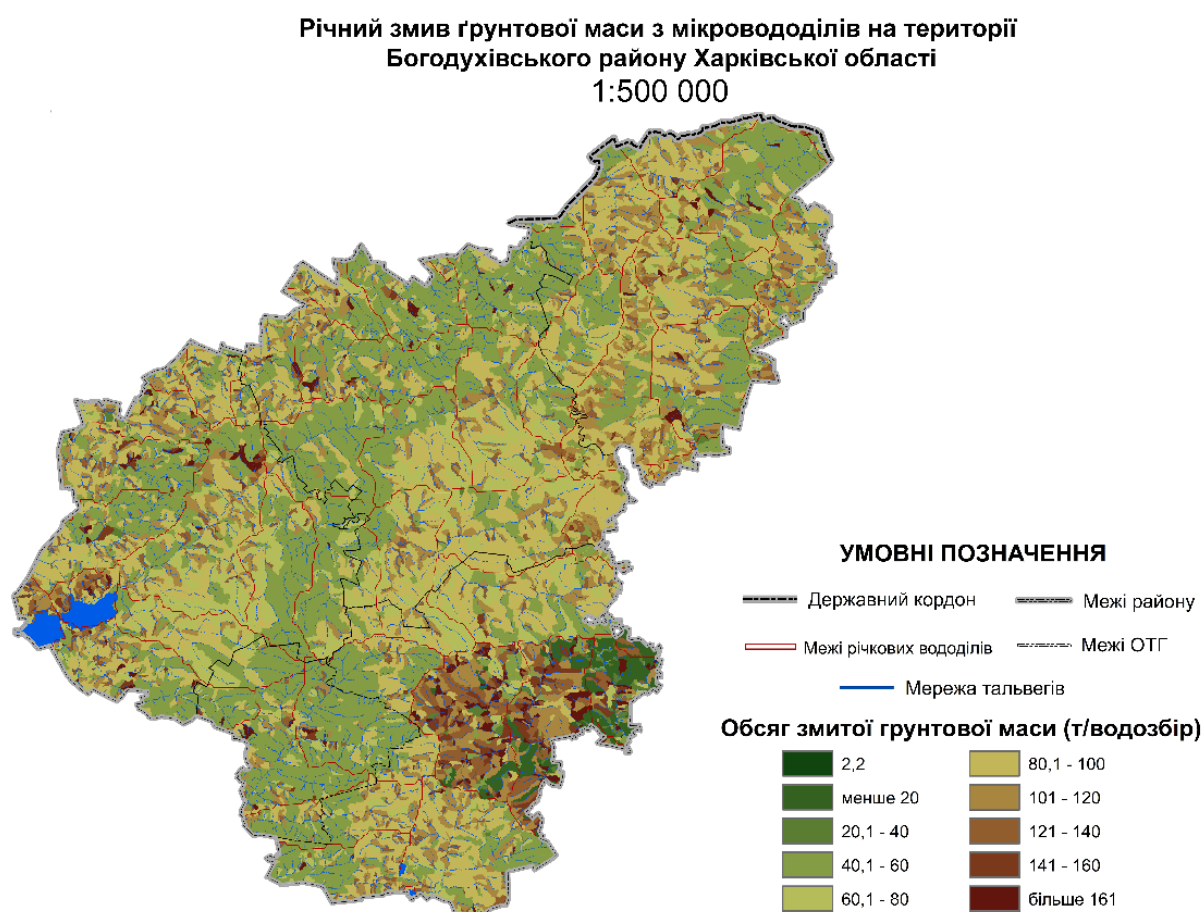


Рис. 3.2. Річна втрата ґрунтової маси на мікровододілах на території Богодухівського району згідно розрахунків моделі WEPP

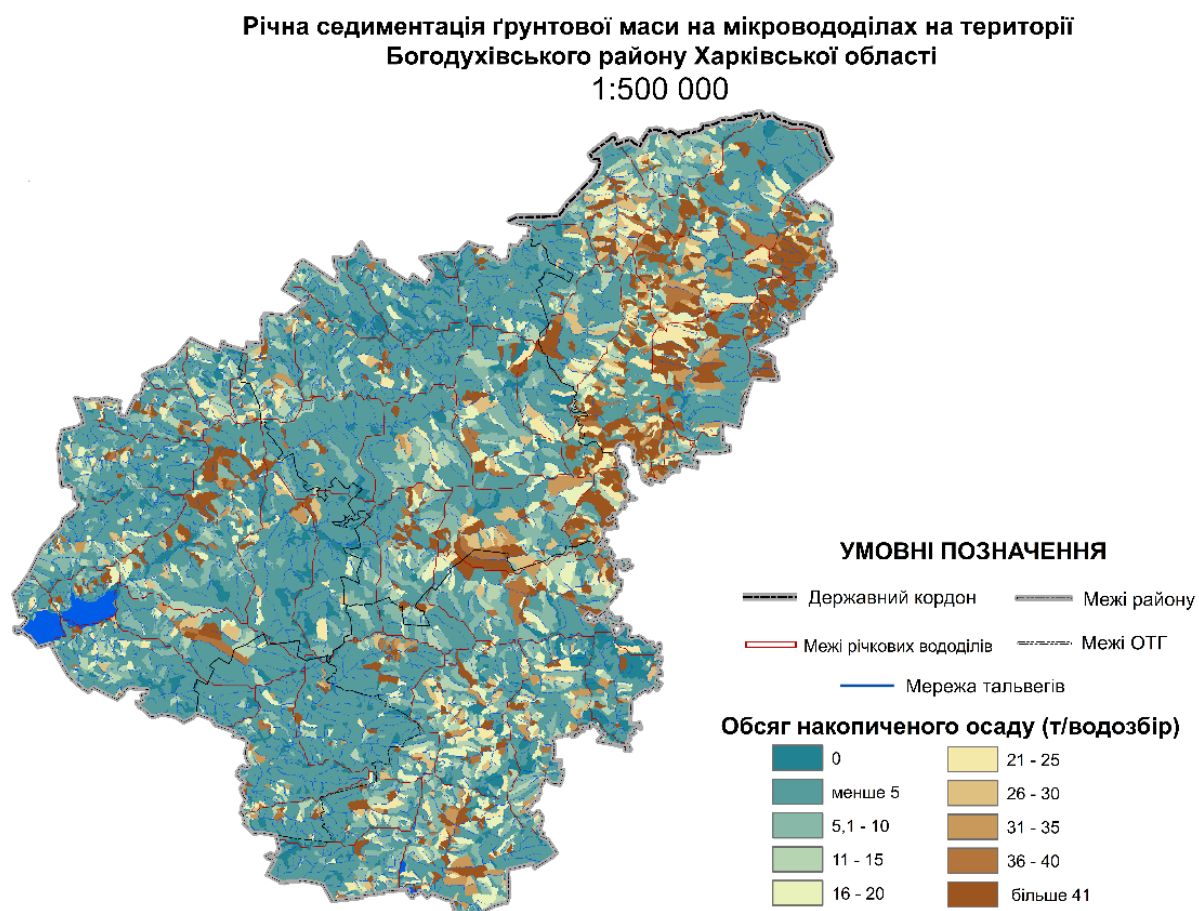


Рис. 3.3. Річне накопичення ґрунтової маси на мікрододілах на території Богодухівського району згідно розрахунків моделі WEPP

3.1. Компонування даних та побудова моделі RUSLE

Як було зазначено у попередніх розділах, модель-рівняння RUSLE за принципом створення є факторною, тобто складається з певних коефіцієнтів, що описують той чи інший фактор навколишнього середовища, що впливає на зміни абсолютного показника (A) інтенсивності втрат ґрунтової маси з одиниці площі, протягом конкретного часового періоду. Таким чином формула розрахунку складається з добутку даних коефіцієнтів-показників, та має наступну структуру:

$$A = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P \quad (1)$$

Де, A - показник втрат ґрунту, R – ерозійність опадів, K – піддатливість ґрунту до ерозії, LS - показник впливу довжини та крутизни схилу, C і P – показники впливу на ерозійність вирощуваних культур і практик запобігання розвитку ерозії.

Основним принципом розрахунку даних елементів є растрові зображення, що відображають просторову диференціацію того чи іншого показника на певній території. В свою чергу, для отримання даних растрів потрібно виконати різні дії, що включають як роботу з векторним форматом, розрахунки значень в атрибутивних таблицях, обробку великої кількості растрових зображень, так і обрахунок індексних зображень.

