

КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА
ГЕОГРАФІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ
КАФЕДРА ГІДРОЛОГІЇ ТА ГІДРОЕКОЛОГІЇ

Галузь знань 10 – Природничі науки

Спеціальність 103 – Науки про Землю

Освітньо-наукова програма:

Гідрологія та інтегроване управління водними ресурсами

**ЗАСТОСУВАННЯ ПРОГРАМНОГО КОМПЛЕКСУ HEC-RAS ДЛЯ
МОДЕЛЮВАННЯ ГІДРОЛОГІЧНОГО РЕЖИМУ Р. ГОРИНЬ**

студент 2-го курсу магістратури
кафедри гідрології та гідроекології
Совков Олексій Сергійович

Кандидат географічних наук
Розлач Захар Валерійович

Київ - 2026

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
РОЗДІЛ 1 ФІЗИКО-ГЕОГРАФІЧНІ УМОВИ	7
1.1. Підстильна основа	7
1.2. Ґрунти та рослинність.....	9
1.3. Кліматичні особливості	12
Висновки до розділу 1	13
РОЗДІЛ 2 ГІДРОЛОГІЧНИЙ РЕЖИМ	16
2.1 Природні умови формування гідрологічного режиму р. Горинь.....	16
2.2 Фази водності та їх характеристики.....	19
2.3 Максимальні витрати води.....	20
Висновки до розділу 2	23
РОЗДІЛ 3 МОДЕЛЮВАННЯ ВОДНОГО РЕЖИМУ Р. ГОРИНЬ.....	25
3.1 Сутність та переваги комп'ютерного моделювання.....	25
3.2 Методична основа	27
3.2.1 Характеристика вхідних даних	28
3.2.2 Попередня обробка даних у середовищі QGIS	30
3.2.3 Розрахунок витрат різної забезпеченості	31
3.2.4 Побудова геометрії та обчислювальної сітки моделі HEC-RAS 2D...	32
3.2.5 Вибір коефіцієнтів шорсткості	33
3.3 Моделювання різних фаз водності	34
3.3.1 Загальна характеристика розрахункових сценаріїв	34
3.3.2 Результати моделювання повені 10% забезпеченості	35
3.3.3 Результати моделювання повені 1% забезпеченості	38
3.3.4 Результати моделювання повені 0,5% забезпеченості	40
Висновки до розділу 3	44

ВИСНОВКИ.....	46
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	48
ДОДАТКИ.....	53

ВСТУП

Актуальність теми. Сучасна гідрологія стикається з серйозними викликами, зумовленими стрімкими кліматичними змінами та значним антропогенним навантаженням на водозбори. Для території України зафіксовано підвищення середньорічної температури на $1,4^{\circ}\text{C}$ за останнє століття, що призводить до суттєвої трансформації гідрологічного режиму річок, зокрема в басейні Прип'яті. Зміна часових характеристик сніготанення, зростання частки зимових рідких опадів та збільшення частоти екстремальних конвективних опадів у теплий період року порушують фундаментальне припущення щодо стаціонарності гідрологічних рядів.

Річка Горинь, як одна з найбільших правих приток Прип'яті, зазнає відчутного впливу цих змін: спостерігається стійке зниження середніх максимальних витрат весняного водопілля на 25–40% та зміщення дат проходження максимумів. Ситуація ускладнюється антропогенними факторами — високим рівнем розораності басейну (понад 60%) та наслідками масштабних осушувальних меліорацій минулого століття. Оскільки р. Горинь відноситься до водотоків з підвищеним паводковим ризиком, традиційні методи розрахунків та емпіричного аналізу виявляються недостатніми для надійного прогнозування екстремальних явищ.

Саме тому застосування сучасних комп'ютерних комплексів, зокрема гідравлічної моделі HEC-RAS, є вкрай необхідним інструментом. Це дозволяє відтворити нелінійну природу гідрологічних процесів, детально змодельовати гідродинаміку русла й заплави та розрахувати сценарні варіанти проходження паводків в умовах нових кліматичних реалій.

Мета дослідження полягає у комплексній оцінці та моделюванні гідрологічного режиму річки Горинь за допомогою програмного комплексу HEC-RAS з урахуванням сучасних кліматичних змін для прогнозування фаз водності та управління паводковими ризиками.

Для досягнення поставленої мети було визначено такі основні завдання:

1. Проаналізувати фізико-географічні умови (геологічну будову, рельєф, ґрунтово-рослинний покрив та кліматичні особливості) басейну р. Горинь як підстильної основи формування стоку.
2. Дослідити природні умови формування гідрологічного режиму, проаналізувати сучасні фази водності та визначити розрахункові характеристики максимальних витрат води.
3. Обґрунтувати методичну основу та переваги застосування комп'ютерного моделювання (зокрема HEC-RAS) для відтворення водного режиму.
4. Здійснити моделювання різних фаз водності р. Горинь в умовах змін клімату.
5. Виконати оцінку ризиків затоплення заплави та розробити заходи, спрямовані на зменшення негативних наслідків екстремальних гідрологічних явищ.

Об'єктом дослідження є річка Горинь.

Предметом дослідження є моделювання гідрологічного режиму р. Горинь з використанням програмного комплексу HEC-RAS.

Методи дослідження. У роботі використано комплекс методів: географічний та ландшафтно-гідрологічний аналіз (для оцінки умов формування стоку), математико-статистичні методи (для визначення розрахункових витрат максимального стоку за розподілом Пірсона III типу згідно з ДБН В.2.4-8:2014), методи геоінформаційних систем (ГІС) для просторової параметризації русла та заплави, а також методи гідравлічного (гідродинамічного) моделювання за допомогою програмного комплексу HEC-RAS.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у комплексному поєднанні даних максимального стоку з врахуванням сучасних змін клімату, із двовимірним гідравлічним моделюванням русло-заплавних процесів р. Горинь, що дозволяє отримати більш точні прогнози поведінки річкової системи порівняно з класичними підходами.

Практичне значення одержаних результатів. Отримані модельні сценарії та розрахункові характеристики можуть бути безпосередньо використані

басейновими управліннями водних ресурсів, проектними організаціями та органами місцевого самоврядування для вдосконалення систем протиповеневого захисту, оптимізації водогосподарських заходів та просторового планування розвитку прирічкових територій з урахуванням зростаючих кліматичних ризиків.

РОЗДІЛ 1

ФІЗИКО-ГЕОГРАФІЧНІ УМОВИ

Формування гідрологічного режиму річок визначається сукупністю фізико-географічних умов водозбірного басейну, які в сукупності утворюють складну взаємопов'язану систему. Геологічна будова, рельєф, ґрунтовий і рослинний покрив, а також кліматичні характеристики — усі ці чинники визначають механізми накопичення, трансформації та відтоку водних мас у межах водозбору. Комплексне вивчення цих умов є обов'язковою передумовою для будь-якого гідрологічного дослідження, зокрема для математичного моделювання режиму річкового стоку.

Об'єктом дослідження у цій роботі є річка Горинь — одна з найбільших правих приток Прип'яті, що протікає по території Хмельницької, Рівненської та Волинської областей України. Неоднорідність природних умов у межах водозбору, виражена у різноманітності геологічної будови, морфології рельєфу та рослинного покриву від Подільської височини до Поліської низовини, визначає складний характер гідрологічних процесів на цій водній артерії. Детальне вивчення фізико-географічних характеристик басейну є необхідним підґрунтям для коректного застосування програмного комплексу HEC-RAS та надійної інтерпретації результатів моделювання гідрологічного режиму Горині в умовах сучасних кліматичних змін.

1.1. Підстильна основа

Басейн річки Горинь у тектонічному відношенні приурочений до Волино-Подільської плити — геологічної структури на заході України, розташованої між Українським кристалічним щитом на сході і Передкарпатським прогином на заході [1]. Фундамент плити складається з магматичних і метаморфічних гірських порід архейського й ранньо протерозойського віку, а у структурному

відношенні плита поділяється на моноклінальний схил Українського щита і Галицько-Волинську синеклізу, де докембрійський фундамент опускається до глибини 7 000 м [1]. На схід від Горині відслююється безпосередньо Волино-Подільський блок Українського кристалічного щита, де давні кристалічні породи залягають значно ближче до поверхні [4].

Осадочний чохол, що перекриває фундамент, складений відкладами палеозойського, мезозойського та кайнозойського віку. Крейдові вапняки, мергелі та писальна крейда мають важливе гідрогеологічне значення: вони утворюють потужні водоносні горизонти, що забезпечують підземне живлення річки у меженний сезон [4]. Наукове дослідження Яцика та співавторів встановило, що складна геологічна будова басейну є одним із визначальних чинників водогосподарських проблем Горині: геологічна неоднорідність формує нерівномірний розподіл підземних вод і зумовлює суттєві відмінності у характері живлення річки на різних ділянках водозбору [9].

Четвертинні відклади охоплюють більшу частину водозбору і відзначаються значною різноманітністю. У межах Полісся поширені флювіогляціальні піски і суглинки льодовикового походження; у долині Горині накопичено алювій різного гранулометричного складу; у центральній і південній частинах басейну четвертинний чохол представлений лесоподібними суглинками [2]. Різна водопроникність цих відкладів визначає просторові відмінності у інтенсивності інфільтрації опадів і є важливим параметром при калібруванні субмодулі підземного стоку.

Рельєф басейну відзначається контрастним характером. Річка бере початок на Волино-Подільській височині і у верхів'ї (до впадіння р. Устя) протікає на плато з висотами 380–215 м, яке сильно розчленоване долинами річок і балок, тоді як середня й нижня частини річки лежать на заболоченій Поліській низовині з плоским рельєфом з піщаними пагорбами [2]. Загальне падіння річки становить 218 м, середній похил водної поверхні — 0,33‰ [3].

Долина Горині набуває принципово різних рис на різних ділянках. У верхній і середній течії спостерігається добре виражена трапецієподібна долина

зі схилами помірної крутості і заплавою шириною до 1–3 км. Нижче смт Оржів ширина долини досягає 10–15 км [5], а заплава набуває заболоченого поліського характеру і розчленована осушувальними каналами. Річище звивисте; ширина зростає від 5–10 м у верхів'ї до 25–60 м у нижній течії; глибина на плесах — 1,5–2,5 м, подекуди до 11 м, на перекатах — до 0,3 м; похил річки — 0,29 м/км [5].

Русло Горині відзначається значною звивистістю у середній і нижній течії. За офіційними даними Регіонального офісу водних ресурсів у Хмельницькій області, "русло Горині у верхній частині течії помірно звивисте, у середній і нижній — сильно звивисте, переважно нерозгалужене", а ширина "поступово зростає від 3–10 м до 25–60 м" [6]. На ділянці від гирла річки Полтва і нижче ширина річища відповідно зростає. Морфометричні характеристики русла є ключовими вхідними даними для формування поперечних перерізів у геометрії моделі HEC-RAS.

Гідрографічна мережа басейну є добре розвиненою. На ділянці Хмельницької області нараховується 1 279 приток різних порядків загальною довжиною 2 593 км, а густота річкової мережі становить 0,54 км/км² [6]. Горинь є найбільшою притокою Прип'яті в межах України [8]. Заплавні болота поліської частини басейну, що до осушення займали близько 6% площі, відігравали роль природних регуляторів стоку [3].

Отже, підстильна основа басейну Горині характеризується двома головними рисами: двоярусною геологічною будовою Волино-Подільської плити, що визначає умови підземного живлення, та контрастним рельєфом від Подільської височини до Поліської низовини. Ця просторова неоднорідність вимагає детальної геометричної параметризації при побудові моделі HEC-RAS і є вирішальним чинником просторового розподілу гідравлічних умов.

1.2. Ґрунти та рослинність

Ґрунтово-рослинний покрив відіграє ключову роль у формуванні водного балансу: визначає інтенсивність інфільтрації опадів, частку поверхневого стоку

та евапотранспірацію. Просторовий розподіл ґрунтів і рослинного покриву у межах водозбору Горині тісно пов'язаний із зміною геологічних, рельєфних і кліматичних умов між Поліссям і Подільською височиною. Дослідження Яцика та співавторів [9] встановило, що надмірне сільськогосподарське освоєння земель у басейні призвело до різкого скорочення площ природних угідь, що суттєво трансформувало водний баланс і погіршило екологічний стан річки.

