

Міністерство освіти і науки України
Київський національний університет імені Тараса Шевченка
Географічний факультет
Кафедра гідрології та гідроекології

РОЗРОБКА МЕТОДИКИ ПРОГНОЗУ ЩОДЕННИХ РІВНІВ ТА
ВИТРАТ ВОДИ РІЧКИ ДНІСТЕР У М. ГАЛИЧ МЕТОДОМ
ВІДПОВІДНИХ РІВНІВ З УРАХУВАННЯМ БОКОВОГО ПРИПЛИВУ
Р. СТРИЙ

Галузь знань: 10 – Природничі науки

Спеціальність: 103 – Науки про Землю

Освітньо-наукова програма «Гідрологія та інтегроване управління водних
ресурсів»

Виконала магістр 2-го року навчання

Пригорницької Ольги Сергіївни

Науковий керівник:

кандидат географічних наук

Гопцій Марина Володимирівна

Київ – 2026

ЗМІСТ

ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1	
ФІЗИКО-ГЕОГРАФІЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНУ ДОСЛІДЖЕНЬ ...	7
1.1 Географічне положення басейну Верхнього Дністра та басейну р. Стрий	7
1.2 Кліматичні умови та фактори формування стоку в гірській частині басейну	8
1.3 Гідрографічна характеристика ділянки злиття річок Дністер та Стрий	10
1.4 Гідрологічний режим: особливості формування стоку на р. Дністер та р. Стрий	11
РОЗДІЛ 2	
ВИХІДНІ ДАНІ ТА АНАЛІЗ ГІДРОЛОГІЧНОЇ ВИВЧЕНОСТІ	15
2.1 Характеристика мережі гідрологічних постів на досліджуваній ділянці: м. Розділ — м. Стрий — м. Галич	15
2.2 Аналіз наявних рядів спостережень за рівнями та витратами води	17
2.3 Порівняльний аналіз суміщених гідрографів стоку та оцінка фазового зміщення стоку на річках Дністер і Стрий	20
РОЗДІЛ 3	
ТЕОРЕТИКО-МЕТОДИЧНІ ОСНОВИ ПРОГНОЗУВАННЯ СТОКУ РІЧОК	29
3.1 Огляд сучасних методик гідрологічного прогнозування в Україні та за кордоном (математичне моделювання, штучний інтелект, балансові методи)	29
3.2 Обґрунтування вибору методу відповідних витрат для умов басейну Дністра (переваги та обмеження)	31

3.3 Сутність методу відповідних рівнів (витрат) води та рівняння водного балансу	34
3.4 Закономірності трансформації та накладання стоку у місці злиття річок	37
3.5 Особливості визначення часу добігання від різних вхідних створів	39
РОЗДІЛ 4	
РОЗРОБКА МЕТОДИКИ ПРОГНОЗУВАННЯ ДЛЯ ДІЛЯНКИ РОЗДІЛ – ГАЛИЧ	43
4.1 Визначення часу добігання стоку між створами	43
4.2 Побудова та оцінка прогностичних залежностей	46
4.3 Перевірка справджуваності прогнозів на незалежному матеріалі та розрахунок похибок	51
ВИСНОВКИ	55
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	58

ВСТУП

Річка Дністер є однією з найбільших транскордонних річок України. Її верхня течія характеризується складним гідрологічним режимом із вираженими весняним водопіллям та літніми паводками. Формування стоку на ділянці від Розділу до Галича відбувається під впливом гірських приток, найбільшою з яких є Стрий.

Вибір теми магістерської роботи був зумовлений проходженням виробничої практики в Українському гідрометеорологічному центрі ДСНС України у відділу гідрологічних прогнозів у 2025 р., під час якої здійснювалася робота з даними гідрологічних спостережень та вивчалися методи короткострокового прогнозування стоку.