Загальна методика обчислення R -фактору, за умов обмеженої інформації про шторми та опади, а саме їх найбільшу 30-ти хвилинну інтенсивність, як це передбачає первісно розроблений варіант рівняння, базується на використанні найбільш доступного показника, а саме сумарної річної або середньомісячної кількості опадів. Випадків використання рівнянь подібного типу, досить багато, адже дана модель застосовується для територій різного рівня дослідженості, через що постає необхідність використання найбільш доступного варіанту.

Для розрахунку показника ерозійності опадів (R) на території Богодухівського району, була використана, формула Fernandez et al.(2003), яка за наявними даними дозволяла провести даний розрахунок, а саме:

$$R = -823.8 + 5.213 P \quad (10)$$

Де, P – загальна річна кількість опадів в мм.

Дані про річну кількість опадів були отримані через обчислення середнього їх значення за період 2010-2019 рр., інструментом Raster Calculator на основі растрів космознімків планетарного покриття ресурсу WorldClim, з просторовою роздільною здатністю близько 2,5'. Таким чином, завдяки тому ж інструментарію Raster Calculator, був розрахований безпосередньо сам показник для території району (рис. 3.4. а). Можна чітко

проаналізувати різке збільшення показника на території Золочівської громади та часткове його зменшення на південно-західній частині району, що на пряму корелюється з річною кількістю опадів.

Обчислення К-фактору було почато з присвоєння кожному типу ґрунту, що виділений на території району, показників згідно формули Wischmeier and Smith (1978), розробленої для початкової версії рівняння RUSLE, яка базувалася на використанні характеристик різних фракцій у ґрунті, які потрібно обрахувати. Вигляд загальної формули ерозійності ґрунту (K) наступний:

$$K = f_{\text{sand}} \times f_{\text{clay}} \times f_{\text{orgC}} \times f_{\text{silt}} \times 0,1317 \quad (11)$$

Де, f_{sand} – вміст піщаної фракції в ґрунті, f_{clay} – вміст глинистої фракції, f_{silt} – вміст мулистий фракції, f_{orgC} – вміст органічного вуглецю в ґрунті. Для розрахунку кожного наведеного значення, були використані окремі формули, а саме:

$$f_{\text{sand}} = (0.2 + 0.3 * \exp[-0.256 * m_{\text{sand}} * (1 - m_{\text{silt}} / 100)]) \quad (12)$$

$$f_{\text{clay}} = (m_{\text{silt}} / (m_{\text{clay}} + m_{\text{silt}}))^{0.3} \quad (13)$$

$$f_{\text{orgC}} = (1 - (0.0256 * \text{OrgC}) / (\text{OrgC} + \exp[3.72 - 2.95 * \text{OrgC}])) \quad (14)$$

$$f_{\text{silt}} = (1 - (0.7 * (1 - m_{\text{sand}} / 100))) / ((1 - m_{\text{sand}} / 100) + \exp[-5.51 + 22.9 * (1 - m_{\text{sand}} / 100)])) \quad (15)$$

Де, m_{sand} – частка фракції піску в ґрунті, m_{silt} – частка фракції мулу, m_{clay} – частка глиняної фракції, OrgC – вміст органіки у верхньому шарі ґрунту. Всі дані були отримані зі зведеної таблиці про ґрунти від ФАО, та були попередньо перекласифіковані. За результатами розрахунків в атрибутивній таблиці були отримані як показники для кожної фракції, так і загальний К-коефіцієнт (табл. 3.2). Полігональний шар був конвертований у растровий формат з роздільною здатністю 100x100 метрів (рис. 3.4. б).

Таблиця 3.2

Розрахункові показники еродованості ґрунту (К) згідно RUSLE

Тип ґрунту	m _{sand}	m _{silt}	m _{clay}	OrgC	F _{sand}	F _{clay}	F _{org}	F _{silt}	К-фактор
Темно-сірі опідзолені та чорноземи опідзолені	76	9,9	14,1	0,41	0,200	2,031	0,999	0,863	0,046
Чорноземи опідзолені	46,3	24,9	28,8	1,27	0,200	2,650	0,986	1,000	0,069
Лучно-каштанові	36,7	40,3	23,1	2	0,201	3,070	0,976	1,000	0,079
Лучно-болотні мулувато-болотні торфувато-болотні	35	40	25	41,46	0,201	3,060	0,974	1,000	0,079
Розмиті	63,5	19,2	17,3	0,76	0,200	2,468	0,996	0,986	0,064
Лучно-чорноземні	34,6	22,2	43,3	1,82	0,200	2,552	0,977	1,000	0,066
Ясно-сірі опідзолені	87,5	6,2	6,4	0,47	0,200	1,806	0,999	0,553	0,026
Мочаристі	26,4	25,9	47,7	2,44	0,202	2,671	0,975	1,000	0,069
Чорноземи типові	32,2	44,1	23,7	3,04	0,203	3,153	0,974	1,000	0,082
Дерново-підзолисті	67,9	28,7	3,6	1,65	0,200	2,946	0,979	0,966	0,073
Солончаки	43,2	24,6	32,4	0,4	0,200	2,638	0,999	1,000	0,069

Наступним фактором для обрахунку є фактор впливу довжини та крутизни схилу (LS). Для реалізації розрахунку фактору в ГІС була обрана формула *Bizwuerk et al. (2008)*, що дозволяє лише на основі растру ЦМР та даних про неї провести всі необхідні розрахунки. Для використання рівняння необхідним було створення растру акумуляції потоку за допомогою інструменту *Flow Accumulation*, що створював подібну до інструменту *TOPAZ*, *GeoWEPP* мережу тальвегів, куди буде спрямовуватися кумулятивний потік.