У поліській частині басейну, що охоплює більшу частину Рівненської та Волинської областей, панівним типом є дерново-підзолисті ґрунти, що формуються на флювіогляціальних пісках і супісках. Їхня незначна водоутримувальна здатність і висока фільтраційна здатність піщаних відкладів забезпечують значну інфільтрацію опадів у підземний горизонт, що обмежує частку поверхневого стоку і сприяє підземному живленню Горині. Поряд із ними значні площі в пониженнях і заплавах займають болотні та торфово-болотні ґрунти, що акумулюють значні запаси вологи [3, 9].

У центральній частині басейну на лесоподібних суглинках сформувались сірі лісові ґрунти. Завдяки суглинковому гранулометричному складу ці ґрунти мають значно нижчу водопроникність порівняно з піщаними ґрунтами Полісся і генерують суттєво більшу частку поверхневого стоку при інтенсивних дощах. Алювіальні ґрунти заплав Горині та її приток забезпечують тимчасове акумулювання водних мас під час паводку і є важливим буферним елементом природної регуляції паводкового режиму [5].

Рослинний покрив відображає зональну неоднорідність природних умов. Ліси займають 1 950 км² (18%), поширені переважно в низов'ї та складаються із сосни з домішкою дуба; у верхів'ї переважають широколистяні ліси (дуб, граб, клен, ясен), що збереглися по схилах долин [3]. Лісові масиви виконують потужну водорегулювальну функцію: підвищують інфільтраційну здатність ґрунту і сприяють підземному стоку.

Болотні угруповання займали до здійснення меліоративних заходів близько 6% площі басейну [2]. Ці угруповання є природними регуляторами водного балансу: акумулюючи значні запаси вологи у вологий сезон, вони

рівномірно вивільняли її протягом меженного, суттєво пом'якшуючи паводкові піки. Заплавні луки, збережені вздовж Горині, мають важливе гідравлічне значення: шорсткість їх поверхні визначає швидкість заплавного потоку при затопленні і є ключовим параметром при налаштуванні гідравлічного модуля HEC-RAS.

Антропогенні перетворення ґрунтово-рослинного покриву суттєво змінили гідрологічний режим. Більша частина басейну розорана (понад 60%), ліси займають 18% басейну; заплавні луки частково розорані, окультурені або перебувають під випасами, що призводить до їх деградації, а також змиву при паводках у річкове русло значних домішок [6]. Наукова стаття Яцика та ін. у «Віснику аграрної науки» (2018) встановила, що порушення водного балансу Горині і обміління річки зумовлені передусім надмірним сільськогосподарським освоєнням земель, що різко скоротило площі природних угідь і змінило характер стоку [9].

Масштабне осушення боліт Полісся в 1960–1980-х рр. кардинально змінило гідрологічний режим нижньої частини басейну: скоротилась тривалість і амплітуда весняної повені, знизились рівні ґрунтових вод, зменшився меженний стік у посушливі роки. Ці зміни підтверджуються БУВР Прип'яті: установа зафіксувала, що порушення гідравлічного зв'язку між руслом і заплавою є однією з ключових проблем суббасейну Горині [8].

Таким чином, ґрунтово-рослинний покрив басейну Горині є просторово неоднорідним і значно трансформованим. Переважання піщаних ґрунтів Полісся сприяє підземному стоку, тоді як суглинкові ґрунти Подільської височини генерують більший поверхневий стік. Антропогенна трансформація — розорювання понад 60% площі та осушення боліт — суттєво змінила природні механізми регулювання стоку і є невід'ємною складовою гідрологічного аналізу при побудові та верифікації моделі.

1.3. Кліматичні особливості

Клімат басейну річки Горинь відноситься до помірно-континентального типу: зима м'яка, із нестійкими морозами; літо тепле, нежарке; весна та осінь — затяжні зі значними опадами; річні суми опадів складають 600–650 мм [11]. Таке кліматичне середовище формується завдяки атлантичним повітряним масам, що пом'якшують температурний режим порівняно зі східнішими районами.

Термічний режим у межах Волинської та Рівненської областей характеризується такими показниками: середня температура січня – 5°C, липня +18°C, а середньорічна кількість опадів у Рівненській області становить близько 613 мм [12]. За даними офіційного ресурсу Варковицької ОТГ (Рівненська область), середня температура січня –5°C, липня +18°C, а кількість опадів на рік 600–700 мм [13]. Тривалість вегетаційного сезону з температурою вище +10°C перевищує 160 діб [10].

Сезонний розподіл опадів нерівномірний і безпосередньо визначає режим Горині. Зима настає наприкінці листопада, а стійкий сніговий покрив утворюється в останні дні грудня — першій декаді січня [10]. Стійкий льодостав на річці встановлюється в середині грудня, а скресання відбувається у верхів'ї в кінці лютого — початку березня [7]. Більшість опадів (близько 70% річної суми) припадає на теплий сезон, що зумовлює формування дощових паводків влітку й восени. Водночас зимові опади, накопичуючись у сніговому покриві, формують основний ресурс весняного водопілля.

Весняне водопілля є домінуючим елементом гідрологічного режиму: найбільш багатоводною річка є навесні (42–54% річного стоку); на літньо-осінній період припадає 31–39%, на зимовий — 15–21%, а середньорічна витрата у гирлі становить 110 м³/с [2]. Формування весняного водопілля визначається злагодженим таненням снігового покриву на більшій частині водозбору в поєднанні з насиченими ґрунтами, що суттєво обмежує інфільтрацію талих вод і забезпечує швидке формування паводкового стоку.

Кліматичні зміни, виявлені протягом останніх десятиліть, суттєво трансформують режим стоку Горині. Звіт "Вплив зміни клімату в Україні" (Met Office / Мінекоенерго України, 2023) констатує, що "річна температура повітря за останні 30 років зросла майже на $1,5^{\circ}\text{C}$ " [14]. Директор відділу агрометеорології Гідрометцентру України Тетяна Адаменко підтверджує, що "потепління в Україні триває з 1989 року" і що "кожне наступне десятиріччя тепліше попереднього", причому у 2020 р. середньорічна температура в зоні землеробства зросла до $+9,1^{\circ}\text{C}$ проти норми $+7,8^{\circ}\text{C}$ [15].

Аналіз даних Житомирської регіональної доповіді (офіційний ресурс обласної екологічної інспекції) встановлює, що клімат України потеплів за увесь період інструментальних спостережень: "за останні 35 років (1972–2006 рр.) середнє підвищення температури приземного повітря склало більше 1°C ", причому "взимку відмічається найбільше підвищення середньомісячної температури повітря і в центральних та північних районах України досягає 2°C " [16]. Саме ця тенденція зимового потепління має безпосереднє значення для басейну Горині, скорочуючи тривалість снігового покриву і запаси води у ньому.

За останні 100 років середня температура в Україні підвищилася в середньому на $1,4^{\circ}\text{C}$, причому темпи зростання в Україні перевищують середньосвітові [17]. Зміна клімату вже впливає на гідрологічний режим Горині: скорочення тривалості та висоти снігового покриву зменшує водність весняного водопілля, а збільшення частоти екстремальних опадових подій посилює дощові паводки.

Висновки до розділу 1

Комплексний аналіз фізико-географічних умов басейну річки Горинь дозволяє сформулювати такі узагальнення, принципово важливі для подальшого моделювання гідрологічного режиму засобами програмного комплексу HEC-RAS.

Геологічна будова та рельєф басейну відзначаються яскравою просторовою контрастністю. Двоярусна будова Волино-Подільської плити, де

крейдові водоносні горизонти осадового чохла перекривають давній кристалічний фундамент, визначає значну роль підземного живлення у формуванні меженного стоку. Різке геоморфологічне розмежування між розчленованою Подільською височиною у верхів'ї та плоскою заболоченою Поліською низовиною у нижній течії зумовлює кардинально відмінний характер гідравлічних умов на різних ділянках річки. Це вимагає детальної геометричної параметризації поперечних перерізів русла і заплави при побудові моделі та унеможливорює застосування однорідних гідравлічних параметрів у межах усього модельованого відрізка.

Ґрунтово-рослинний покрив є просторово неоднорідним і суттєво антропогенно трансформованим чинником формування стоку. Висока інфільтраційна здатність піщаних дерново-підзолистих ґрунтів Полісся сприяє підземному стоку та пом'якшує паводкові піки, тоді як суглинкові сірі лісові ґрунти Подільської височини генерують значно більшу частку поверхневого стоку при інтенсивних опадах. Розорювання понад 60% площі водозбору та масштабне осушення поліських боліт у 1960–1980-х рр. кардинально змінили природні механізми регулювання стоку, скоротивши тривалість весняного водопілля і знизивши межений стік у посушливі роки. Ці антропогенні трансформації є невід'ємною складовою при калібруванні субмоделей інфільтрації та коефіцієнтів шорсткості Manning у гідравлічному модулі HEC-RAS.

Кліматичні умови басейну формують чітко виражений сезонний режим стоку з домінуванням весняного водопілля, на яке припадає 42–54% річного стоку. Спостережувана кліматична тенденція — підвищення середньорічної температури повітря на 1,4–1,5°C за останнє століття з максимальним зимовим потеплінням до 2°C — має безпосередні гідрологічні наслідки: скорочення запасів води у сніговому покриві трансформує характер весняного водопілля, а зростання частоти екстремальних опадових подій посилює дощові паводки в теплий сезон. Врахування цих тенденцій є обов'язковою умовою при формуванні сценаріїв для прогнозного моделювання.

Таким чином, сукупність фізико-географічних умов басейну Горині визначає три ключові виклики для побудови моделі HEC-RAS: просторову неоднорідність гідравлічних характеристик русла і заплави, антропогенно змінений характер формування поверхневого стоку та кліматично обумовлену трансформацію сезонного розподілу водних ресурсів. Подолання цих викликів потребує детального збору натурних даних, обґрунтованої просторової диференціації параметрів моделі та застосування кліматичних сценаріїв при прогнозних розрахунках.

РОЗДІЛ 2

ГІДРОЛОГІЧНИЙ РЕЖИМ

2.1 Природні умови формування гідрологічного режиму р. Горинь

Гідрологічний режим — це закономірні зміни стану водного об'єкта в часі, що склалися під впливом фізико-географічних умов басейну, насамперед кліматичних. Гідрологічний режим проявляється у вигляді багаторічних, річних, сезонних і добових коливань рівнів води (режим рівнів), витрат води (режим стоку), льодових явищ (льодовий режим), температури води (термічний режим), кількості та складу твердого матеріалу, що переноситься потоком (режим наносів), складу і концентрації розчинених речовин (гідрохімічний режим), змін русла водотоку (режим руслових процесів), змін біотичних і абіотичних елементів (гідробіологічний режим) [8].

Для р. Горинь, правої притоки Прип'яті, режим визначається комплексом природних факторів, детально охарактеризованих у розділі 1 даної роботи.

Річка Горинь бере початок на Волино-Подільській височині і у верхів'ї протікає на плато з висотами 385–215 м, сильно розчленованому долинами річок і балок (густота яружно-балкової мережі становить 1–1,25 км на 1 км² поверхні). Середня й нижня частини сточища лежать у заболоченій Поліській низовині, що характеризується плоским рельєфом з піщаними пагорбами [18]. Такий контраст у рельєфі зумовлює диференціацію стокоформуючих процесів: у підвищеній південній частині переважають процеси поверхневого стоку, тоді як на Поліссі значна частина опадів поглинається піщаними відкладами і поповнює підземні водоносні горизонти.

Живлення річки переважно снігове з помітною участю дощового й підземного [8, 19]. Питома вага снігового живлення визначає чітко виражену весняну повінь як головну фазу водного режиму. Дощова складова обумовлює можливість осінніх і зимових паводків, а підземна — формування відносно стійкого базисного стоку у меженні сезони. Річкова мережа добре розвинена:

коефіцієнт густоти мережі без урахування річок завдовжки до 10 км становить 0,26 км/км², а з урахуванням малих водотоків — 0,46 км/км² [18].

Лісистість басейну становить 18%, ліси поширені переважно в пониззі [8]. Відносно невелика залісненість і значна частка орних земель (поверхня басейну в основному розорана) підвищують коефіцієнт поверхневого стоку та збільшують амплітуду коливань витрат протягом року. Щорічно в період весняного водопілля й дощових паводків заплава затоплюється на глибину від 0,5 до 3,3 м на 1–2 тижні; на знижених ділянках вода утримується протягом 1–3 місяців [18].

Основні морфометричні характеристики водозбірного басейну р. Горинь наведено в табл. 2.1. Площа водозбору становить 27 700 км² (в Україні — 26 500 км²), довжина річки — 659 км (в Україні — 577 км) [8, 19]. За цими показниками Горинь відноситься до категорії великих рівнинних річок України. Форма сточища — неправильна грушоподібна: довжина 300 км, середня ширина 92 км, найбільша ширина у середній частині — 200 км, у нижній різко зменшується до 10 км [18].