Актуальність теми викликана потребою підвищення точності прогнозування гідрологічного режиму річки Дністер у районі Галич з урахуванням бокового припливу річки Стрий. Прогнозування рівнів та витрат води є одним із пріоритетних завдань оперативної гідрології, оскільки своєчасні й точні попередження про паводки забезпечують безпеку населення та захист господарських об'єктів. Трансформація хвилі паводку на ділянці від Розділу до Галича ускладнюється впливом бокового припливу р. Стрий, що потребує врахування додаткових факторів при прогнозуванні. Метод відповідних рівнів є одним із найпоширеніших у практиці короткострокового прогнозування.

Мета дослідження - розробити методику прогнозування щоденних рівнів та витрат води річки Дністер у створі м. Галич методом відповідних рівнів з урахуванням бокового припливу річки Стрий.

Завдання дослідження:

- охарактеризувати фізико-географічні умови формування стоку на ділянці басейну Дністра від Розділу до Галича;

- проаналізувати гідрологічний режим р. Дністер у створах Розділ і Галич та р. Стрий на посту Стрий;
- оцінити вплив бокового припливу річки Стрий на формування стоку Дністра у створі Галич;
- встановити закономірності трансформації хвилі паводку на ділянці Дністра між гідрологічними постами Розділ і Галич;
- визначити час добігання хвилі паводку від створу Розділ до створу Галич для різних фаз водного режиму;
- обґрунтувати критерії розрахункових залежностей за умовами затоплення русла та заплави;
- розробити та апробувати методику прогнозу щоденних рівнів та витрат води в м. Галич методом відповідних рівнів з урахуванням бокового припливу р. Стрий;
- перевірити та оцінити точність розробленої методики.

Об'єкт дослідження - ділянка Розділ-Галич в басейні річки Дністер.

Предмет дослідження - закономірності трансформації хвилі паводку та формування щоденних рівнів і витрат води р. Дністер у м. Галич під впливом бокового припливу р. Стрий.

Вихідні дані та методи дослідження. Дослідження виконано на основі щоденних та штормових даних спостережень за рівнями та витратами води на постах р. Дністер – м. Розділ, р. Дністер – м. Галич та р. Стрий – с. Верхнє Синьовидне та р. Стрий – м. Стрий за період 1998-2020 рр., наданих Українським гідрометеорологічним центром. У роботі застосовано метод відповідних рівнів (витрат) води, кореляційно-регресійний аналіз, статистичний аналіз гідрологічних рядів, морфометричний методи.

Наукова новизна отриманих результатів. Удосконалено методику прогнозу рівнів та витрат води р. Дністер у м. Галич шляхом розподілу розрахункових залежностей за гідроморфологічними умовами (русло, заплава на ділянці Розділ та Галич) та врахування бокового припливу р. Стрий. Встановлено

кількісні параметри трансформації хвилі паводку на ділянці Розділ-Галич протяжністю близько 75 км та визначено час добігання. Удосконалено застосування методу відповідних рівнів води для річкової ділянки зі значним боковим припливом.

Практичне значення отриманих результатів. Розроблена методика може бути впроваджена в практику оперативного прогнозування для підвищення точності короткострокових прогнозів рівнів та витрат води р. Дністер у м. Галич. Застосування методики дозволить своєчасно попереджати про небезпечні гідрологічні явища у верхній течії Дністра, що сприятиме зменшенню ризиків підтоплення населених пунктів, об'єктів інфраструктури та сільськогосподарських угідь.

РОЗДІЛ 1

ФІЗИКО-ГЕОГРАФІЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНУ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1 Географічне положення басейну Верхнього Дністра та басейну р. Стрий

Дністер належить до найбільших річок України. Витоки річки розташовані на північно-східних схилах Карпат, а гирло знаходиться в акваторії Чорного моря. Протяжність Дністра становить 1362 км, тоді як площа його басейну сягає 72 100 км². Верхній Дністер охоплює ділянку від витoku до гирла р. Стрий (біля м. Розділ).