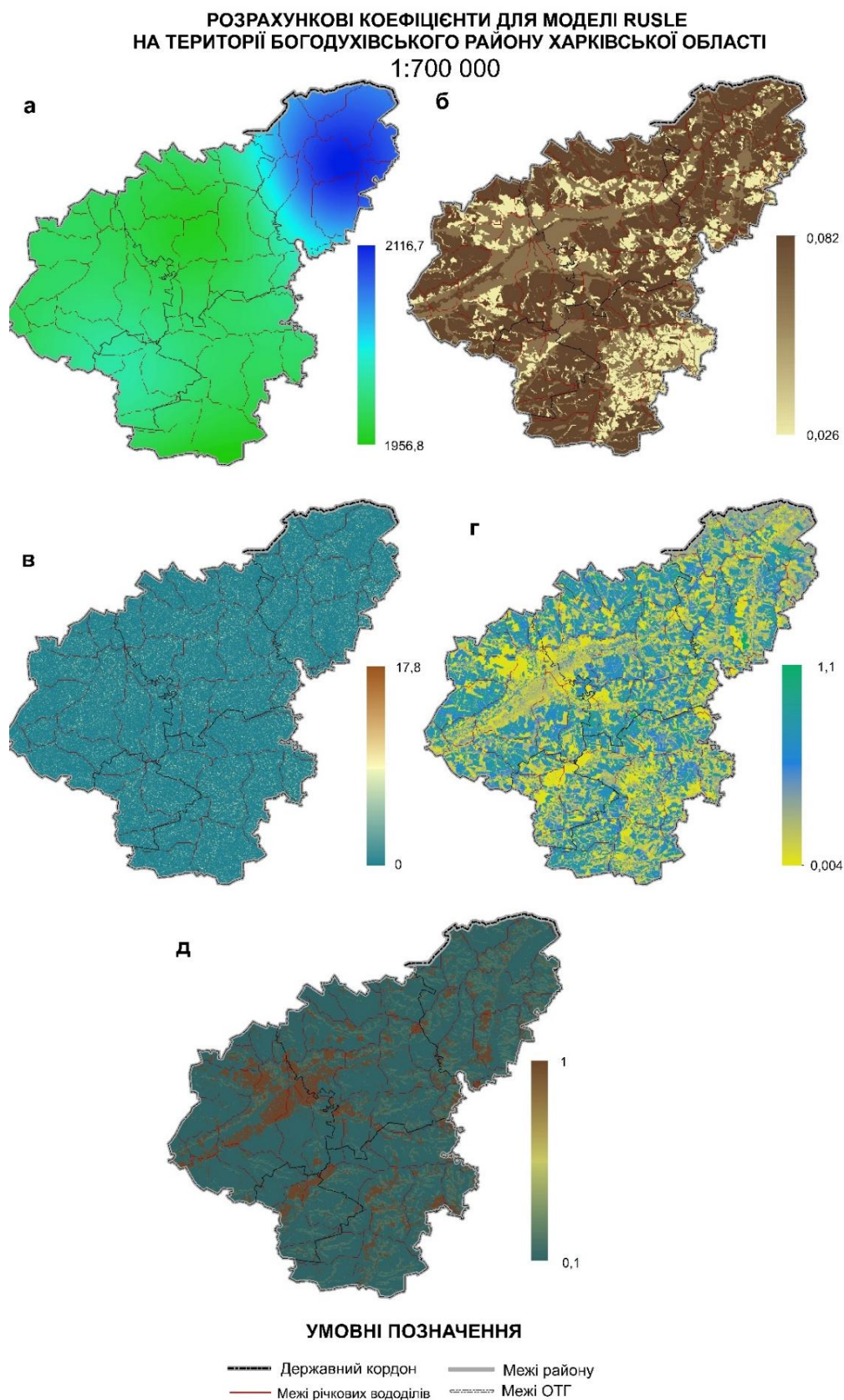


Рис. 3.4. Розрахункові показники моделі RUSLE на території Богодухівського району : а – R-фактор, б – K-фактор, в – LS-фактор, г – C-фактор, д – P-фактор

В результаті формула виглядає наступним чином:

$$LS = \text{Pow}((FA * CS / 22.13) m * (0.065 + 0.045 * S + 0.0065 * S^2)) \quad (16)$$

Відповідно, FA – растр акумуляції потоку, CS – розмір комірки растру, m – константа, яка визначається залежно від домінування кута нахилу на території, в даному випадку 0,35; S – растр крутизни схилів у відсотках, який будується відповідним інструментом з заданими параметрами.

Таким чином, на основі розрахованих растрів з ЦМР з роздільною здатністю 12,5х12,5 метрів, було створено растр LS-фактору, та уніфіковано його роздільну здатність до 100х100 метрів (рис. 3. 4. в).

Для розрахунку С-фактору була обрана формула Van der Knijff et al. (2000), оскільки пошук та використання табличних значень даного фактору на великих дослідницьких територіях є ірраціональним, адже різняться не тільки просторові варіації рослинного покриву, а й часові стадії розвитку культур.

Головною компонентою для альтернативного розрахунку фактору землекористування (С), є використання індексного растру NDVI. Для цього було використано ідентичний космознімок Sentinel-2, як і у випадку з GeoWEPP, за середину червня 2024 року. На основі зображень каналів B4 та B8, був обрахований індекс NDVI, за допомогою інструменту Raster Calculator. Після чого даний інструмент був використаний знову, за для обрахунку С-фактору, на базі вище згаданого рівняння, а саме:

$$C = e (-\alpha * (NDVI / (\beta - NDVI))) \quad (17)$$

Відповідно, NDVI – растр розрахованого індексу, α та β – одиничні параметри константи, що характеризують форму кривої розподілу індексу, та дорівнюють 2 та 1 відповідно, адже саме ці значення були визначені як найкращі, що підходять до агрокліматичних умов території Європи. Отже, розрахований растр управління землекористуванням (рис. 3.4. г) був перерахований до вже сталого розміру комірок растру.

Останній Р-фактор, є одним з найпроблемніших для визначення,

оскільки він має описувати у вигляді числових значень ті протиерозійні практики та заходи, що здійснюються на місцевості, тобто терасування, глибоку оранку, контурний обробіток, поперечну оранку та інше. У випадку наявності відомостей про дані заходи, використовуються їх табличні значення для присвоєння Р-фактору кожному з угідь. В деяких випадках даний коефіцієнт можуть вважати за одиницю для всієї території, тобто ігнорувати будь-яку просторову диференціацію.

Для території Богодухівського району був обраний найбільш релевантний варіант, за наявних вихідних умов та даних. Була обрана таблична пропорція розроблена Wischmeier and Smith (1978) (табл. 3.3) і визначено значення Р-фактору в залежності від того чи належить територія до сільськогосподарських угідь і яка на території крутизна схилу.

Таблиця 3.3

Значення Р-фактору відносно типу землекористування та крутизни схилу

Тип землекористування	Крутизна схилу(%)	Р-фактор
Сільськогосподарські угіддя	0-5	0.1
	5-10	0.12
	10-20	0.14
	20-30	0.19
	30-50	0.25
	50-100	0.33
Інші території	Будь-яка	1,00

Для отримання фінального растру Р-фактору було використано попередньо створений растр крутизни схилів у відсотках та проведено виокремлення лише сільськогосподарських угідь з відкритих наборів даних OpenStreetMap. Наступним кроком була класифікація растру крутизни згідно заданих в таблиці діапазонів та конвертації їх у векторний формат. За допомогою векторного шару угідь, було виокремлено лише ті ділянки шару крутизни схилів, які перетиналися з угіддями. Таким чином, до атрибутивної таблиці крутизни схилів, було додано табличні значення

згідно розрахунків Wischmeier and Smith (1978). Територіям, які не підпали під сільськогосподарські угіддя, було присвоєно атрибутивне значення 1, після чого два векторні шари (сільськогосподарських угідь та інших територій), були поєднані в один шейп-файл, та конвертовані в растрове зображення (рис. 3.4. д).

Після отримання п'яти растрів-факторів, останньою дією для отримання фінального результуючого растру, що відображатиме територіальний розподіл втрат ґрунтової маси (A) за моделлю RUSLE, на території Богодухівського району, є перемноження всіх растрів за допомогою вже згадуваного інструменту Raster Calculator. Таким чином отриманий растр (рис. 3.5) є композитним добутком всіх попередньо обрахованих показників, та вносить різномірний вплив в формування загального показника.

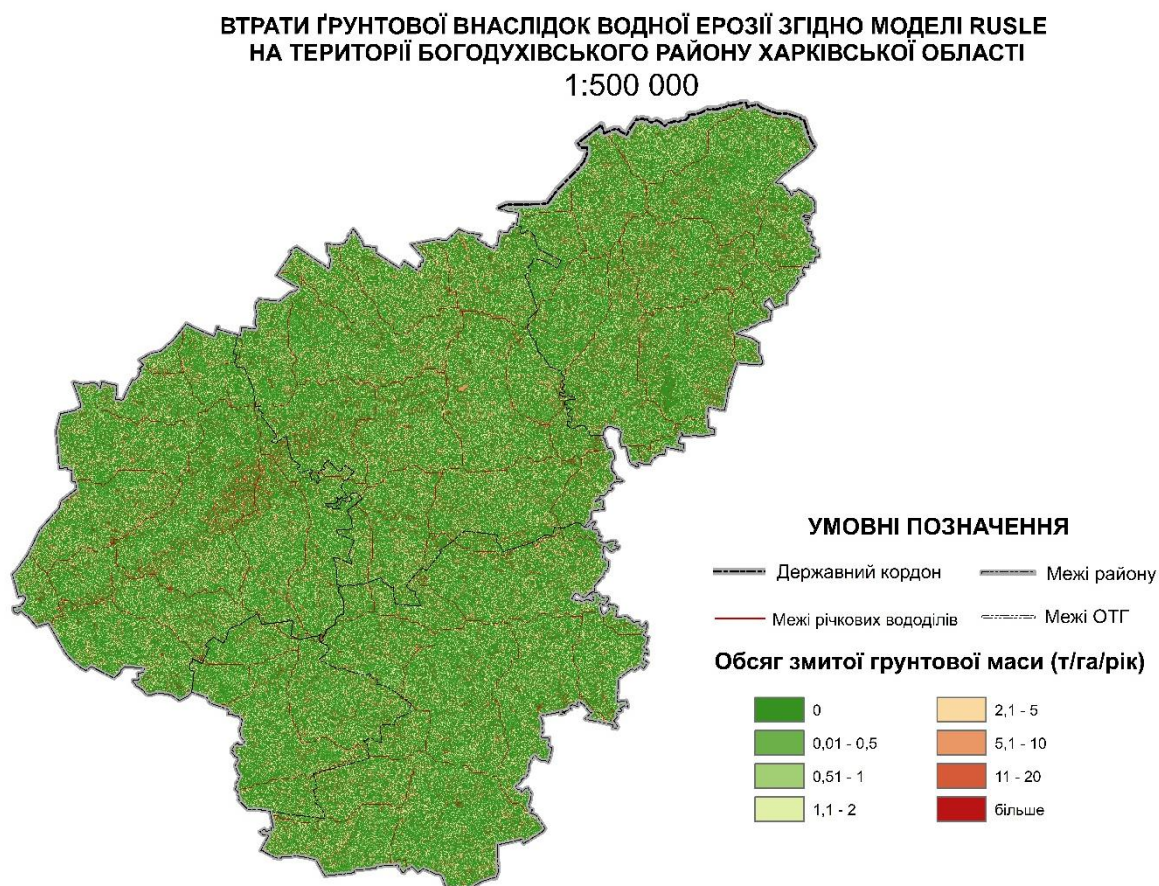


Рис. 3.5. Річна втрата ґрунтової маси на території Богодухівського району згідно розрахунків моделі RUSLE