Таблиця 2.1

Основні морфометричні характеристики басейну р. Горинь

Показник	Значення
Довжина річки, км	659 (в Україні — 577)
Площа басейну загальна, км ²	27 700
Площа басейну в Україні, км ²	26 500
Довжина басейну, км	300
Середня ширина басейну, км	92
Найбільша ширина басейну, км	200
Коефіцієнт густоти річкової мережі (без р. <10 км), км/км ²	0,26
Коефіцієнт густоти річкової мережі (з р. <10 км), км/км ²	0,46
Лісистість басейну, %	18
Середня витрата у гирлі (багаторічна), м ³ /с	110

Ширина русла у верхів'ї, м	3–10
Ширина русла у середній та нижній течії, м	25–60
Глибина на плесах, м	1,4–2,5 (до 5–11 м)
Глибина на перекатах, м	0,3–1,0

Примітка: Дані наведено за матеріалами Басейнового управління водних ресурсів р. Прип'ять [18] та Великої Української Енциклопедії [8].

Висока розгалуженість дрібних приток свідчить про інтенсивне дренавання території та швидке реагування річкової системи на зливові опади. Водночас помірний рівень лісистості басейну обмежує природну регулюючу здатність ландшафтів, роблячи стік більш вразливим до сучасних гідрокліматичних коливань — тривалих меженних періодів та раптових талих паводків.

Для просторової дискретизації гідрологічного режиму річки Горинь та забезпечення моделі HEC-RAS точними граничними умовами (Boundary Conditions) було детально проаналізовано фізико-географічні та гідрографічні характеристики басейну в створах ключових гідрологічних постів Укргідрометцентру: Ямпіль, Оженин та Деражне. Аналіз цих створів дозволяє простежити трансформацію стоку та морфологічних особливостей водозбору в поздовжньому профілі річки — від її верхів'їв до виходу на Поліську низовину.

Порівняльний аналіз основних гідрографічних та морфометричних індикаторів басейну річки Горинь у розрізі визначених гідрологічних постів, які слугують опорними точками для калібрування та верифікації нашої гідравлічної моделі, наведено у таблиці 2.2.

Таблиця 2.2.

Основні гідрографічні характеристики гідрологічних постів Ямпіль, Оженин, Деражне на річці Горинь [19]

Пост	Відстань від витоку, км	Середній похил, %	Площа водозбору, км ² (до поста)	Середня висота водозбору, м	Заболоченість, %	Лісистість, %	Розораність, %
Ямпіль	71	1,6	1400	320	1	4	60
Оженин	228	0,7	5860	280	2	17	—
Деражне	395	0,5	9160	260	2	12	—

2.2 Фази водності та їх характеристики

За характером водного режиму р. Горинь належить до типу рівнинних річок Українського Полісся з чітко вираженим весняним водопіллям, низькою літньою межею та можливими осінніми й зимовими паводками [8]. Внутрішньорічний розподіл стоку між сезонами характеризується суттєвою нерівномірністю: найбагатоводнішою річка буває навесні, коли припадає 42–54% річного стоку; на літньо-осінній період — 31–39%, на зимовий — 15–21% [8]. У річному режимі рівня виділяються висока весняна повінь, низька літня межень (яку порушують короточасні дощові паводки), осінні та зимові підйоми рівня [18].

Таблиця 2.3

Характеристики фаз водності р. Горинь

Фаза водності	Часові межі	Характеристика рівнів/підйомів	Частка річного стоку, %	Тривалість, діб (орієнтовно)
Весняне водопілля	березень – кінець травня / червень	Підйом рівня до 0,5–1,0 м/добу; висота при звичайному повноводді 0,8–4,6 м, при винятково високому — 1,2–5,8 м; переважно однопіковий гідрограф	42–54	50–70
Літньо-осіння межень з дощовими паводками	червень – жовтень	Низький рівень, короточасні підйоми від дощів у середньому на 0,5–1,5 м	31–39	150–170
Осінній підйом рівня	жовтень – грудень	Поступовий підйом рівня, нижчий від весняного; можливе встановлення льодоставу	входить до літньо-осіннього рядка	75–90
Зимова межень / льодостав	грудень – лютий	Льодостав настає в середині грудня; на перекатах залишаються ополонки; під час відлиг — паводки до 0,5–2,5 м	15–21	75–90

Весняне водопілля є визначальною фазою водного режиму р. Горинь. Підйом рівня навесні найчастіше починається в березні, рідше — у лютому, і відбувається інтенсивно — до 0,5–1,0 м на добу. В середині або другій половині березня настає найвищий рівень [18]. Як правило, водопілля проходить одним піком і дуже рідко — двома [18]. Спад рівня тривалий — протягом одного-двох місяців, і зазвичай наприкінці травня–червня встановлюється літня межень [18]. Згідно з даними для всього басейну Прип'яті, у межах якого протікає Горинь, середня тривалість весняної повені становить 50–70 діб [20], що відповідає загальній характеристиці рівнинних річок Полісся.

Літньо-осіння межень настає після спаду весняного водопілля. Дощі, що випадають майже цілорічно, викликають паводки заввишки в середньому 0,5–1,5 м, що рідко сягає рівня весняного повноводдя [8]. Осінній підйом рівня починається в жовтні і триває до встановлення зимового льодоставу [8].

Зимова межень характеризується льодоставом, що найчастіше настає в середині грудня. На перекатах нерідко залишаються ополонки, що місцями зберігаються протягом усієї зими. Річка скресає у верхів'ї наприкінці лютого — початку березня, у середній і нижній течії — на 1–2 тижні пізніше [8, 19]. Узимку під час відлиг бувають паводки заввишки 0,5–2,5 м [8]. Характерно, що після замерзання рівень знижується, але залишається вище літнього [8].

2.3 Максимальні витрати води

Максимальні витрати весняного водопілля мають ключове значення для проектування гідротехнічних споруд, мостових переходів і систем протиповеневого захисту в басейні р. Горинь. Нормативною базою для їх визначення в Україні є ДБН В.2.4-8:2014 «Визначення розрахункових гідрологічних характеристик», що передбачає статистичний аналіз рядів максимальних спостережень витрат та побудову кривих забезпеченості.

Розрахунок витрат різних ймовірностей перевищення виконується за трипараметричним розподілом Пірсона III типу відповідно до ДБН В.2.4-8:2014 [20]. Розрахункова витрата визначається за формулою:

$$Q_p = \bar{Q}_{\max} \cdot K_p \quad (2.1)$$

де: Q_p — розрахункова витрата води ймовірності перевищення p , м³/с; $\bar{Q}_{\max}$ — середня максимальна витрата за рядом спостережень, м³/с; K_p — модульний коефіцієнт для заданої ймовірності p та встановлених значень C_v і C_s , що визначається за таблицями додатку до ДБН В.2.4-8:2014 [20].

Для отримання статистично достовірних оцінок параметрів кривої забезпеченості ряд спостережень повинен мати тривалість не менше 25–30 років та задовольняти критеріям однорідності й стаціонарності [20]. В умовах сучасних кліматичних змін остання вимога стає особливо проблемною, оскільки ряди спостережень у басейні Горині демонструють статистично значущі тренди (особливо щодо снігозапасів та дат проходження максимумів) [21, 22].

Перевірка однорідності рядів виконується за критеріями Стюдента (для середніх значень) та Фішера (для дисперсій), а також непараметричними тестами Манна–Уїтні та Манна–Кендалла для виявлення трендів [21, 22]. Дослідження В.В. Гребеня та О.І. Лук'янець засвідчили наявність статистично значущого зниження максимальних витрат весняного водопілля для річок басейну Прип'яті після 1989 р., що пов'язано зі зміною кліматичних умов формування стоку [22, 23].

Таблиця 2.4

Розрахункові витрати максимального стоку р. Горинь різних ймовірностей перевищення

Пост	Витрата $Q_{10\%}$, м ³ /с	Витрата $Q_{1\%}$, м ³ /с	Витрата $Q_{0,5\%}$, м ³ /с
Ямпіль	79.5	384	461
Оженин	311	766	919

Стаціонарність рядів максимальних витрат — фундаментальне припущення класичних методів розрахунку — порушується в умовах сучасних кліматичних змін [25, 26]. За даними Шостого оцінного звіту IPCC (AR6, 2021),

середня глобальна температура повітря зросла на 1,1 °С порівняно з доіндустріальним періодом, причому потепління в Східноєвропейському регіоні відбувається з вищими темпами [25]. Для території України середньорічна температура за період 1991–2020 рр. зросла на 1,2–1,4 °С порівняно з кліматичною нормою 1961–1990 рр. [27].

Основні механізми трансформації максимального стоку весняного водопілля у басейні р. Горинь зумовлені такими чинниками [22, 23, 27]:

Зменшення максимальних снігозапасів перед початком водопілля внаслідок підвищення зимових температур повітря та частих відлиг, що зменшують акумульовану в сніговому покриві воду.

Зростання частки рідких опадів у холодний період року, що призводить до збільшення зимового стоку та ранніх паводків замість концентрованого весняного водопілля.

Зміщення дати настання максимуму весняного водопілля на більш ранні строки (у середньому на 7–14 діб для річок Прип'ятського басейну за останні 30 років) [22].

Подовження вегетаційного періоду та зростання випаровування з поверхні водозбору, що знижує загальну водність.

Збільшення повторюваності дощових паводків у теплий період через інтенсифікацію конвективних опадів [25, 27].

Дослідженнями В.А. Овчарук встановлено, що в межах басейну Прип'яті спостерігається стійке зниження середніх максимальних витрат весняного водопілля на 25–40% за період 1989–2018 рр. порівняно з періодом 1960–1988 рр. [28]. Це підтверджує необхідність перегляду розрахункових гідрологічних характеристик з урахуванням нестационарності рядів — або шляхом розрахунку за останній квазіоднорідний період, або через застосування нестационарних статистичних моделей (NS-GEV, методи Bayesian inference) [26].

Окрім кліматичного чинника, на максимальний стік р. Горинь впливають антропогенні зміни підстильної поверхні: зменшення лісистості у верхів'ї басейну, осушувальні меліорації на Поліссі (які парадоксально як знижують

пікові витрати завдяки регулюючій ємності каналів, так і прискорюють дренаж за певних умов), розорювання водозбору, що збільшує коефіцієнт поверхневого стоку [23, 29].

Отримані розрахункові максимальні витрати (табл. 2.4) використовуються як вхідні граничні умови для гідродинамічного моделювання у програмному комплексі HEC-RAS, зокрема для моделювання сценаріїв затоплення заплави р. Горинь та оцінки ефективності захисних споруд за умов розрахункових ймовірностей перевищення [30].

Висновки до розділу 2

Гідрологічний режим р. Горинь визначається комплексом природних факторів: контрастним рельєфом басейну (від Волино-Подільської височини до Поліської низовини), переважно сніговим живленням із помітною участю дощової та підземної складових, відносно невисокою лісистістю (18%) та значною розораністю поверхні водозбору. Зазначені чинники формують характерний для рівнинних річок Українського Полісся тип водного режиму з чітко вираженою асиметрією внутрішньорічного розподілу стоку.

У річному циклі водності виділяються чотири фази: висока весняна повінь (березень–червень), що акумулює 42–54% річного стоку і є визначальною фазою водного режиму; літньо-осіння межень з короткочасними дощовими паводками (31–39% стоку); осінній підйом рівня; зимова межень з льодоставом (15–21% стоку). Весняне водопілля характеризується переважно однопіковим гідрографом, інтенсивним підйомом рівня до 0,5–1,0 м/добу та середньою тривалістю 50–70 діб.

Розрахункові максимальні витрати р. Горинь, визначені за трипараметричним розподілом Пірсона III типу відповідно до ДБН В.2.4-8:2014, становлять для поста Ямпіль: $Q_{10\%} = 79,5 \text{ м}^3/\text{с}$, $Q_{1\%} = 384 \text{ м}^3/\text{с}$, $Q_{0,5\%} = 461 \text{ м}^3/\text{с}$; для поста Оженин: $Q_{10\%} = 311 \text{ м}^3/\text{с}$, $Q_{1\%} = 766 \text{ м}^3/\text{с}$, $Q_{0,5\%} = 919 \text{ м}^3/\text{с}$. Ці значення є ключовими вхідними параметрами для подальшого гідродинамічного моделювання у HEC-RAS.