Басейн Верхнього Дністра знаходиться у Львівській та Івано-Франківській областях України, а також частково знаходиться на територію Польщі (верхів'я приток річки). Витік Дністра знаходиться в Львівській області Турківському районі, біля с. Волчі Комарники на висоті близько 900 м над рівнем моря (рис.1.1). Долина Верхнього Дністра характеризується значною звивистістю, численними перекатами та порогами, що зумовлено особливостями геологічної будови регіону.

Річка Стрий - найбільша права притока Верхнього Дністра, 232 км довжина, 2720 км² становить площа водозбору. Басейн річки Стрий знаходиться у межах Львівської та Івано-Франківської областей в східній частині Українських Карпат. Витік річки розташований на північному схилі хребта Горгани на висоті понад 1400 м над рівнем моря. Стрий впадає до Дністра біля м. Розділ Львівської області на висоті приблизно 300 м над рівнем моря [2, 4, 9, 15].

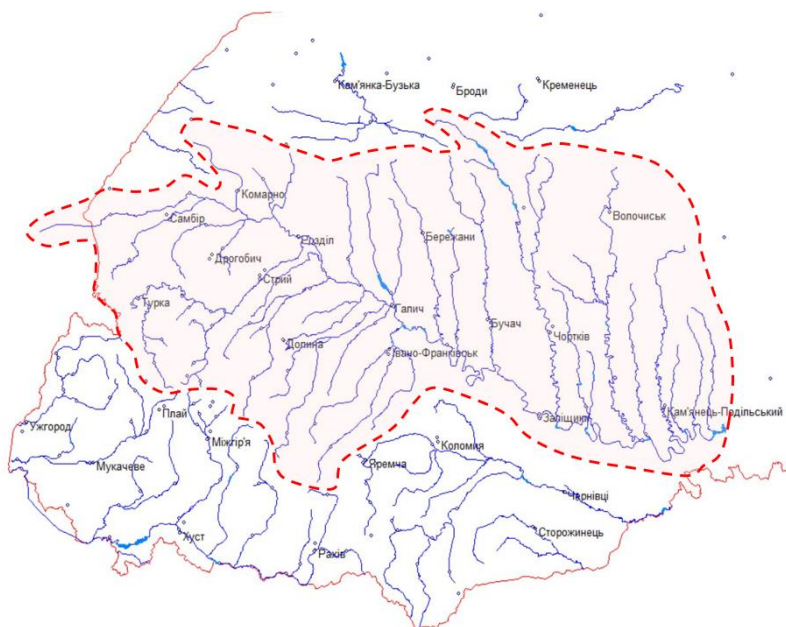


Рис. 1.1. Карта гідрографічної мережі басейну річки Дністер до м. Кам'янець-Подільську

1.2 Кліматичні умови та фактори формування стоку в гірській частині басейну

Клімат гірської частини басейнів Верхнього Дністра та р. Стрий характеризується як помірно-континентальний з рисами гірського.

У гірських районах розподіл температури повітря насамперед залежить від висоти над рівнем моря, а також від експозиції схилів і особливостей рельєфу. З підняттям у гори температура поступово знижується: на висотах близько 1200 м середньорічні показники становлять приблизно $+3^{\circ}\text{C}$, а на найвищих вершинах можуть наближатися до 0°C .

За наявності снігового покриву початок весняного водопілля майже збігається з моментом сталого переходу температури повітря через 0°C або відстає

від нього лише на кілька днів. У ранньовесняний період річки дуже швидко реагують на потепління: підвищення рівнів води та збільшення витрат починається вже за температури повітря близько $+5...+10\text{ }^{\circ}\text{C}$ [5,6,9].

Важливою відмінністю гірської та передгірської частин басейну є товщина покриву снігу. Значним сніговий покрив є в Карпатах: в першій половині лютого спостерігається товщина (приблизно 80 см), але може сягати 1,5 м, тоді як у передгір'ї вдвічі менша товщина снігу. У гірських районах, починаючи з висоти 800 м, перший сніговий покрив спостерігається вже в першій декаді листопада, а в першій декаді грудня набуває стійкого характеру. Скресання його затягується до третьої декади березня [11].