Порівняно з вихідним результатом моделі WEPP, дане зображення є складним для візуального аналізу, через свою високу просторову роздільну здатність та індивідуальність показника кожної окремої комірки. Складність даної ситуації пояснюється особливістю побудованого растру LS-фактору, де простежується майже незрозуміла картина поширення показника без чітких закономірних особливостей. На основі цього можна зробити висновок про чітке корелювання між показниками втрат ґрунту за моделлю RUSLE та LS-фактором, тобто він має найбільший вплив на формування загальної ситуації зі значеннями втрат.

3.3. Просторово-територіальний аналіз отриманих даних за різними моделями

Найбільш об'єктивною, з точки зору функціонування моделей, оцінкою отриманих показників є аналіз за річковими басейнами найменшого порядку, що мають постійне або чітко виражене пересихаюче русло. В той же час цікавим є і аналіз з прив'язкою до адміністративно-територіальних одиниць району.

Оскільки розрахунки моделі GeoWEPP проводилися у відношенні до мікродозборів, тобто без прив'язки до одиниці площі, виникає проблема кількісного аналізу даного показника. Для вирішення даної проблеми було виконано перетворення растрового зображення в полігональне та обраховано площу кожного територіального об'єкта. Після чого обчислено обсяги змитого та накопиченого матеріалу, як відношення загального обсягу змитого/накопиченого матеріалу з мікродозбору до загальної його площі. Одиницею площі був обраний показник гектара.

Наступним кроком стала конвертація полігональної геометрії в растровий шар, на основі попередньо отриманого атрибуту прив'язаного

до одиниці площі. Після чого за допомогою інструменту Zonal Statistics було отримано статистичні дані про кожний водозбір та кожну територіальну одиницю району.

Аналіз отриманих результатів (табл. 3.4) доводить, що найбільш інтенсивний змив ґрунтової маси з гектара на рік згідно моделі GeoWEPP характерний для території Валківської та Краснокутської громад, оскільки для них є характерним значне вертикальне та горизонтальне розчленування території, розміщення на легкоеродованій материнській породі та широке поширення темно-сірих опідзолених ґрунтів, які, як виявилось в результаті моделювання, краще піддаються водній деструкції, на відміну від чорноземів типових, які є основним типом ґрунту на території інших районів.

Таблиця 3.4

Розраховані середні показники змиву та накопичення ґрунту за адміністративно-територіальним поділом Богодухівського району

ОТГ/показник	Золочівська	Богодухівська	Краснокутська	Коломацька	Валківська
Обсяг змиву ґрунтової маси (т/га/рік) (GeoWEPP)	1,79	1,43	1,81	1,56	1,91
Обсяг ґрунтонакопичення (т/га/рік) (GeoWEPP)	1,03	0,39	0,27	0,16	0,36
Обсяг змиву ґрунтової маси (т/га/рік) (RUSLE)	1,37	1,62	1,75	1,16	1,3

Найбільші середні значення обсягів ґрунтонакопичення на гектар характерні для території Золочівської громади, де перш за все простежується порівняно значне змиття самого ґрунту, що провокує його безпосереднє накопичення. По-друге, на території району розміщені два основні водозбори річок Уди та Лопань, які мають яскраво виражену та розвинуту мережу яружно-балкових систем на своїх правих та лівих

площинах, тоді як великих і чітко виражених приток досить мало, що провокує активне змивання ґрунту і його перевідкладення в межах сусідніх мікродозборів, адже все транспортування «зав'язане» лише на одному центральному водотоці.

Відповідна ситуація також була проаналізована у розрізі основних водозбірних територій, що повністю або частково знаходяться в межах Богодухівського району (рис. 3.6).

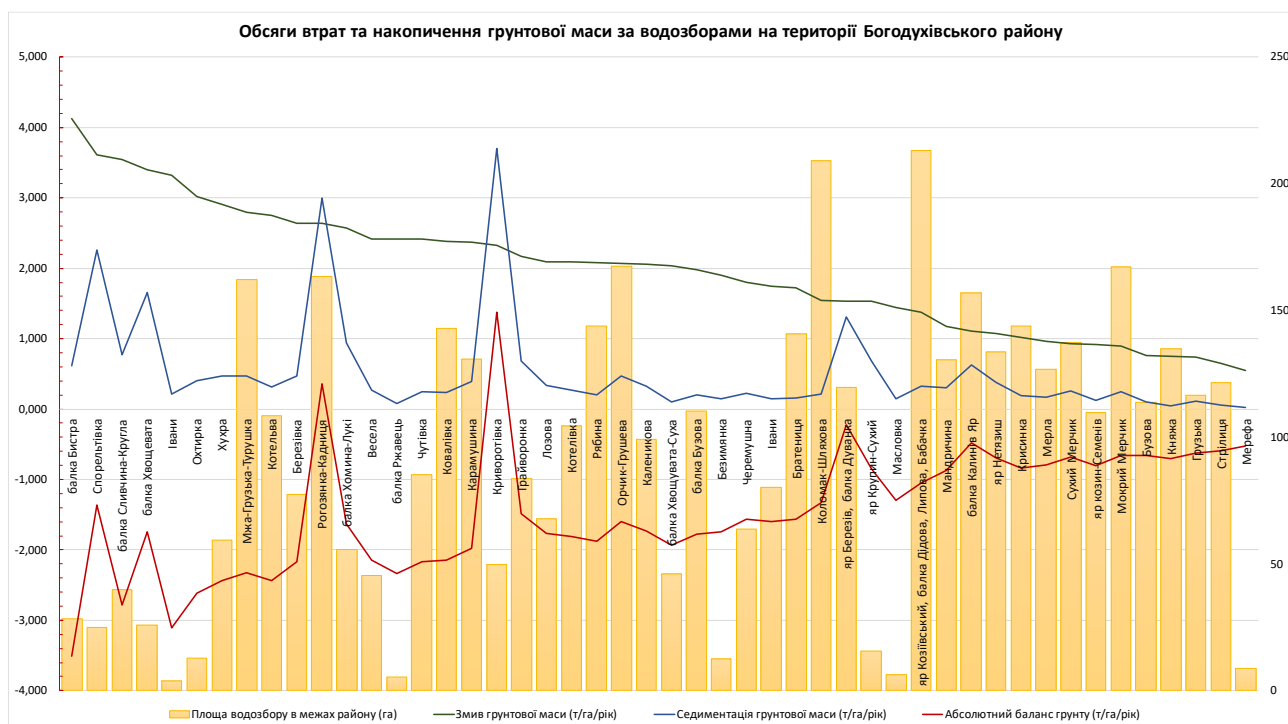


Рис. 3.6. Середні втрати та накопичення ґрунтової маси на водозборах Богодухівського району Харківського району згідно моделі GeoWEPP

В результаті отримуємо бачення щодо обсягів втрат ґрунтової маси, накопичення та абсолютного балансу ґрунту для кожної водозбірної території, де головними водотоками виступають витoki річок разом з притоками, окремі яри та балки, які входять до більших систем. Так, в середньому найбільші втрати ґрунтової маси характерні для балки Бистра (4,1 т/га/рік), що розміщується на крайньому заході Богодухівського району, проте дане визначення може бути частково не коректним, оскільки

для частини території не розраховані показники, з причин що наводилися в попередньому підрозділі.