Сучасні кліматичні зміни суттєво трансформують максимальний стік весняного водопілля в басейні р. Горинь. Зафіксоване зниження середніх максимальних витрат на 25–40% за період 1989–2018 рр. порівняно з 1960–1988 рр., зміщення дат проходження максимумів на 7–14 діб раніше та зростання частки зимових рідких опадів свідчать про порушення фундаментального припущення стаціонарності, що є основою класичних методів гідрологічних розрахунків. Це, у поєднанні з антропогенними змінами підстильної поверхні — осушувальними меліораціями та розорюванням водозбору, — обумовлює необхідність застосування нестационарних статистичних підходів (NS-GEV, Bayesian inference) або проведення розрахунків за виділеним квазіоднорідним сучасним періодом. Ігнорування цього чинника може призвести до систематичного завищення розрахункових характеристик і, як наслідок, до хибних висновків щодо ризиків затоплення та ефективності захисних споруд.

Отримані у розділі 2 характеристики гідрологічного режиму та розрахункові витрати максимального стоку слугуватимуть науковою основою і вхідними граничними умовами для побудови гідродинамічної моделі р. Горинь у програмному комплексі HEC-RAS, що розглядається у наступному розділі роботи.

РОЗДІЛ 3

МОДЕЛЮВАННЯ ВОДНОГО РЕЖИМУ Р. ГОРИНЬ

3.1 Сутність та переваги комп'ютерного моделювання

Сучасна гідрологія як наука переживає суттєву методологічну трансформацію, зумовлену стрімким розвитком обчислювальних технологій та геоінформаційних систем. Традиційні методи натурних спостережень та емпіричного аналізу гідрологічних рядів, попри свою незаперечну наукову цінність, виявляються недостатніми в умовах зростаючої невизначеності, пов'язаної з кліматичними змінами та антропогенним тиском на водні екосистеми [22]. Саме тому комп'ютерне моделювання водного режиму річок набуло статусу одного з провідних методів у сучасній гідрологічній науці та водогосподарській практиці.

Під гідрологічним моделюванням у широкому сенсі розуміють побудову та дослідження математичних і комп'ютерних аналогів реальних водних об'єктів, що описують перебіг гідрологічних процесів у часі та просторі [31]. На відміну від фізичного моделювання у лабораторних умовах, комп'ютерне моделювання дозволяє охопити весь басейн річки, враховуючи складну геоморфологічну будову русла, заплавних ділянок і водозбору без необхідності масштабування, яке неминуче спотворює реальні гідравлічні параметри потоку.

Принципова перевага комп'ютерних гідрологічних моделей полягає в їхній здатності відтворювати нелінійну природу гідрологічних процесів, включаючи взаємодію поверхневого та підземного стоку, режим заплавного затоплення, трансформацію паводкових хвиль у руслі та вплив гідротехнічних споруд [32]. Згідно з положеннями Настанови з гідрологічної практики Всесвітньої метеорологічної організації (WMO), математичні моделі є незамінним інструментом для оцінки водних ресурсів в умовах їх мінливості та прогнозування наслідків екстремальних гідрологічних подій [33].

Серед ключових переваг комп'ютерного гідрологічного моделювання для дослідження р. Горинь в умовах сучасних кліматичних змін слід виділити такі:

1. **Сценарне моделювання.** Можливість розрахунку водного режиму за різних кліматичних та антропогенних сценаріїв без натурального впливу на водний об'єкт. Це є критично важливим в контексті оцінки наслідків підвищення середньорічних температур та зміни режиму опадів, прогнозованих у рамках Шостого оціночного звіту МГЕЗК (IPCC AR6) [33].
2. **Просторова деталізація.** Сучасні двовимірні та тривимірні моделі дають змогу відтворити структуру потоку в руслі та на заплаві з просторовим розрізненням, недосяжним для мережі стаціонарних постів спостережень.
3. **Економічна ефективність.** Вартість проведення модельних розрахунків є незрівнянно нижчою порівняно з організацією масштабних натурних досліджень або будівництвом захисних споруд без попереднього аналізу.
4. **Верифікація та відтворюваність.** Модельні розрахунки можуть бути перевірені та відтворені іншими дослідниками на основі відкритих вихідних даних, що відповідає принципам відкритої науки.
5. **Інтеграція з геоінформаційними системами.** Сучасні програмні комплекси гідрологічного моделювання, зокрема HEC-RAS, забезпечують безпосередній обмін даними з платформами ГІС, що суттєво розширює аналітичні можливості дослідження [25].

Особливого значення комп'ютерне моделювання набуває у контексті оцінки паводкового ризику. За даними Українського гідрометеорологічного центру, р. Горинь відноситься до категорії водотоків з підвищеним паводковим ризиком у весняний та дощовий паводковий сезони, що зумовлює актуальність детального гідравлічного моделювання її русла та заплавної ділянок [30]. Зміна часових характеристик сніготанення та збільшення частоти конвективних опадів в умовах потепління клімату додатково загострює проблему прогнозування екстремальних водних об'єктів на річці [33, 34].

Важливим методологічним аспектом є розмежування гідрологічних і гідравлічних моделей. Гідрологічні моделі (наприклад, HEC-HMS) описують формування стоку на водозборі, тоді як гідравлічні моделі (наприклад, HEC-RAS) моделюють рух води безпосередньо у руслі та заплаві на основі розрахованих або заданих гідрографів стоку [32, 25]. Для комплексного дослідження водного режиму р. Горинь обидва класи моделей є взаємодоповнювальними, однак у цій роботі основний акцент зроблено на гідравлічному моделюванні засобами HEC-RAS.

3.2 Методична основа

Методика дослідження базується на інтегрованому підході, що поєднує статистичний аналіз багаторічних рядів гідрологічних спостережень, геоінформаційне опрацювання різнорідних просторових даних та двовимірне нестационарне гідравлічне моделювання затоплення в програмному комплексі HEC-RAS версії 6.5. Загальна методологічна схема передбачає послідовне виконання трьох взаємопов'язаних блоків: підготовку та аналіз вхідних даних, побудову і налаштування гідравлічної моделі та інтерпретацію результатів моделювання для трьох сценаріїв розрахункової забезпеченості.

Вибір такої схеми обумовлений необхідністю просторово розподіленого відтворення динаміки поширення повеневих вод на заплаві р. Горинь, а також вимогами до точності визначення меж зон затоплення при різних гідрологічних сценаріях. Програмний комплекс HEC-RAS, розроблений Інженерним гідрологічним центром Армії США (U.S. Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center), є одним із найбільш широко верифікованих і загальноновживаних інструментів для вирішення задач гідравлічного моделювання в дослідницькій практиці та при розробці карт паводкового ризику [35, 36].

Гідравлічне моделювання поширення паводкових вод може здійснюватися за одновимірними (1D), двовимірними (2D) та квазидвовимірними підходами. Порівняльне дослідження Horritt та Bates [37] на прикладі рівнинних річок

Великобританії показало, що 2D-моделі на основі рівнянь дрібної води (Shallow Water Equations, SWE) забезпечують суттєво вищу просторову точність відтворення меж зон затоплення на заплавах зі складним мікрорельєфом порівняно зі спрощеними 1D-схемами. Узагальнювальний огляд сучасних методів моделювання паводкових затоплень підтверджує, що двовимірні підходи стали загальноприйнятим стандартом для оцінки паводкового ризику та планування водоохоронних заходів [38].

В основі реалізованого в HEC-RAS 2D підходу лежать двовимірні рівняння Сен-Венана — система диференціальних рівнянь, що описує нестационарний рух мілкої води в горизонтальній площині. HEC-RAS 6.5 реалізує чисельне розв'язання цієї системи методом кінцевих об'ємів з використанням схеми першого порядку, що забезпечує стійкість розрахунку при наявності різких фронтів потоку та «сухих» клітин обчислювальної сітки [35]. Нестационарна постановка задачі (*unsteady flow*) є необхідною умовою для реалістичного відтворення часової динаміки розвитку затоплення: підйому рівня, поширення фронту паводкових вод по заплаві та їхнього відступу. Це принципово важливо для р. Горинь, для якої характерна виражена весняна повінь, зумовлена сніготаненням у межах водозбору [22].

3.2.1 Характеристика вхідних даних

Успішність та точність гідродинамічного моделювання руслових процесів і підтоплення заплавних земель у програмному комплексі HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center's River Analysis System) критично залежать від якості, просторової деталізації та хронологічної безперервності вхідної інформації. Для відтворення гідрологічного режиму річки Горинь в умовах сучасних кліматичних змін було сформовано комплексну базу даних, яка об'єднує геопросторові, морфометричні, гідрометеорологічні та картографічні матеріали.

Топографічна основа моделі побудована на базі глобальної ЦМР Copernicus GLO-30 (COP-30), сформованої за матеріалами радарної зйомки TanDEM-X та дистрибутованої Європейським космічним агентством через платформу OpenTopography [39]. ЦМР має номінальну просторову роздільну

здатність 30 м та відносну вертикальну точність порядку 4 м (RMSE), що є прийнятним для моделювання затоплення на рівнинних ділянках, де гідравлічні градієнти є порівняно малими [38]. Для ділянок основного русла та активної заплави, де рельєф є визначальним для формування шляхів течії, вказані обмеження точності є відомою методичною похибкою, яка береться до уваги при аналізі результатів. Корекція ЦМР у межах русла виконана шляхом «спалення» (burning) лінії водотоку, отриманої з даних OpenStreetMap [41], що є стандартною процедурою для запобігання блокуванню гідравлічного зв'язку в мережі потоків [35].

Гідрологічні дані спостережень. Основою для розрахунку гідрологічних характеристик розрахункової забезпеченості слугували ряди щоденних витрат води за 71 рік спостережень на двох гідрологічних постах: Ямпіль (верхній граничний створ дослідження) та Оженин (нижній граничний створ). Дані надані Українським гідрометеорологічним центром. Наявність синхронних спостережень на двох постах дозволяє не лише розрахувати граничні умови для моделі, але й оцінити просторову мінливість стоку вздовж досліджуваної ділянки, а також виконати верифікацію результатів моделювання на незалежному створі.

Просторові дані. Карта водних шляхів України отримана у векторному форматі через ресурс Geofabrik — офіційного розповсюджувача даних OpenStreetMap у формі структурованих регіональних вивантажень [41]. Шар водотоків використовувався для корекції ЦМР та уточнення геометрії русла. Супутникові знімки Google Satellite були застосовані для тематичної інтерпретації типів земного покриву заплави з метою призначення коефіцієнтів шорсткості Маннінга для різних морфологічних зон.

Інтеграція зазначених різномірних джерел інформації в єдину геоінформаційну систему дозволила мінімізувати невизначеності при геометрії русла та забезпечити високу достовірність граничних умов. Створений інформаційний базис є достатнім для коректного відтворення гідравлічної структури потоку та ідентифікації зон потенційного затоплення. Тобто,

залучений комплекс геопросторових і гідрометричних параметрів формує замкнену розрахункову схему, яка повністю задовольняє вимоги щодо математичного забезпечення моделі. Детальний склад, походження та просторово-часові параметри вхідного масиву інформації, що ліг в основу побудови гідродинамічної моделі досліджуваної ділянки річки Горинь, систематизовано та наведено нижче у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1

Вхідні дані для побудови гідравлічної моделі р. Горинь

Вид даних	Джерело / Ресурс	Просторове/часове охоплення	Роздільна здатність / Тривалість
Цифрова модель рельєфу Copernicus GLO-30 (COP-30)	ESA / OpenTopography [39]	Ділянка р. Горинь у межах дослідження	30 м
Дані гідрологічних спостережень (щоденні рівні та витрати води)	Гідрометеорологічний центр України	Пости Ямпіль та Оженин	71 рік спостережень
Карта водних шляхів України	OpenStreetMap / Geofabrik [41]	Басейн р. Горинь	Векторний формат
Супутникова підкладка	Google Satellite	Заплавна ділянка	Візуальна інтерпретація

3.2.2 Попередня обробка даних у середовищі QGIS

Геоінформаційна підготовка вхідних даних виконувалась у середовищі QGIS версії 3.44.10 — відкритій геоінформаційній системі, широко застосовуваній у гідрологічних дослідженнях [40]. Етапи опрацювання включали:

1. **Підготовку ЦМР:** завантаження файлів COP-30 в межах розрахункового домену, об'єднання у суцільний растр, перепроєктування у систему координат EPSG:32635 (WGS 84 / UTM zone 35N) та «спалення» лінії русла для забезпечення гідрологічної коректності моделі рельєфу.
2. **Формування шару земного покриття:** візуальне дешифрування Google Satellite з виділенням функціональних зон заплави (відкрита вода, лучна

рослинність, ліс, рілля, забудована територія) з метою подальшого призначення коефіцієнтів шорсткості у HEC-RAS.