Опади є основним джерелом живлення річок басейну і характеризуються значною просторовою мінливістю. Річна сума опадів зростає з висотою від 600-700 мм у передгірській зоні до 1000-1200 мм на схилах Карпат і до 1400-1600 мм на окремих вершинних ділянках.

Річний розподіл опадів характеризується нерівномірністю. Близько 65–70% їхньої річної кількості спостерігається у теплий період року - з квітня по жовтень. Саме цей час збігається з періодом найбільшої водності гірських річок, коли інтенсивні дощі спричиняють підвищення рівнів води та формування паводків, що є характерною рисою гідрологічного режиму річок цього регіону.

Гірська частина, характеризується висотами 500–1500 м (місцями до 1800 м), різко розчленованим рельєфом і крутими схилами. Тут формуються витoki річок із швидкою течією, значними похилами та кам'янистим руслом. Через слабку проникність порід переважає поверхневий стік, що зумовлює різкі паводки. Ґрунти - буроземні та гірсько-лучні, а рослинність представлена переважно хвойними й буковими лісами.

Передгірська та середня частини басейну, приурочені до Волино-Подільська височина, мають менші висоти (200–400 м) і більш згладжений рельєф (рис. 1.2). Тут переважають широкі долини, звивисті русла та добре розвинена гідрографічна

мережа. Зростає роль підземного живлення, а течія річок стає повільнішою. Поширені різноманітні відклади (алювіальні, льодовикові, делювіальні), а також карстові процеси, пов'язані з вапняками і гіпсами, що впливають на перерозподіл стоку [16].

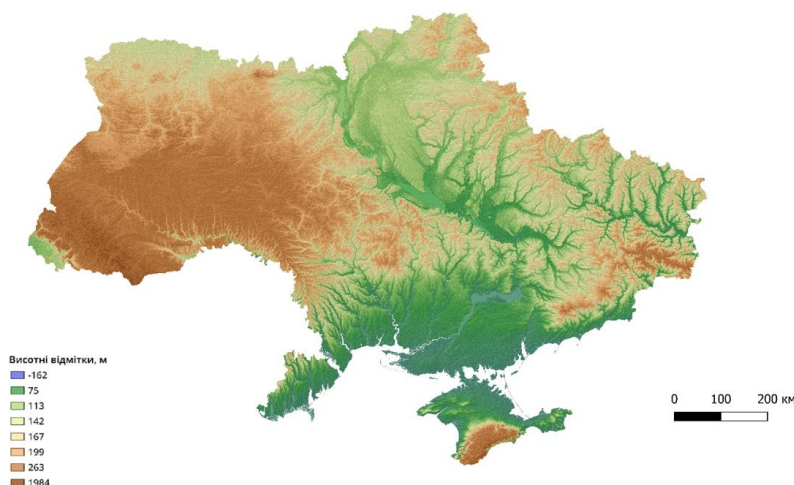


Рис. 1.2. Карта рельєфу України

У долинах річок розвинені широкі заплави з піщано-гальковими відкладами, старицями та заболоченими ділянками. Ґрунтовий покрив представлений дерново-підзолистими, сірими лісовими та чорноземами, а рослинність - змішаними і широколистяними лісами та луками.

1.3 Гідрографічна характеристика ділянки злиття річок Дністер та Стрий

Ділянка злиття річок Дністер та Стрий розташована в межах Передкарпаття поблизу Жидачів і є характерною перехідною зоною між гірськими та рівнинними гідрографічними умовами.