Високі показники середнього змиву ґрунтової маси з гектару на рік є характерними для водозборів лівих приток Ворскли – Котельви (2,75 т/га/рік), Хухри (2,9 т/га/рік), Охтирки (3 т/га/рік), Веселої (2,4 т/га/рік), Березівки (2,64 т/га/рік). Іншими двома осередками інтенсивних втрат ґрунту є басейни приток Уди – Рогозянки-Кадниці (2,64 т/га/рік) і Криворотівки (2,32 т/га/рік), а також найбільшої її притоки – Лопані, водозбір якої формується з низки досить широко розвинутих та глибоких ярів і балок як то: Спорельтівка (3,6 т/га/рік), Хвощевата (3,39 т/га/рік), Хомина, Луки (2,57 т/га/рік) та інші. Окрему увагу також слід приділити басейну річки Мож, під-водозбори якої також мають суттєві показники змиву ґрунтової маси, а саме витік Мож-Грузька-Турушка (2,79 т/га/рік) та Івани (3,31 т/га/рік). Однак остання лише незначною частиною знаходиться в межах району, через що не можна з повною об'єктивністю розглядати її показники.

Абсолютними рекордсменами за середніми обсягами седиментації ґрунтового матеріалу є басейни водотоків Золочівського району, про що зазначалося вище. До таких басейнів належать: Криворотівка (3,7 т/га/рік), Рогозянка-Кадниця (3 т/га/рік), яр Березів – балка Дунавка (1,31 т/га/рік), балка Калинів Яр (1,1 т/га/рік), Спорельтівка (2,2 т/га/рік) та балка Хвощевата (1,66 т/га/рік), тобто вони всі відносяться до басейну Уди та Лопані.

Окрім цього, з вище наведеного графіку прослідковується чітка кореляція обсягів седиментації до балансу ґрунтової маси на водозборі. Лише в двох наведених випадках він є додатнім, а саме: у Криворотівці (1,37 т/га/рік) та Рогозянці-Кадниці (0,35 т/га/рік). Причому, дані випадки знову відносяться до басейнів Уди і Лопані, що свідчить проте, що процеси накопичення седименту інтенсивніші за процеси втрати ґрунту.

Візуалізація вихідних даних згідно розрахунків моделі RUSLE була розподілена за ідентичними вододілами та представлена у формі порівняльного графіку втрат ґрунту за двома моделями (рис. 3.7).

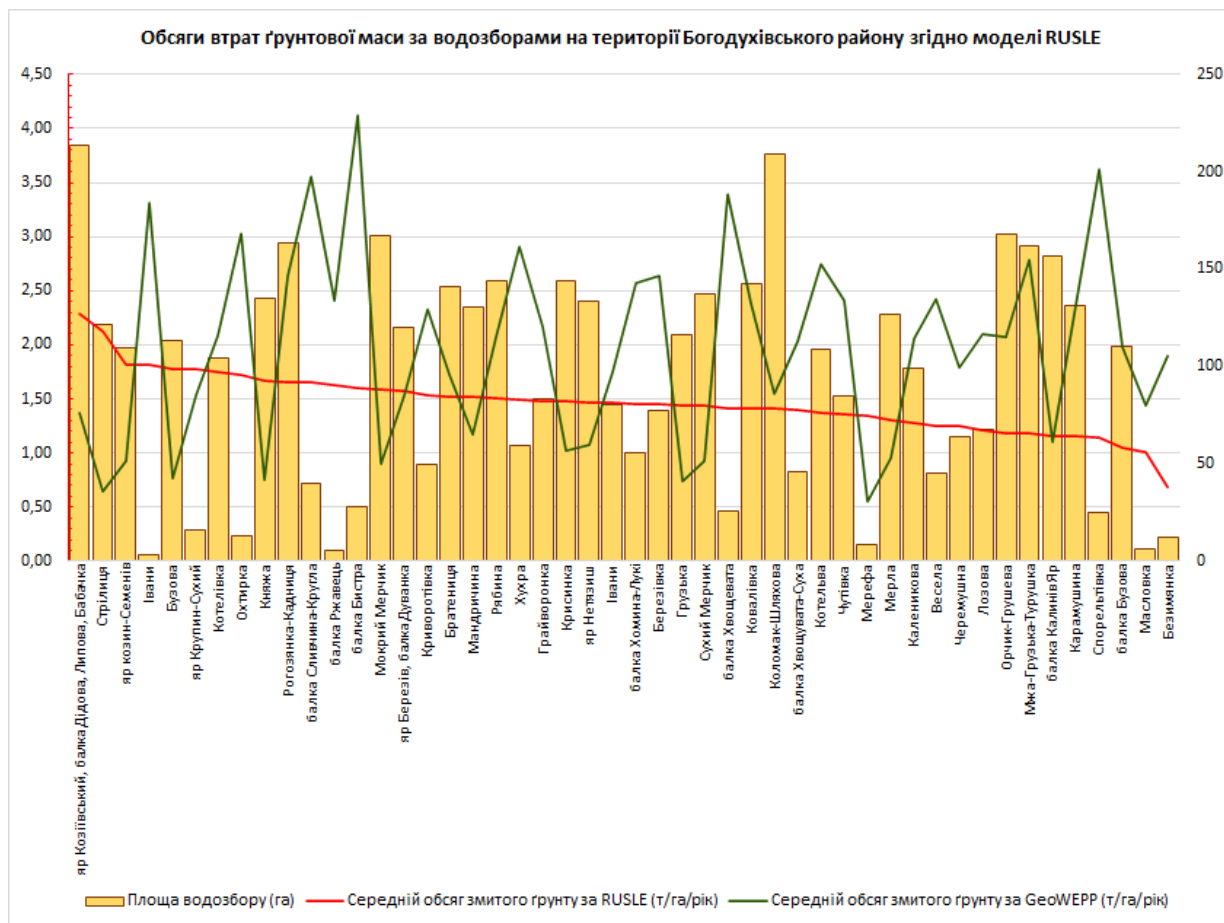


Рис. 3.7. Середні втрати ґрунтової маси на водозборах Богодухівського району Харківського району згідно моделі RUSLE

Згідно визначеного адміністративно-територіального розподілу показника за моделлю RUSLE (табл. 3.4), спостерігається відносно суттєва різниця між показниками першої моделі. Так найбільші втрати ґрунтової маси характерні для Краснокутської громади, проте в даному випадку різниця з моделлю GeoWEPP, є найменш вираженою, чого не сказати про Валківську громаду, де невідповідність складає понад 0,6 т/га/рік, що є досить значущою розбіжністю в межах великої площі території громади.

Найбільші показники втрат ґрунтової маси за моделлю RUSLE характерні для території Козіївських ярів, балки Дідової, Липової та

Бабачки (2,28 т/га/рік) , Стрілиці (2,13 т/га/рік), що майже на 0,9 т/га/рік 1,5 т/га/рік відповідно різняться з показниками, що були отримані моделлю GeoWEPP. Розташовуються дані водозбори на найбільш ерозійно розчленованій ділянці басейну річки Мерло, а саме на місці впадіння до неї Мерчика.

Тенденція невідповідності показників однієї моделі до іншої простежується майже у на всіх водозборах Богодухівського району, окрім: яр Крупин-Сухий; яр Березів, балка Дуванка; Коломак-Шляхова; балка Калинів Яр, де розбіжності складають до 0,1 т/га/рік.

Стосовно інших випадків, то значення можуть різнитися до понад 2,5 т/га/рік (балка Бистра) в бік перебільшення показників моделі GeoWEPP відносно RUSLE, і до 1,5 т/га/рік (Стрілиця) в бік применшення в протилежному випадку.

В свою чергу, найменші середні показники характерні для балки Бузової (1,04 т/га/рік), Масловки (1 т/га/рік) та Безим'янки (0,68 т/га/рік). Закономірностей розміщення даних показників немає, адже вони належать різним річковим басейнам та сформовані за різних умов.