3. **Підготовку граничних умов:** формування геометрії вхідного та вихідного перерізів (boundary lines) відповідно до розташування гідрологічних постів.
4. **Масштабування та верифікацію просторового збігу** між шарами ЦМР, векторних водотоків та меж розрахункової області.

Підготовлені геопросторові шари були імпортовані до модуля RAS Mapper програми HEC-RAS 6.5 для побудови геометрії гідравлічної моделі.

3.2.3 Розрахунок витрат різної забезпеченості

Для виконання моделювання розраховано максимальні витрати води трьох рівнів забезпеченості: 10 % (повторюваність раз на 10 років), 1 % (раз на 100 років) та 0,5 % (раз на 200 років). Такий набір сценаріїв відповідає стандартній практиці оцінки паводкового ризику — від порогового рівня «звичайної» повені до екстремального рівня, що використовується при проектуванні відповідальних інженерних об'єктів.

Розрахунок виконано методом аналітичних кривих забезпеченості. Нормативним аналітичним розподілом для максимального стоку є крива Пірсона III типу (гамма-розподіл). Достатня тривалість ряду спостережень (71 рік) забезпечує статистично значущу оцінку параметрів розподілу, оскільки рекомендована мінімальна тривалість ряду для гідрологічних розрахунків становить 30–35 років. Разом із тим, наявність сучасних кліматичних трендів у максимальному стоці, що фіксуються для річок Волинського Полісся та суміжних районів [22], є підставою для перевірки однорідності та стаціонарності вибірки перед виконанням розрахунків.

Отримані в результаті статистичної обробки квантилі максимального стоку слугують безпосередніми вхідними параметрами для задання умов нестационарного або стаціонарного руху води на верхній межі моделі. Вони дозволяють спрогнозувати просторові межі затоплення заплавних територій для

кожної з визначених градацій повторюваності паводків. Узагальнені розрахункові значення витрат для обох постів наведено у таблиці 3.2.

Таблиця 3.2

Максимальні витрати води різної забезпеченості для р. Горинь

Гідрологічний пост	$Q_{10\%}, \text{ м}^3/\text{с}$	$Q_{1\%}, \text{ м}^3/\text{с}$	$Q_{0.5\%}, \text{ м}^3/\text{с}$
Ямпіль	79.5	384	461
Оженин	311	766	919

3.2.4 Побудова геометрії та обчислювальної сітки моделі HEC-RAS 2D

Геометрія 2D гідравлічної моделі формується у модулі RAS Mapper програми HEC-RAS 6.5 та включає такі компоненти: область двовимірного потоку (2D Flow Area), обчислювальну сітку (Computational Mesh), лінії граничних умов (Boundary Condition Lines), лінії розлому річки (Breaklines), зони уточнень (Refinement Regions) та полігони земного покриття (Land Cover Polygons) для призначення коефіцієнтів шорсткості.

Область двовимірного потоку окреслює розрахунковий домен — ділянку заплави р. Горинь між постами Ямпіль та Оженин. При визначенні меж домену враховувалось максимально можливе поширення зони затоплення відповідно до сценарію $Q_{0.5\%}$ та геоморфологічних кордонів заплави, ідентифікованих за ЦМР.

Обчислювальна сітка є структурованою нерегулярною сіткою Voronoi, що будується методом триангуляції Делоне на основі вузлових точок, розміщених вздовж меж домену та у внутрішніх вузлах. Розмір клітини сітки є ключовим параметром, що визначає баланс між точністю результату та обчислювальними витратами. Для рівнинних ділянок із відносно однорідним рельєфом рекомендований розмір клітини становить 3–5 мінімальних розмірів вхідної ЦМР [36]; для COP-30 це відповідає клітині 90–150 м на відкритій заплаві. У зоні основного русла та в місцях з вираженим мікрорельєфом застосовується подрібнення сітки (mesh refinement regions) для підвищення просторової точності розрахунку.

Рельєф поверхні усереднюється на кожну клітину сітки відповідно до статистики вертикальних відміток пікселів COP-30, що в неї потрапили. Після побудови сітки виконується візуальна перевірка гідравлічної коректності ЦМР (відсутність артефактних перемичок у руслі, правильна топологія каналів), а при виявленні помилок — їх ручна корекція у RAS Mapper [36].

Під час моделювання було обрано розмір клітинок 100×100 м для області двовимірного потоку (Perimeters) та 50×50 м для зон уточнень (Refinement regions).

На рис. 3.1 зображено повністю побудовану геометрію, що використовувалась для моделювання повеней 10%, 1% та 0,5% забезпеченості.



Рис.3.1 Геометрія моделі

3.2.5 Вибір коефіцієнтів шорсткості

Гідравлічний опір поверхні задається через коефіцієнт шорсткості Маннінга n , що є одним із ключових калібрувальних параметрів 2D-моделі [42]. Значення n призначається окремо для кожного полігона земного покриття на основі стандартних довідкових таблиць [36] та з урахуванням рекомендацій Chow (1959). Орієнтовні діапазони значень для основних категорій земного покриття в межах досліджуваної ділянки наведено у таблиці 3.3.

Таблиця 3.3

**Орієнтовні значення коефіцієнта шорсткості Маннінга для різних типів
земного покриву**

Тип земного покриву	Коефіцієнт Маннінга n , $\text{с} \cdot \text{м}^{-1/3}$
Природне русло річки (гравій, пісок)	0,025–0,035
Лучна заплава (трав'яна рослинність)	0,040–0,060
Чагарник	0,060–0,080
Листяний ліс (заплавні деревостани)	0,080–0,120
Рілля та відкриті угіддя	0,035–0,050
Забудована територія	0,060–0,100

Верифікація призначених значень n виконується шляхом відтворення спостережених рівнів води (відомих паводків) та порівняння розрахункових і вимірних позначок. За необхідності проводиться ручна калібрація в межах фізично обґрунтованих діапазонів [42].

3.3 Моделювання різних фаз водності

3.3.1 Загальна характеристика розрахункових сценаріїв

Відповідно до завдань дослідження, числове 2D моделювання нестационарного потоку виконувалось для трьох розрахункових сценаріїв — повеней з ймовірністю перевищення максимальних річних витрат 10%, 1% та 0,5%, що відповідає середнім інтервалам повторюваності 10, 100 та 200 років відповідно. Вибір саме цих сценаріїв обумовлений нормативними вимогами до гідравлічних розрахунків гідротехнічних споруд, водогосподарських об'єктів та визначення зон затоплення [22]. Повінь 10% забезпеченості ($P = 10\%$) характеризує рядові несприятливі умови, тоді як сценарії 1% та 0,5% відповідають катастрофічним подіям, що використовуються при проектуванні відповідальних споруд та систем цивільного захисту.

Необхідно підкреслити, що в умовах триваючих кліматичних змін поняття «ймовірність перевищення» зазнає суттєвої трансформації: через нестаціонарність гідрологічних рядів реальна частота екстремальних подій може відхилятися від розрахункової, що вимагає коректного врахування при інтерпретації результатів моделювання [41]. Дослідженнями встановлено, що для річок басейну Прип'яті, до якого належить р. Горинь, спостерігається зростання максимальних витрат весняної повені внаслідок зміни режиму сніготанення та збільшення частки рідких опадів у зимовий період [42].

3.3.2 Результати моделювання повені 10% забезпеченості

Сценарій повені 10% забезпеченості відображає умови, за яких можливе помірне виходження водних мас з меж основного русла на заплавні ділянки. При цьому затоплення набуває переважно локального характеру і охоплює низько розташовані заплавні луки, тераси та заплавні озера-стариці. Площа зони затоплення у даному сценарії становить 90,55 км².

Просторовий розподіл глибин затоплення та швидкостей течії, отриманий у результаті 2D моделювання, виявляє суттєву диференціацію гідравлічних характеристик вздовж русла р. Горинь. Найвища концентрація витрат спостерігається в ділянках звуження заплави, де рельєф обмежує розлив, що призводить до локального збільшення швидкостей течії. Навпаки, у широких заплавних улоговинах потік розтікається, глибини зменшуються, а швидкості падають до значень, характерних для руху на прибережних мілководдях.

Часткового затоплення може зазнати територія садового товариства на південь від с. Ташки Хмельницької області, а також житлові будинки в прилеглий забудові; глибина затоплення може сягати 1,5 м. Зони затоплення зображені на рис.3.3.

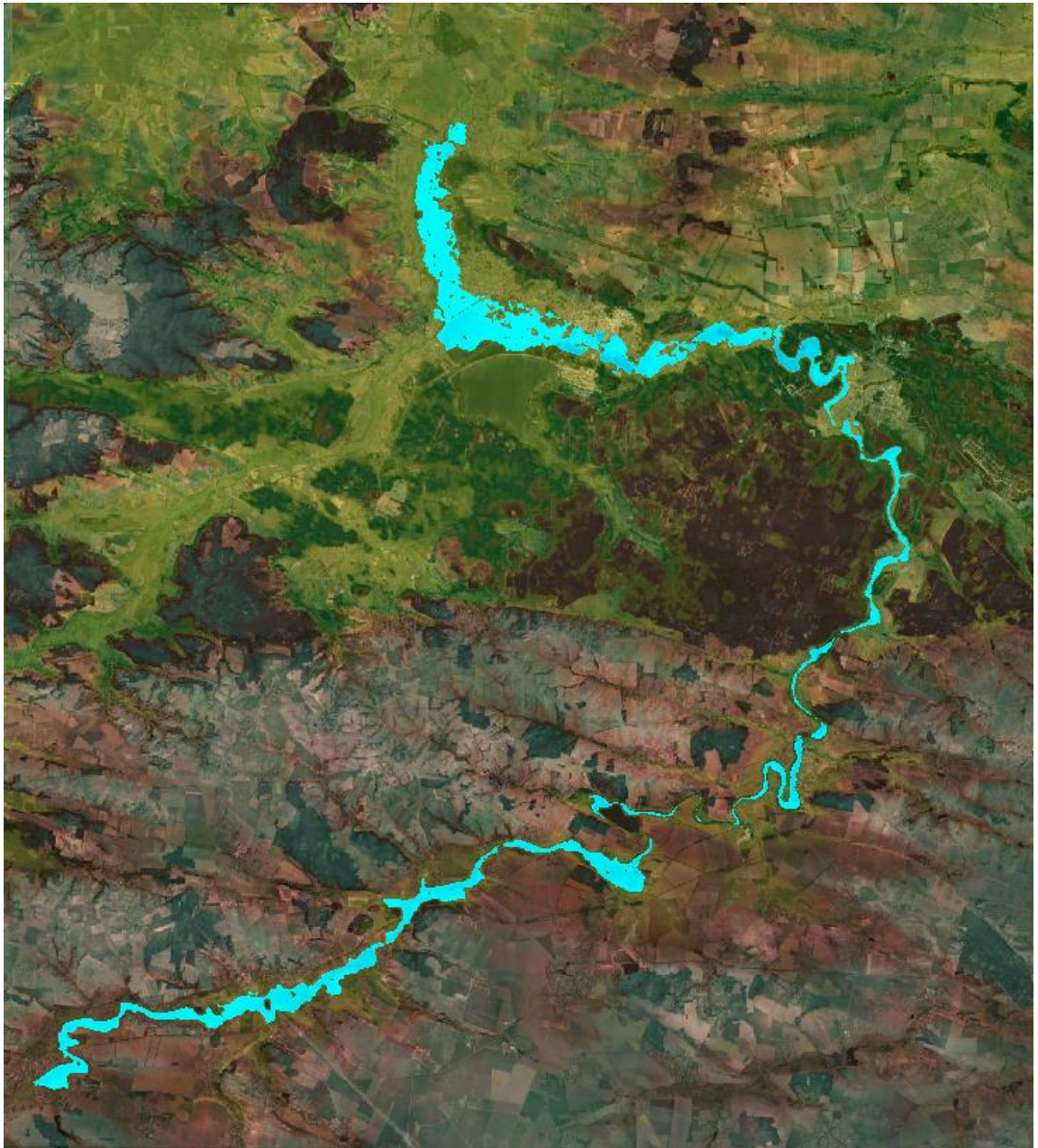


Рис.3.2 Результати моделювання повені 10% забезпеченості накладені на топографічну карту



Рис.3.3 Карта затоплення території садового товариства на південь від с. Ташки.