Після проведених аналітичних дій над отриманими показниками для кожного водозбору за двома моделями було виявлено, що кореляція між ними дуже слабка. Так згідно коефіцієнта Пірсона, показник кореляції складає -0,121, що свідчить про дуже слабку негативну кореляцію та тенденційне зменшення значень GeoWEPP за збільшення показників отриманих моделлю RUSLE. Отримане Р-значення складає 0,411, тобто кореляції не є статистично значущою. Подібна ситуація і коефіцієнтом рангової кореляції Спірмена, де отримане значення складає -0,106, тобто кореляція також дуже статистично слабка, негативна та майже відсутня. Для аналізу зв'язку між моделями GeoWEPP та RUSLE було побудовано графік розсіювання та лінію тренду (рис. 3.8), результати яких теж вказують на слабкий зв'язок між значеннями двох моделей.

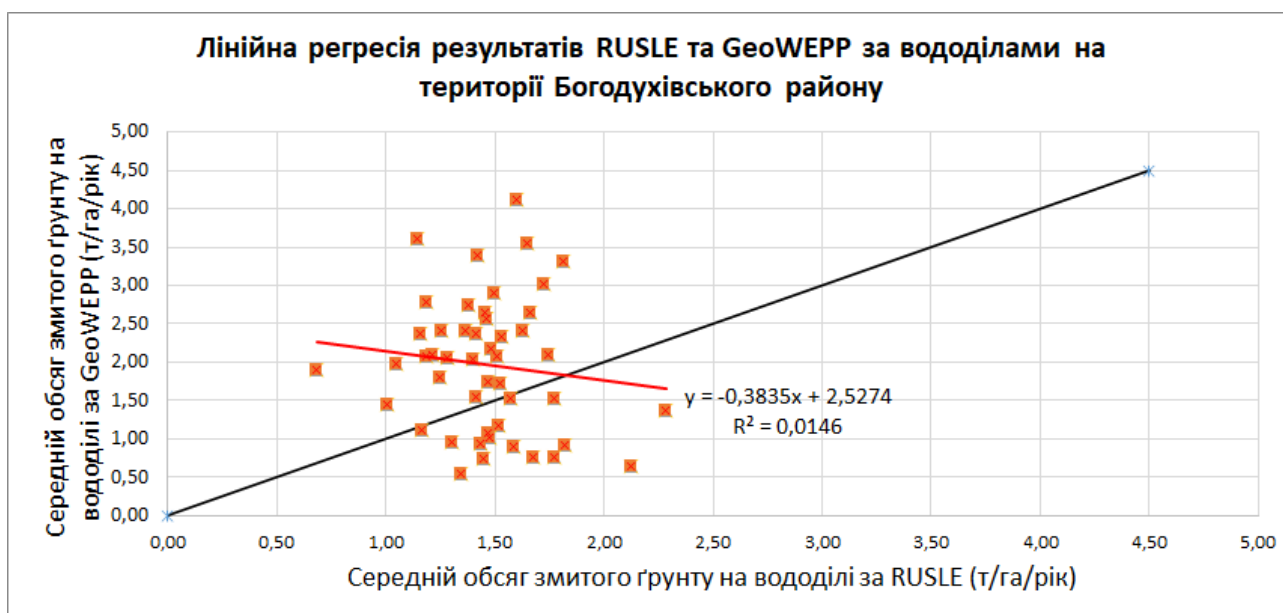


Рис. 3.8. Графік розсіювання отриманих показників двох моделей за водозборами

Лінія тренду має негативний нахил, тобто чим більший показник згідно RUSLE, тим менший показник за GeoWEPP. Також, лише 1,4% варіацій значень GeoWEPP пояснюється варіаціями показників RUSLE, тобто є черговим підтвердженням того, що між розподілом показників втрат ґрунту відсутній лінійний зв'язок, а тренди, що задають моделі, є досить протилежними.

Як видно з графіку, лінія ідеальної відповідності, перетинає значення у досить хаотичному відношенні. Точки, тобто відповідні вододіли, що розташовані над лінією, означають, що в моделі GeoWEPP змодельовано показники втрат ґрунту з перебільшенням, тоді як вододіли, що розташовані під лінією, свідчать про те, що в моделі RUSLE недооцінено інтенсивність ерозії, порівняно з іншою моделлю, що є досить характерною поведінкою даних моделей при їх використанні, про що згадувалося та наводилося в інших, попередньо згаданих, дослідженнях. В моделі GeoWEPP перебільшено розрахунки у значно більшій кількості

випадків вододілів та більш виражено, а саме у 66% випадків, тоді як в моделі RUSLE недооцінено втрати ґрунту лише на 33% водозборів.

До головних причин, що спровокували тенденцію перебільшення або недооцінки інтенсивності ерозії, можна віднести наступні фактори: а) використання узагальнених даних про механічні фракції в ґрунті від ФАО, які вплинули на одні з найбільш чутливих показників, а саме здатності ґрунту до ерозії; б) узагальнене використання даних про кількість опадів, під час обрахунку R-фактору в моделі RUSLE та використання вже готових наборів даних з території США від CLIGEN для GeoWEPP, які могли не цілком відповідати реальним показникам на території Богодухівського району, де відповідно дані показники також піддаються суттєвій диференціації; в) відсутність адаптованих для кліматичних умов території України формул обчислення R-фактору; г) використання одномоментного знімку Sentinel-2, який не відображає весь процес зміни культур та рослинних угруповань протягом року, тим самим впливаючи на С-фактор та класифікований растр землекористування; д) використання не відкаліброваних, проте (за умов відсутності польових досліджень) максимально близьких та інформативних даних про той чи інший тип покриву та менеджменту ним в моделі GeoWEPP; е) непристосованість моделей, особливо GeoWEPP, для їх використання, на територіях з площею близько 450 тис. га, з неймовірно великим різноманіттям рельєфної складової, великою кількістю водозбірних басейнів, та суттєвою розчленованістю ярами та балками.

ВИСНОВКИ

1. В результаті аналізу теоретико-методичних аспектів моделювання ерозійних процесів встановлено, що, незважаючи на різноманітність і варіативність існуючих класифікаційних одиниць моделей, як то: фізично обґрунтовані та емпіричні, концептуальні та гібридні, моделі для окремих ділянок, схилів, водозборів та ландшафтів в цілому, характерною ознакою усіх підходів до моделювання є активна інтеграція у локальні або веб-ГІС-інтерфейси з метою підвищення якості моделювання та прискорення збору наборів даних. Тенденцією сьогодення є і продовження взаємодії моделювання інтенсивності водної ерозії та еволюції ландшафтів, що проявляється в активному використанні основоположних підходів та методів моделювання ерозійних процесів в моделях еволюції ландшафтів.

2. Вивчення досвіду застосування ГІС для моделюванні ерозійних процесів показало, що активне залучення ГІС почалося наприкінці 90-х рр. ХХ ст. і охоплювало як часткове використання програмних пакетів ГІС для збору, обробки даних чи виконання певних етапів моделювання, так і максимальне використання можливостей ГІС-пакетів на усіх етапах моделювання і аналізу його результатів. В межах останнього вже протягом 20 років активно розвивається геоінформаційне моделювання прогнозування змін поверхні – моделі еволюції ландшафтів (LEM).

3. Аналіз принципів функціонування моделей прогнозування втрат ґрунтової маси довів, що RUSLE та GeoWEPP є одними з найбільш поширених не вітчизняних моделей, що використовуються при територіально різнорівневих дослідженнях інтенсивності водної ерозії на території України. Встановлено, що дана закономірність зумовлена тим, що моделі можуть бути досить просто адаптованими до різних агро-кліматичних умов шляхом калібрування показників-факторів та використовуватися за умов доступу лише до даних ДЗЗ та відкритих інтернет-джерел. Аналіз досліджень щодо порівняння точності отриманих

результатів за моделями RUSLE та GeoWEPP суттєво різняться, адже кожна з моделей може або завищувати або занижувати змодельовані втрати ґрунту порівняно до реально виміряних.

4. До основних факторів, що впливають на розвиток ерозійних процесів в межах Богодухівського району Харківської області, належать: збільшення показників абсолютних висот у північно-східному напрямку території району; інтенсивне розчленування рельєфу, що характерне для правобережних схилів річкових долин, особливо для Золочівської громади; досить високий рівень розвитку гідрологічної мережі в районі, де за своїми розмірами виділяється водозбірний басейн річки Мерло; особливості кліматичних умов, зокрема тенденція до поступового збільшення кількості опадів. Сукупність цих факторів у поєднанні із суттєвою розораністю території призводить до поширення ерозійних процесів та процесів деградації ґрунтів, наслідком чого є домінування у ґрунтовому покриві району чорноземів типових малогумусних та чорноземів сильнореградованих із наявністю змитості різного ступеню.

5. Результати моделювання втрат ґрунтової маси водної ерозії в межах Богодухівського району за моделями RUSLE та GeoWEPP доводять, що незважаючи на виявлену відсутність кореляційних зв'язків між показниками обох моделей та можливе перевищення/недооцінку результатів порівняно з реальними втратами, впроваджувати протиерозійні заходи або, як мінімум, проводити моніторинг ерозійної ситуації в межах Богодухівського району, слід на водозборах річок Братениця, Івани, Масловка, Котелівка, Мандричина, Крисинка, витоках річок Коломак та Мерло, а також на водозбірних площах ярів, що знаходяться на території Золочівської громади, як то – яр Березів, балка Дуванка, балка Калинів Яр, яр Крупин-Сухий тощо, адже саме у даних випадках прослідковуються найменші розбіжності в показниках обох моделей, через що їх можна вважати відносно близькими до реальних.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ачасов, А. Б. Ґрунтово-ґеоінформаційні засади протиерозійної оптимізації агроландшафтів: теорія і практика. автореф. дис. д-ра с.-г. наук. Київ : Національний університет біоресурсів і природокористування України, 2009. 40 с.
2. Ачасов, А. Б., Тітенко, Г. В., Селіверстов, О. Ю., Мельник, Д. О., & Кот, А. Г. Моделювання процесів водної ерозії за допомогою моделі WEPP : методичні вказівки щодо виконання практичних робіт. Харків : Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, 2022.
3. Байрак, Г. Р. Можливості ГІС для відображення характеристик рельєфу і проявів сучасної екзодинаміки. *Проблеми безперервної географічної освіти і картографії*. 2014. Вип. 19. С. 3-6
4. Горішний, П. М. Морфологічний аналіз рельєфу: Навчальний посібник. Львів: ЛНУ імені Івана Франка, 2022. 120 с.
5. Іванюк, Г. С. Класифікація і діагностика ґрунтів: навчальний посібник. Львів: ЛНУ імені Івана Франка, 2017. 334 с.
6. Клименко, В. Г. Гідрологія України: навчальний посібник для студентів-географів. Харків: ХНУ ім. В.Н. Каразіна, 2010. 124 с.
7. Лук'янчук К. А. Моделювання впливу геоморфологічних умов на розвиток ерозійних процесів та формування змитих ґрунтів. *Інформаційні технології: економіка, техніка, освіта: IX Міжнародна науково-практична конференція молодих вчених, м. Київ, 14-15 листопада 2018 року: тези доповіді*. Київ, 2018. С. 37-39.
8. Лук'янчук, К. А. Ґеоінформаційне моделювання розвитку ерозійних процесів на локальному і районному рівнях : автореф. дис. канд. геогр. наук : 11.00.01. Київ, 2020. 20 с.
9. Назаренко В. В. Аналіз інтенсивності водної ерозії на водозбірних територіях верхньої течії р. Мерла за допомогою ГІС-моделювання.

Географічні дослідження: Історія, сьогодення, перспективи: Збірник наукових праць. 2025. Вип. 17. С. 91-94.

10. Назаренко В. В. Оцінка потенціалу змиву ґрунтів Богодухівського району Харківської області за допомогою факторної моделі RUSLE. *Географічні дослідження: Історія, сьогодення, перспективи: Збірник наукових праць. 2024. Вип. 16. С. 96-99.*

11. Назаренко В. В., Бубир Н. О. Детекція інтенсивності водної ерозії на земельних угіддях за допомогою спеціалізованого ГІС-моделювання. *Сучасні технології землеустрою, кадастру та управління земельними ресурсами: Матеріали X Міжнародної науково-практичної конференції. 2025.*

12. Никитюк, Ю., Кравченко, О. Estimation and forecasting of soil losses from water erosion in the Polissia and Forest Steppe of Ukraine. *Agrology. 2025. Vol. 8, No. 1. P. 3-8.*

13. Обласов, В. І., Балик, Н. Г. Протиерозійна організація території: навчальний посібник. Київ: Аграрна освіта, 2009. 215 с.

14. Павловська, Т. С., Ковальчук, І. П. Геоморфологія : навчальний посібник для студентів закладів вищої освіти. Луцьк : Вежа-Друк, 2022. 348 с.

15. Пічура, В. І., Потравка, Л. О., Дудяк, Н. В., Рутта, О. В. Моделювання водно-дефляційної деструкції степових ґрунтів України. Херсон : Херсонський державний аграрно-економічний університет, б.д.

16. Світличний, О. О. Пространственное геоинформационное моделирование и прогноз водной эрозии почв. *Проблеми безперервної географічної освіти і картографії. 2013. Вип. 17. С. 44-47.*

17. Світличний, О. О., П'яткова, А. В. Прикладне ерозієзнавство : навчальний посібник. Одеса : ОНУ, 2020. 137 с.

18. Світличний, О. О., Чорний, С. Г. Основи ерозієзнавства : підручник. Суми : ВТД «Університетська книга», 2007. 266 с.

19. Трофименко, П., Мислива, Т., Бежодкова, Ю., Трофименко, Н., Ляшенко, Д., Балаєв, А. Assessment on the scale on soil erosion in the agrolandscapes on the Forest-Steppe of Ukraine according to the RUSLE model. *Fourth EAGE Workshop on Assessment of Landslide Hazards and Impact on Communities*. 2023. P. 1-5.
20. Наукові та прикладні основи захисту ґрунтів від ерозії в Україні / Українська академія аграрних наук, Національний науковий центр «Інститут ґрунтознавства та агрохімії імені О. Н. Соколовського». Харків, 2010.
21. Abdulkareem J., Yamusa A., Girei A. An overview of soil erosion modelling. 2021. P. 206-215.
22. Aghaei Dargiri S., Samsampour D. Principles of Soil Erosion Risk Modeling. IntechOpen, 2024.
23. Prediction Models for Water Erosion Risk Management: A Review Erosion Risk Assessment model (The PESERA model) / H. Ahamefule et al. *The Coordination Information Environment*. 2018. P. 1389-1396.
24. Prediction of gully erosion susceptibility mapping using novel ensemble machine learning algorithms / A. Arabameri et al. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*. 2021. Vol. 12, No. 1. P. 469-498.
25. Benavidez R., Jackson B., Maxwell D., Norton K. A review of the (Revised) Universal Soil Loss Equation ((R)USLE): With a view to increasing its global applicability and improving soil loss estimates. *Hydrology and Earth System Sciences*. 2018. Vol. 22. P. 6059-6086.
26. Blöschl G., Sivapalan M. Scale issues in hydrological modelling - a review. *Hydrological Processes*. 1995. Vol. 9. P. 251-290.
27. Boardman J. Soil erosion science: Reflections on the limitations of current approaches. *CATENA*. 2006. Vol. 68. P. 73-86.
28. Boggs G., Evans K., Devonport C. ArcEvolve: A Suite of GIS Tools for Assessing Landform Evolution. 2001.

29. Borrelli, P., Alewell, C., et al. . Soil erosion modelling: A global review and statistical analysis. *Science of The Total Environment*. 2021. P. 780.
30. Bulygin S. Yu., Nearing M. A., Achasov A. B. Parameters of interrill erodibility in the WEPP model. *Eurasian Soil Science*. 2002. Vol. 35, No. 11. P. 1237-1242.
31. Cecílio R. A., Rodriguez R. G., Baena L. G. N., Oliveira F. G., Pruski F. F., Stephan A. M., Silva J. M. A. Analysis of the RUSLE and WEPP models for a small watershed located in Viçosa, Minas Gerais State, Brazil. \13th International Soil Conservation Organisation Conference (ISCO 2004), Brisbane, July 2004, Paper No. 658, P. 1.
32. Corobov R., Syrodoev G., Trombitsky I. WEPP MODEL AS A TOOL FOR ASSESSING THE SOIL LOSS AND SEDIMENT DEPOSITION IN A RIVER BASIN. 2023.
33. Corral-Pazos-de-Provens E., Domingo-Santos J. M., Rapp-Arrarás Í. Estimating the very fine sand fraction for calculating the soil erodibility K-factor. Departamento de Ciencias Agroforestales, Universidad de Huelva, Palos de la Frontera, Huelva, Spain, 2023.
34. Efthimiou N., Lykoudi E., Karavitis C. Comparative analysis of sediment yield estimations using different empirical soil erosion models. *Hydrological Sciences Journal*. 2017. Vol. 62, No. 16. P. 2674-2694..
35. Fernández C., Vega J. A. Evaluation of the RUSLE and Disturbed WEPP erosion models for predicting soil loss in the first year after wildfire in NW Spain. *Environmental Research*. 2018. Vol. 165. P. 279--285.
36. USDA - Water Erosion Prediction Project: Hillslope profile and watershed model documentation / D. C. Flanagan, M. A. Nearing. NSERL Report No. 10, Chapter 1, Soil Component. USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory, 1995.
37. USDA - Water Erosion Prediction Project: Hillslope profile and watershed model documentation / D. C. Flanagan, M. A. Nearing. NSERL Report

No. 10, Chapter 7, Soil Component. USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory, 1995.