3.3.3 Результати моделювання повені 1% забезпеченості

Розрахунковий сценарій 1% забезпеченості є базовим для оцінки ризиків затоплення селітебних територій та господарських об'єктів. При реалізації цього сценарію зона затоплення розширюється порівняно із попереднім і охоплює 119,08 км². Просторовий аналіз результатів моделювання дозволяє виокремити кілька категорій потенційно затоплюваних об'єктів:

- сільськогосподарські угіддя нижньої заплави;
- присадибні ділянки та будівлі в населених пунктах, розташованих на низькій заплаві;
- ділянки автомобільних доріг та мостові переходи;
- об'єкти осушувальної меліорації (насосні станції, регулятори).

Критичним параметром для оцінки небезпечності затоплення є не лише максимальна глибина, але й швидкість течії. Відповідно до прийнятих критеріїв, рух людини стає небезпечним при глибині $> 0,5$ м та швидкості $> 1,0$ м/с, а пошкодження легких будівель відбуваються при глибині $> 1,5$ м [43]. Зіставлення розрахованих параметрів потоку з цими критеріями дозволяє диференціювати зони за ступенем гідрологічної небезпеки.

Затоплення населених пунктів і житлових будинків спостерігається в другій половині зони моделювання. Зокрема, виявлено:

- затоплення декількох житлових будинків в с. Варварівська та с. Голики Хмельницької області;
- майже повне затоплення території садового товариства на південь від с. Ташки Хмельницької області;
- затоплення житлових будинків, у прибережній зоні м. Славута, зображено на рис. 3.5;
- затоплення декількох житлових будинків в с. Крупець.



Рис.3.4 Результати моделювання повені 1% забезпеченості накладені на топографічну карту.

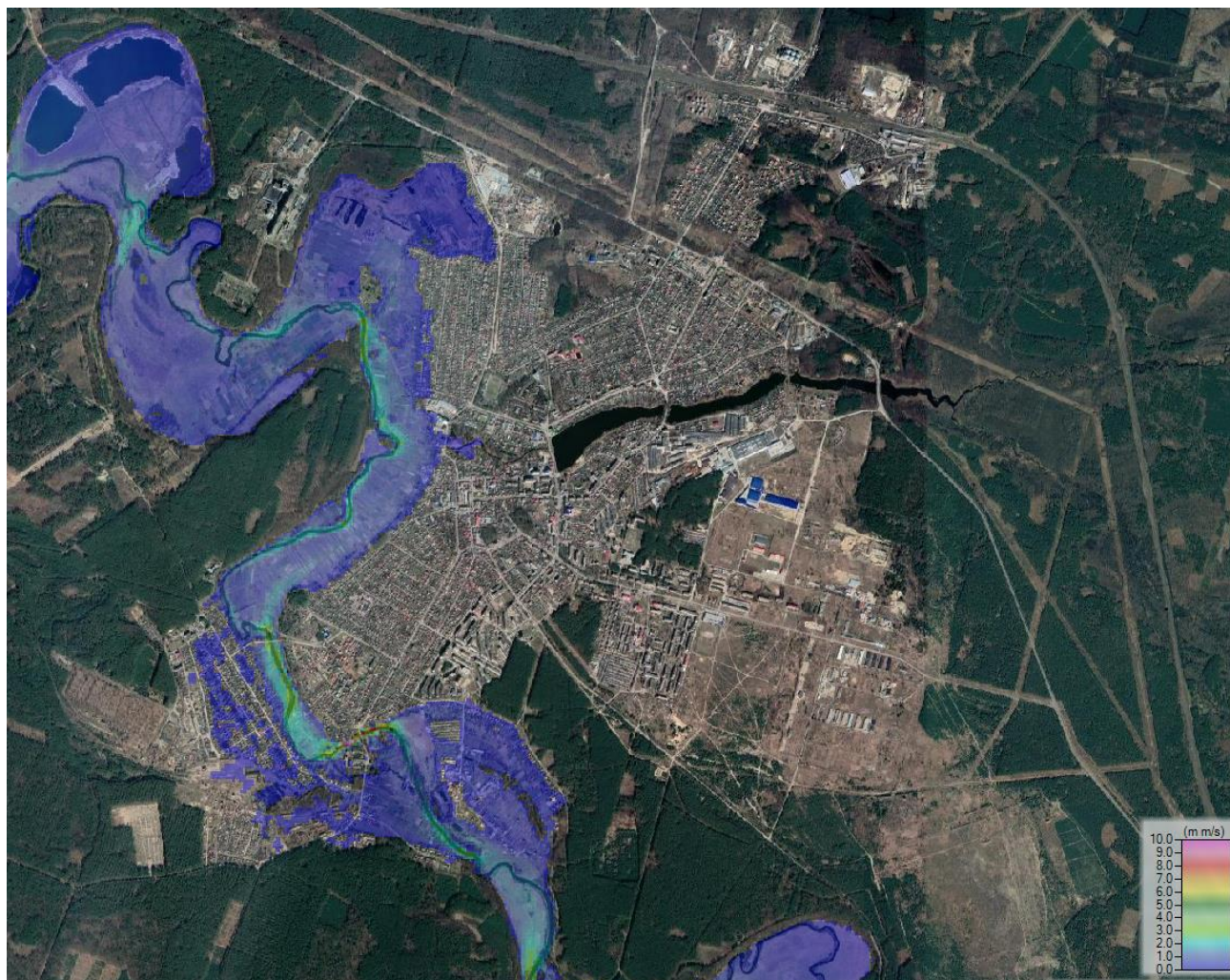


Рис.3.5 Карта з показником небезпечності потоку ($\text{Depth} \cdot \text{Velocity}$) в районі м. Славута.

3.3.4 Результати моделювання повені 0,5% забезпеченості

Сценарій 0,5% забезпеченості моделює катастрофічну повінь з інтервалом повторюваності 200 років. Порівняно зі сценарієм 1%, збільшення максимальних витрат призводить до непропорційно більшого розширення зони затоплення через пологі форму рельєфу заплав, характерну для рівнинних річок Поліського регіону. Даний сценарій виявляє затоплення ділянок, які раніше могли вважатися умовно безпечними, та демонструє потенційне з'єднання заплавних водних мас р. Горинь із заплавами приток.

Площа зони затоплення у цьому сценарії лише незначно відрізняється від сценарію повені 1 % забезпеченості і становить 123 км². Хоч глибина затоплення

не сильно відрізняється від повені 1% забезпеченості, але швидкість течії є більшою та відповідно значення показники небезпечності потоку є більшими.

Спостерігається затоплення наступних населених пунктів:

- затоплення житлових будинків в с. Михнів Хмельницької області;
- затоплення житлових будинків в м. Ізяслав;
- затоплення декількох житлових будинків в с. Варварівська та с. Голики Хмельницької області;
- майже повне затоплення території садового товариства на південь від с. Ташки Хмельницької області;
- затоплення житлових будинків, в районі річки в м. Славута, зображено на рис.3.8;
- затоплення житлових будинків в с. Крупець Хмельницької області;
- затоплення житлових будинків в с. Стригани Хмельницької області;
- затоплення житлових будинків в с. Полянх Хмельницької області;
- затоплення житлових будинків та частини промислової зони в м. Нетішин.

Зона затоплення території садового товариства на південь від с. Ташки Хмельницької області є особливо небезпечною так як має показник небезпечності потоку понад 2.2, де розташовані житлові будинків (рис.3.7). Зона затоплення м. Славута схожа на зону затоплення повені 1% забезпеченості, хоча площа затоплення є дещо більшою, але основна течія води зосереджена в зоні русла річки (рис.3.8).



Рис.3.6 Результати моделювання повені 0,5% забезпеченості накладені на топографічну карту

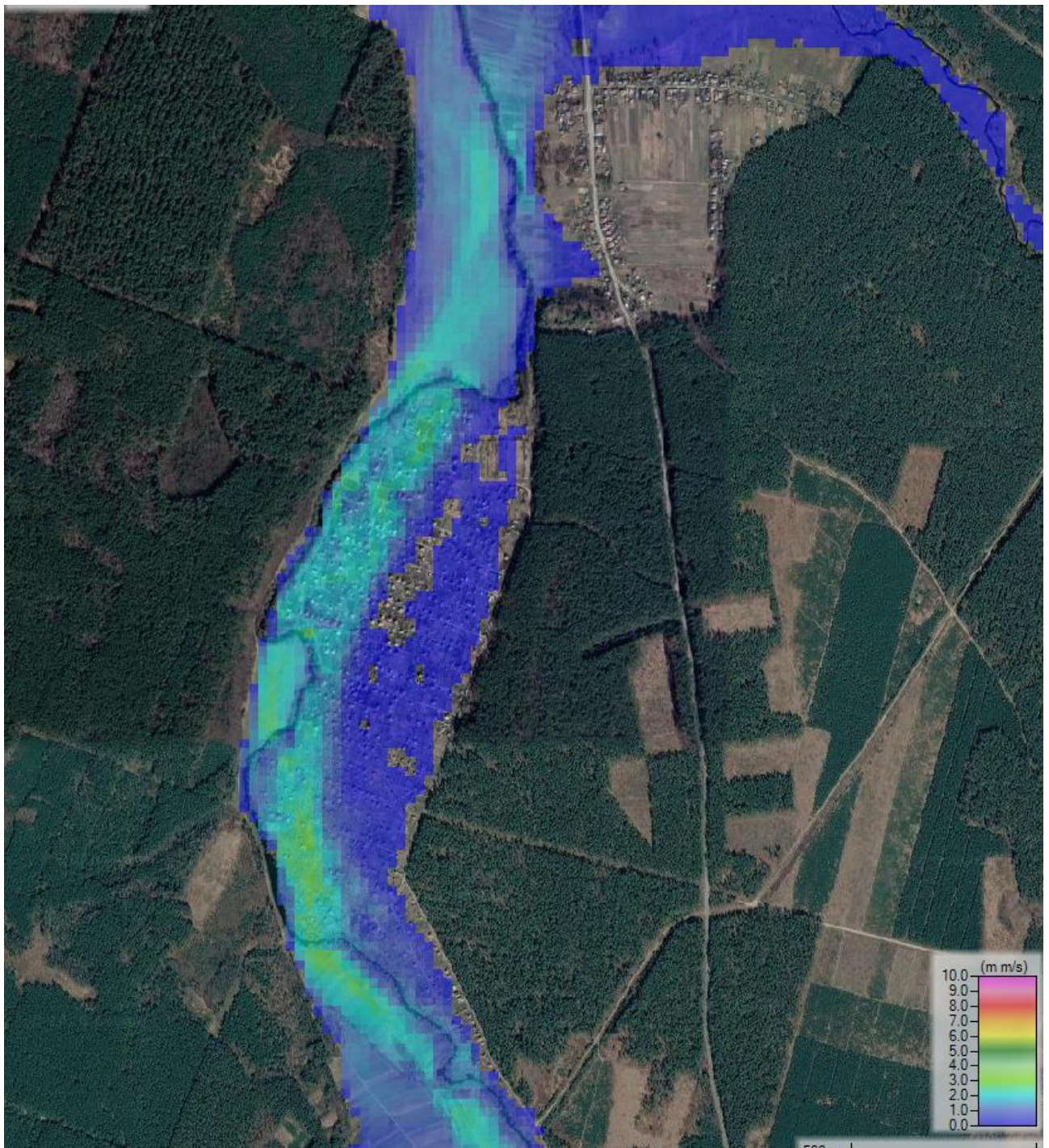


Рис.3.7 Карта з показником небезпечності потоку ($Depth*Velocity$) в районі садового товариства на південь від с. Ташки Хмельницької області.