38. Flanagan D. C., Gilley J. E., Franti T. G. Water erosion prediction project (WEPP): Development history, model capabilities, and future enhancements. *Transactions of the ASABE*. 2007. Vol. 50, No. 5. P. 1603-1612.

39. Flanagan D. C., Renschler C. S., Cochrane T. A. Application of the WEPP model with digital geographic information. *4th International Conference on Integrating GIS and Environmental Modeling (GIS/EM4): Problems, prospects and research needs*, Banff, Alberta, Canada, September 2-8, 2000.

40. Flanagan D. C. Application of the WEPP model to hillslopes and watersheds in the USA. U.S. Department of Agriculture (USDA), 2011.

41. Gabriels D. Water Erosion Processes and modelling. Gollege on soil physics. 2001. P. 337-347.

42. Днепровско-Донецкая впадина (геофизика, глубинные процессы) / Gordienko. V et al. 2006.

43. Hajigholizadeh M., Melesse A., Fuentes H. Erosion and Sediment Transport Modelling in Shallow Waters: A Review on Approaches, Models and Applications. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2018. Vol. 15. P. 518.

44. Karydas C. G., Panagos P., Gitas I. Z. A classification of water erosion models according to their geospatial characteristics. *International Journal of Digital Earth*. 2012. Vol. 7, No. 3. P. 229-250.

45. Khan S., Omran A., Schröder D. та ін. A QGIS-plugin for gully erosion modeling. *Earth Science Informatics*. 2023. Vol. 16. P. 3269-3282.

46. Laflen J. M., Elliot W., Simanton J. R., Holzhey C. S., Kohl K. D. WEPP: Soil Erodibility Experiments for Rangeland and Cropland Soils. *Journal of Soil and Water Conservation*. 1991. Vol. 46.

47. Luo W., Duffin K., Peronja E., Stravers J., Henry G. A web-based interactive landform simulation model (WILSIM). *Computers \ Geosciences*. 2004. Vol. 30. P. 215-220.
48. Using the GeoWEPP model to predict water erosion in micro-watersheds in the Brazilian Cerrado / W. de A. Magalhães et al. 2023.
49. Miller M. E., Billmire M. Rapid response tools and datasets to support BAER assessment: Spatial WEPP modeling with QWEPP \ the Rapid Response Erosion Database (RRED). *NASA ARSET Training*. Michigan Tech Research Institute, Ann Arbor, MI, 2017.
50. Minkowski M., Renschler C. S. GeoWEPP for ArcGIS 9.x: Full version manual (for GeoWEPP Version 2.2008 or earlier). Department of Geography, The State University of New York at Buffalo, 2008.
51. Mirzaee S., Ghorbani-Dashtaki S., Mohammadi J., Asadzadeh F., Kerry R. Modeling WEPP erodibility parameters in calcareous soils in northwest Iran. *Ecological Indicators*. 2017. Vol. 74. P. 302-310.
52. Mitsova H., Barton C. M., Ullah I., Hofierka J., Harmon R. GIS-based soil erosion modeling. 2013.
53. Mossaad M., Wu T. A stochastic model of soil erosion. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*. 1984. Vol. 8. P. 201-224.
54. Nadiya, M. Оновлене фізико-географічне районування Харківської області Updated physical-geographical zoning of the Kharkiv region. *Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна*. Серія "Екологія". 2016. Вип. 14. С. 20-32.
55. Nóbrega R. L. B., Guzha A. C., Torres G. N., Kovacs K., Lamparter G. та ін. Correction: Effects of conversion of native cerrado vegetation to pasture on soil hydro-physical properties, evapotranspiration, and streamflow on the Amazonian agricultural frontier. 2020.

56. Omran A., Schröder D., Sommer C., Hochschild V., Märker M. A GIS-based simulation and visualization tool for the assessment of gully erosion processes. *Journal of Spatial Science*. 2022. Vol. 68, No. 4. P. 685-702.
57. Rahaman S. A., Solavagounder A., Rajagopal J., Ajeez S. ESTIMATION OF ANNUAL AVERAGE SOIL LOSS, BASED ON RUSLE MODEL IN KALLAR WATERSHED, BHAVANI BASIN, TAMIL NADU, INDIA. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2015. Vol. II-2/W2. P. 207-214.
58. Raza A., Ahrends H., Habib-Ur-Rahman M., Gaiser T. Modeling Approaches to Assess Soil Erosion by Water at the Field Scale with Special Emphasis on Heterogeneity of Soils and Crops Land. 2021. Vol. 10, No. 4. P. 422.
59. Renschler C., Flanagan D., Engel B., Frankenberger J. GeoWEPP - The Geo-spatial interface for the Water Erosion Prediction Project. 2002.
60. Stolpe N. B. A comparison of the RUSLE, EPIC and WEPP erosion models as calibrated to climate and soil of south-central Chile. *Acta Agriculturae Scandinavica*, Section B - Soil \ Plant Science. 2005. Vol. 55, No. 1. P. 2-8.
61. Syrodoev G., Corobov R., Trombitsky I. WEPP MODELING OF SOIL LOSS AND SEDIMENT DEPOSITION IN THE BALTATA RIVER BASIN. 2022.
62. Temme A. J. A. M., Schoorl J. M., Claessens L., Veldkamp A. Quantitative Modeling of Landscape Evolution. 2021.
63. Thyer M., Frost A., Kuczera G. Parameter estimation and model identification for stochastic models of annual hydrological data: Is the observed record long enough? *Journal of Hydrology*. 2006. Vol. 330. P. 313-328.
64. Valters D. Modelling Geomorphic Systems: Landscape Evolution. 2016. 24 p.
65. Wischmeier W. H., Smith D. D. Predicting rainfall erosion losses - a guide to conservation planning. Agriculture Handbook. No. 537. Washington DC : U.S. Department of Agriculture, 1978-1981. 67 p.

66. Zema D., Nunes J. P., Lucas-Borja M. E. Improvement of seasonal runoff and soil loss predictions by the MMF (Morgan-Morgan-Finney) model after wildfire and soil treatment in Mediterranean forest ecosystems. *Catena*. 2019.
67. Zhang H., Renschler C. S. QGeoWEPP for QGIS 3.x Version: Overview manual (Draft). GeoWEPP.org. USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory (NSERL), 2024.
68. ASF Data Search Vertex : веб-сайт. URL : <https://search.asf.alaska.edu/> (дата звернення: 29.05.2025).
69. Buckley A. Understanding curvature rasters. *ArcGIS Blog*. URL : <https://www.esri.com/arcgis-blog/products/product/imagery/understanding-curvature-rasters/> (дата звернення: 29.05.2025).
70. Безшовні гідрографічні дані для глобальних і регіональних застосувань : веб-сайт. URL : <https://www.hydrosheds.org/> (дата звернення: 29.05.2025).
71. Доступ до даних Copernicus : веб-сайт. URL : <https://browser.dataspace.copernicus.eu/> (дата звернення: 29.05.2025)
72. Екстракти даних OpenStreetMap : веб-сайт. URL : <https://download.geofabrik.de/> (дата звернення: 29.05.2025).
73. Історичні щомісячні дані про погоду : веб-сайт. URL : <https://www.worldclim.org/data/index.html> (дата звернення: 29.05.2025).