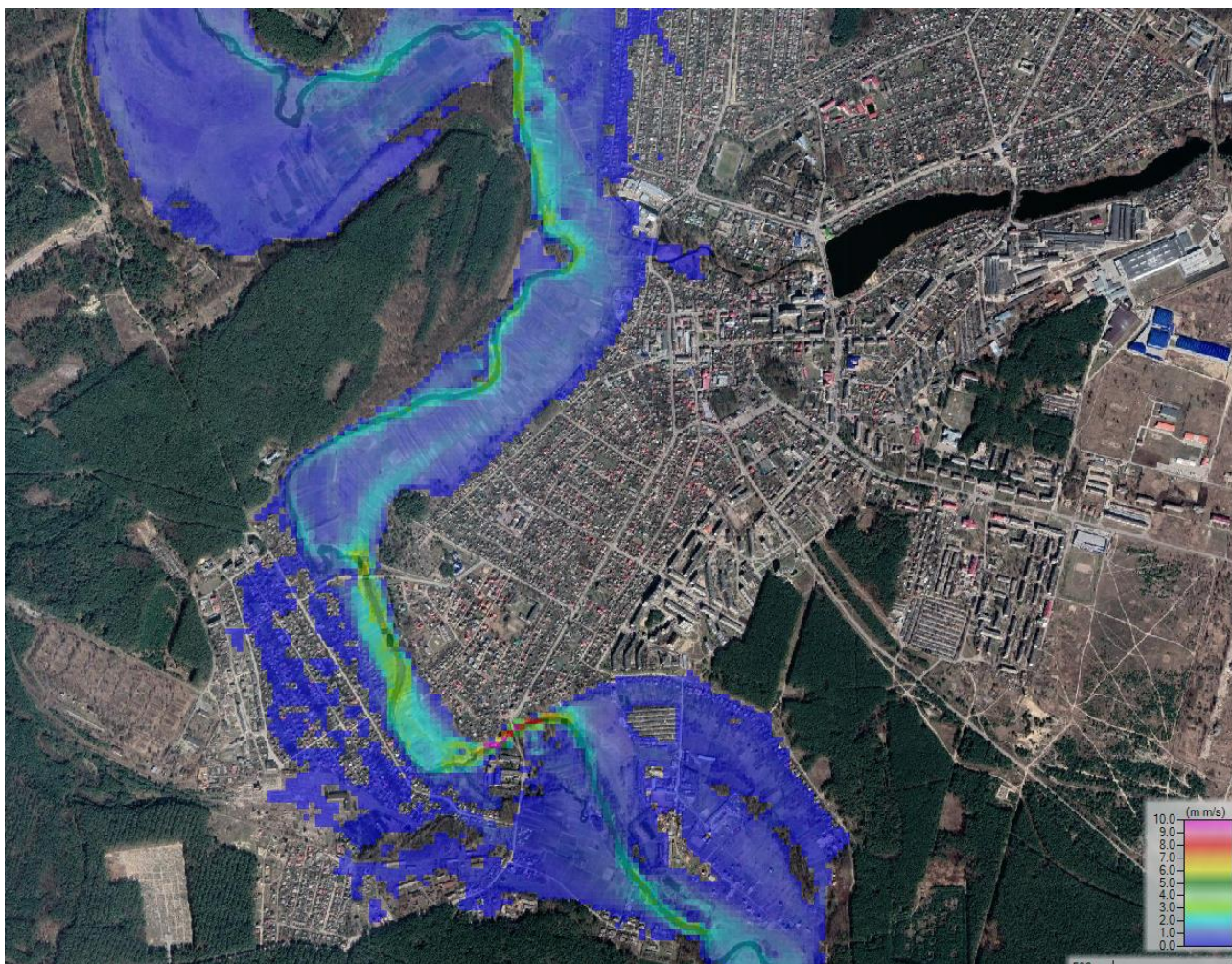


Рис.3.8 Карта з показником небезпечності потоку ($Depth*Velocity$) в районі м. Славути.

Висновки до розділу 3

На основі проведеного гідравлічного моделювання водного режиму р. Горинь за допомогою програмного комплексу HEC-RAS 6.5 можна зробити такі висновки:

1. Ефективність методики двовимірного моделювання: Застосування 2D-гідравлічного моделювання на основі розв'язання рівнянь мілкої води (Saint-Venant) методом кінцевих об'ємів довело свою високу ефективність для умов рівнинних річок Полісся. Використання цифрової моделі рельєфу Copernicus GLO-30 у поєднанні з деталізованою обчислювальною сіткою дозволило високоточно відтворити складну просторову динаміку поширення паводкових вод на заплаві.

2. Диференціація зон затоплення за сценаріями: Моделювання трьох розрахункових сценаріїв виявило нелінійне зростання площ затоплення. За повені 10 % забезпеченості затоплення має переважно локальний характер, охоплюючи 90,55 км² низьких заплавних лук та частково зачіпаючи окремі домогосподарства. Катастрофічні сценарії 1 % та 0,5 % забезпеченості призводять до розширення зон затоплення до 119,08 км² та 123 км² відповідно, супроводжуючись різким зростанням гідродинамічної небезпеки.
3. Оцінка гідрологічних ризиків для селітебних територій: Розрахунки виявили високу вразливість низки населених пунктів до екстремальних гідрологічних подій. За сценаріями 1 % та 0,5 % під ризик суттєвого затоплення підпадають житлові та господарські об'єкти в м. Славута, м. Ізяслав, м. Нетішин (включно з промисловою зоною), а також у селах Ташки, Варварівська, Голики та Крупець.
4. Критерії небезпечності потоку: Аналіз комплексного показника небезпечності ($\text{Depth} \times \text{Velocity}$) свідчить, що за екстремальних сценаріїв швидкості течії на урбанізованих ділянках та в місцях звуження долини перевищують критичні значення, що створює пряму загрозу для життя людей (показник $> 2,2$) та цілісності інженерної інфраструктури.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі вирішено актуальне науково-практичне завдання щодо комплексної оцінки та моделювання гідрологічного режиму річки Горинь із застосуванням програмного комплексу HEC-RAS в умовах сучасних кліматичних змін. За результатами дослідження сформульовано такі висновки:

1. **Вплив фізико-географічних умов на формування стоку.** Басейн р. Горинь характеризується значною просторовою неоднорідністю рельєфу (від Волино-Подільської височини до Поліської низовини) та високим антропогенним навантаженням. Розорюваність понад 60 % водозбору та масштабні осушувальні меліорації минулого століття кардинально змінили природні механізми регулювання стоку, знизивши акумулятивну здатність басейну.
2. **Трансформація гідрологічного режиму під впливом змін клімату.** Встановлено, що підвищення середньорічної температури в регіоні на 1,4–1,5 °C та збільшення частки рідких опадів у зимовий період призвели до суттєвої зміни фаз водності. Фіксується статистично значуще зниження середніх максимальних витрат весняного водопілля на 25–40 % та зміщення дат проходження максимумів на 7–14 діб раніше, що порушує стаціонарність багаторічних гідрологічних рядів.
3. **Визначення розрахункових характеристик стоку.** З урахуванням нестаціонарності рядів, за допомогою трипараметричного розподілу Пірсона III типу визначено розрахункові максимальні витрати води для вхідних та вихідних створів моделі. Для гідрологічного поста Оженин максимальні витрати становлять: 10 % забезпеченості — 311 м³/с, 1 % — 766 м³/с, 0,5 % — 919 м³/с.
4. **Просторова ідентифікація паводкових ризиків.** Розроблена двовимірна нестаціонарна гідравлічна модель HEC-RAS дозволила достовірно картувати зони ризику. Доведено, що при катастрофічних повенях (забезпеченістю 1 % та 0,5 %) площа затоплення сягає 119–123 км², при цьому критичні показники небезпечності потоку охоплюють значні площі міської забудови (Славута, Нетішин, Ізяслав) та сільських населених пунктів.
5. **Практична цінність моделювання для управління водними ресурсами.** Класичні методи гідрологічних розрахунків є недостатніми для надійного прогнозування в умовах кліматичної невизначеності. Отримані у роботі картографічні матеріали та сценарні моделі є науково обґрунтованою базою для Басейнових управлінь водних ресурсів та органів місцевого самоврядування з метою оптимізації водогосподарських

заходів, оновлення систем протиповеневого захисту та коригування просторового планування прирічкових територій.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Енциклопедія сучасної України / ред. кол.: І. М. Дзюба [та ін.] ; НАН України, НТШ. — К. : Інститут енциклопедичних досліджень НАН України, 2001—2025. — ISBN 966-02-2074-X.
2. Горинь // Велика українська енциклопедія (ВУЕ) / НАН України. — 2024. URL: <https://vue.gov.ua/%D0%93%D0%BE%D1%80%D0%B8%D0%BD%D1%8C>
3. Хільчевський В. К. та ін. Гідроекологічний стан басейну Горині в районі Хмельницької АЕС : монографія. — К. : Ніка-центр, 2011. — 176 с.
4. Геологічна будова України // Українська Радянська Енциклопедія (enu.org.ua). — 2026. URL: <https://enu.org.ua/ure/ure17/geologichna-budova-ukrayiny>
5. Горинь / І. М. Коротун // Енциклопедія Сучасної України / НАН України. — Київ: ІЕД НАН України, 2006. URL: <https://esu.com.ua/article-31256>
6. Річка Горинь // Регіональний офіс водних ресурсів у Хмельницькій обл. (Держводагентство). — 2023. URL: <https://rovrkhm.gov.ua/%D1%80%D1%96%D1%87%D0%BA%D0%B0-%D0%B3%D0%BE%D1%80%D0%B8%D0%BD%D1%8C/>
7. Горинь (річка) // Центр геоінформаційного моніторингу (cgm.rv.ua). — 2014. URL: <https://cgm.rv.ua/gorin-richka>
8. Водні ресурси: річка Горинь // Басейнове управління водних ресурсів річки Прип'ять, Держводагентство України. URL: https://buvrzt.gov.ua/vodni_resyrsy.html
9. Яцик А. В., Пашенюк І. А., Гопчак І. В. та ін. Водогосподарсько-екологічні проблеми річок Західного Полісся України (на прикладі басейну річки Горинь) // Вісник аграрної науки. — 2018. — № 10 (787). — С. 61–65. URL: <https://agrovisnyk.com/index.php/agrovisnyk/article/view/736>
10. Регіональна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Рівненській обл. за 2021 р. / Рівненська ОДА. — Мінекоенерго України. —

2022. URL: <https://mepr.gov.ua/wp-content/uploads/2022/10/Regionalna-dopovid-Rivnenska-ODA-2021.pdf>
11. Регіональна доповідь про стан навколишнього природного середовища у Волинській обл. за 2021 р. / Волинська ОДА. — Мінекоенерго України. — 2022. URL: <https://mepr.gov.ua/wp-content/uploads/2022/10/Regionalna-dopovid-Volynska-ODA-2021.pdf>
 12. Загальні відомості: ресурсний потенціал, географічні дані // Рівненська ОДА (ror.gov.ua). URL: <https://ror.gov.ua/zagalni-vidomosti/resursnii-potencial-geografichni-ta-demografichni-dani>
 13. Кліматичні умови // Варковицька сільська рада Дубенського р-ну Рівненської обл. URL: <https://varkovsr.gov.ua/kharakterystyka-hromady/klimatychni-umovy>
 14. Вплив зміни клімату в Україні / Звіт Met Office. — Мінекоенерго України. — 2023. URL: https://mepr.gov.ua/wp-content/uploads/2023/07/2_Vplyv-zminy-klimatu-v-Ukrayini.pdf
 15. Адаменко Т. О. Мусимо готуватися до посух, потопів і нестерпної спеки // SuperAgronom.com (інтерв'ю з керівницею відділу агрометеорології Укргідрометцентру). — 2024. URL: <https://superagronom.com/news/18867-navit-yakscho-lyudstvu-poschastit-obmejiti-rist-temperaturi-na-rivni-15s-pogoda-lishitsya-ekstremalnoyu--adamenko>
 16. Зміна клімату (аналіз тенденцій) // Офіційний портал Житомирської ОДА, Служба охорони навколишнього середовища. URL: https://ecology.zt.gov.ua/rd_TZK_3-1.htm
 17. Клімат України / За ред. В. М. Ліпінського, В. А. Дячука, В. М. Бабіченко. — К.: Вид-во Раєвського, 2003. — 343 с.
 18. Забокрицька М. Р., Хільчевський В. К. Горинь // Велика українська енциклопедія. URL: <https://vue.gov.ua/Горинь>.
 19. Характеристика умов формування мінімального стоку річок басейну Дніпра. Гідролого-гідрохімічна характеристика мінімального стоку річок басейну Дніпра / В. К. Хільчевський та ін.

20. ДБН В.2.4-8:2014. Визначення розрахункових гідрологічних характеристик. Київ : Мінрегіон України, 2014. 68 с.
21. Лук'янець О.І., Сусідко М.М. Сучасні зміни характеристик стоку річок басейну Прип'яті. Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія. 2018. Т. 4(51). С. 6–18. URL: <http://www.hydrojournal.knu.ua/>
22. Гребінь В.В. Сучасний водний режим річок України (ландшафтно-гідрологічний аналіз) : монографія. Київ : Ніка-Центр, 2010. 316 с.
23. Гребінь В.В., Хільчевський В.К. Регіональний аналіз багаторічної динаміки складових водного балансу басейну Прип'яті в межах України. Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія. 2021. № 4(62). С. 6–24. URL: <http://www.hydrojournal.knu.ua/>
24. Ободовський О.Г., Лук'янець О.І., Гребінь В.В. та ін. Гідрологічні та водогосподарські розрахунки : навч. посіб. Київ : ВПЦ «Київський університет», 2013. 216 с.
25. IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte V., Zhai P., Pirani A. et al. (eds.)]. Cambridge University Press, 2021. 2391 p. URL: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>
26. Milly P.C.D., Betancourt J., Falkenmark M. et al. Stationarity Is Dead: Whither Water Management? Science. 2008. Vol. 319. P. 573–574. URL: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.1151915>
27. Балабух В.О., Малицька Л.В. Оцінка змін кліматичних умов України в XXI столітті на основі ансамблю регіональних кліматичних моделей. Геофізичний журнал. 2017. Т. 39, № 2. С. 60–77. URL: <http://gj.nas.gov.ua/>
28. Овчарук В.А., Гопченко Є.Д., Романчук М.Є. Сучасні зміни максимального стоку весняного водопілля на річках басейну Прип'яті. Український гідрометеорологічний журнал. 2018. № 21. С. 89–98. URL: <https://uhmj.org.ua/>

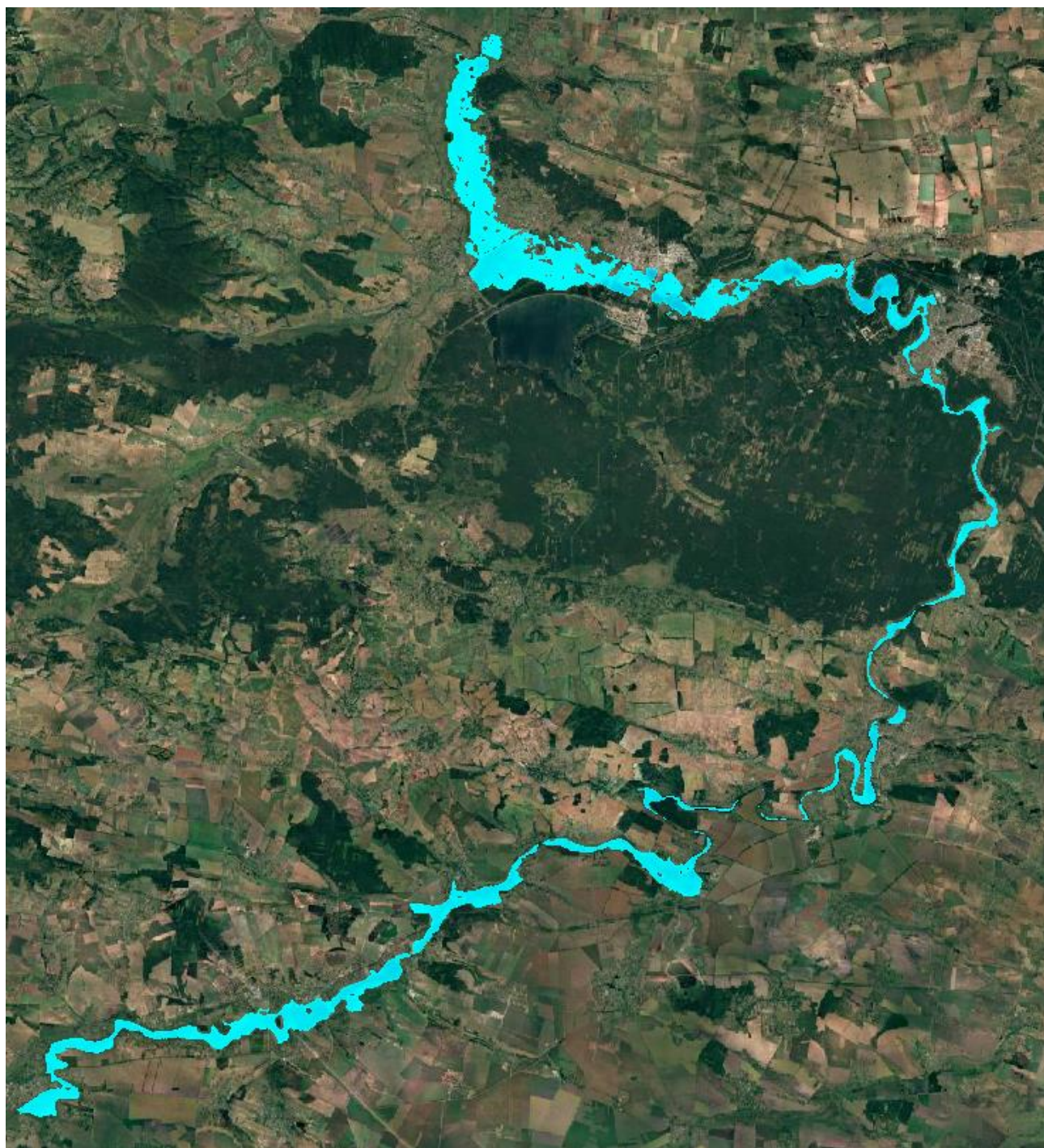
29. Хільчевський В.К., Гребінь В.В. Гідрографічне та водогосподарське районування території України : монографія. Київ : Ніка-Центр, 2019. 164 с.
30. Brunner G.W. HEC-RAS River Analysis System: Hydraulic Reference Manual. Version 6.0. Davis, CA : US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, 2021. 533 p. URL: <https://www.hec.usace.army.mil/confluence/rasdocs/ras1dtechref/latest>.
31. Хільчевський В.К., Гребінь В.В., Савицький В.М. та ін. Загальна гідрологія : підручник. Київ : Академперіодика, 2008. 399 с.
32. Ободовський О.Г., Онищук В.В., Копаліані З.Д. Гідравліка та гідрологія : навч. посіб. Київ : КНУ імені Тараса Шевченка, 2010. 272 с.
33. World Meteorological Organization. Guide to Hydrological Practices. Volume I: Hydrology – From Measurement to Hydrological Information. WMO-No. 168. 6th ed. Geneva : WMO, 2008. 296 p. URL: https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=4147.
34. Центральна геофізична обсерваторія імені Бориса Срезневського. Щорічник поверхневих вод. Басейн р. Прип'ять. Київ : ЦГО, 2020. 214 с.
35. Krakovska S.V., Palamarchuk L.V., Shedemenko I.P., Dyukel G.O. Changes in regional climate of Ukraine: past and future / eds. S.V. Krakovska. Kyiv : Ukrainian Hydrometeorological Institute, 2019. 228 p.
36. Brunner G. W. HEC-RAS River Analysis System 2D Modeling User's Manual. Version 6.0 / G. W. Brunner. – Davis, CA : U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, 2021. – 171 p. – URL: <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documentation.aspx>.
37. Horritt M. S. Evaluation of 1D and 2D numerical models for predicting river flood inundation / M. S. Horritt, P. D. Bates // Journal of Hydrology. – 2002. – Vol. 268, № 1–4. – P. 87–99. – DOI: 10.1016/S0022-1694(02)00121-X.
38. Teng J. Flood inundation modelling: A review of methods, recent advances and uncertainty analysis / J. Teng, A. J. Jakeman, J. Vaze, B. F. W. Croke, D. Dutta,

- S. Kim // Environmental Modelling & Software. – 2017. – Vol. 90. – P. 201–216. – DOI: 10.1016/j.envsoft.2017.01.006.
39. European Space Agency. Copernicus Global Digital Elevation Model [Електронний ресурс] / European Space Agency. – Distributed by OpenTopography, 2024. – DOI: 10.5069/G9028PQB. – URL: <https://doi.org/10.5069/G9028PQB> (дата звернення: 15.05.2026).
40. QGIS Development Team. QGIS Geographic Information System. Version 3.44 [Електронний ресурс] / QGIS Development Team. – Open Source Geospatial Foundation, 2024. – URL: <https://www.qgis.org> (дата звернення: 15.05.2026).
41. Geofabrik GmbH. OpenStreetMap Data Extracts: Ukraine [Електронний ресурс] / Geofabrik GmbH. – URL: <https://download.geofabrik.de/europe/ukraine.html> (дата звернення: 15.05.2026).
42. Pappenberger F. Uncertainty in the calibration of effective roughness parameters in HEC-RAS using inundation and downstream level observations / F. Pappenberger, K. Beven, M. Horritt, S. Blazkova // Journal of Hydrology. – 2005. – Vol. 302, № 1–4. – P. 46–69. – DOI: 10.1016/j.jhydrol.2004.06.036.
43. Jonkman S. N., Kelman I. An Analysis of the Causes and Circumstances of Flood Disaster Deaths. Disasters. 2005. Vol. 29, № 1. P. 75–97. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.0361-3666.2005.00275.x>

ДОДАТКИ

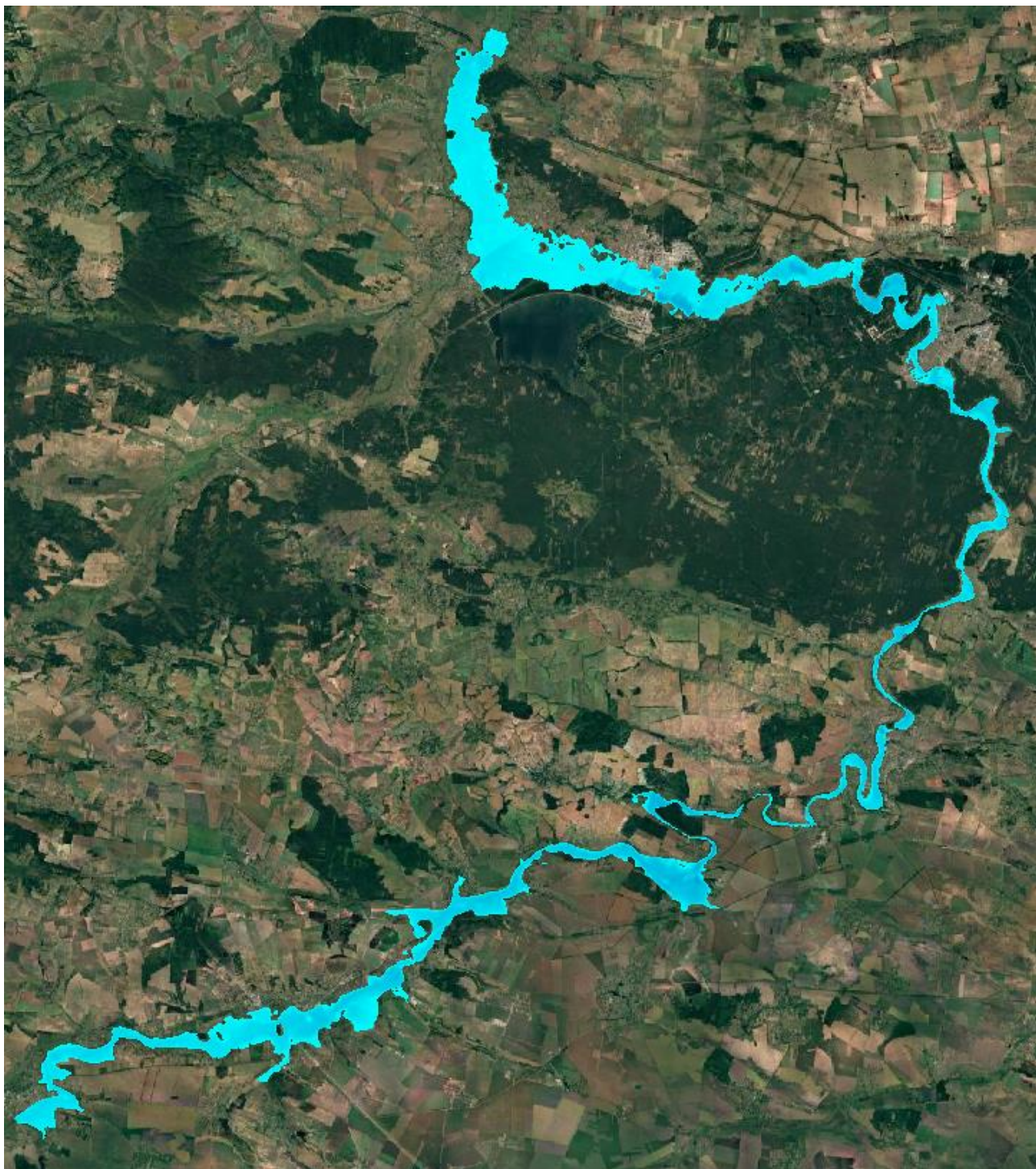
Додаток А1

Карта моделі повені 10% забезпеченості накладена на супутниковий знімок.



Додаток А2

Карта моделі повені 1% забезпеченості накладена на супутниковий знімок.



Додаток А3

Карта моделі повені 0,5% забезпеченості накладена на супутниковий знімок