Дністер у цьому районі має переважно рівнинно-передгірський характер течії, з помірними швидкостями води, звивистим руслом і добре розвиненою заплавою, тоді як Стрий характеризується більшою швидкістю течії, різкими коливаннями рівнів води та значною кількістю твердого стоку. У місці впадіння Стрия в Дністер відбувається різке збільшення водності головної річки, особливо під час паводкових періодів, коли карпатські опади спричиняють стрімке підняття рівня води в Стрию. Це призводить до формування турбулентних потоків, інтенсивного перемішування вод і активізації руслових процесів [9, 10].

Важливою особливістю цієї ділянки є значне надходження алювіального матеріалу, який приносить Стрий. Галька, пісок і дрібні наносні частинки відкладаються в зоні злиття, утворюючи своєрідні акумулятивні форми рельєфу, змінюючи конфігурацію русла Дністра та сприяючи його зміщенню. Унаслідок цього формується широка, місцями заболочена заплава з численними меандрами, старицями та островами, що постійно трансформуються під впливом водного потоку [16].

У геоморфологічному відношенні ця територія є динамічною системою, де одночасно відбуваються процеси розмиву берегів і акумуляції наносів. Бічна ерозія сприяє руйнуванню берегів, тоді як у зонах зниження швидкості течії накопичуються відклади, формуючи нові елементи заплави. Це зумовлює постійну зміну руслової мережі та розвиток складного річкового ландшафту [16].

1.4 Гідрологічний режим: особливості формування стоку на р. Дністер та р. Стрий

Верхня та середня течія басейну Дністра розташована у Передкарпатському та Подільському гідрологічних районах. За особливостями живлення, рельєфу й

кліматичних умов басейн поділяється на дві частини - Карпатську та Волинсько-Подільську.

Для гідрологічного режиму Дністра характерна є наявність паводків протягом всього теплого періоду року, а в окремі роки - і взимку. При цьому максимальні витрати паводкових вод нерідко перевищують показники весняного водопілля [12].

Нерівномірний розвиток річкової мережі та відмінності кліматичних умов зумовлюють різну водність приток Дністра. У гірській частині басейну, особливо на правобережжі, паводки можуть виникати протягом усього року, тоді як для річок середньої частини басейну більш типовими є весняне водопілля та незначні паводки в теплий сезон [6, 7].

Живлення Дністра переважно дощове та снігово-дощове. Роль підземних вод у формуванні стоку є незначною і найбільше проявляється у середній течії річки.

Для карпатської ділянки басейну характерні часті паводки, що формуються внаслідок інтенсивних опадів у теплий період, зимових відлиг і таненням снігу навесні. Весняне водопілля іноді проходить кількома хвилями, а його розвиток може посилюватися весняними дощами.

У південно-східному напрямку відбувається зниження загальної водності. Гірської частини басейну річки є найбільш багатоводними, де середні річні модулі стоку становлять 20–30 л/(с·км²). У межах середньої течії цей показник зазвичай коливається в межах 2–5 л/(с·км²) [16].

Під час паводків рівень води може швидко підніматися - до 50–60 см за кілька годин, тоді як спад води відбувається повільніше. Під час значних паводків максимальні рівні формуються протягом 1–2 діб. Найвищі рівні води переважно спостерігаються навесні та влітку, а найнижчі - узимку і наприкінці осені. Упродовж року на річках басейну може виникати до 9–10 паводків.

На рівнинних притоках Волинсько-Подільської височини весняне водопілля зазвичай починається раніше, ніж на гірських річках. У середньому його початок

припадає на першу декаду березня, а максимальні рівні води спостерігаються у другій–третьій декадах місяця [12].

Побудова інтегральної кривої відхилень дозволила простежити за динамікою циклів водності, виявивши їхні якісні та кількісні характеристики. Річний стік, як інтегральний показник комплексу факторів, переважно кліматичних, визначає просторово-часову мінливість цих циклів.

Аналіз динаміки середньорічних витрат води на гідрологічних постах річок Дністер - Галич, Стрий - Верхнє Синьовидне та Дністер - с. Роздол (рис.1.3).

Використання даних поста Верхнє Синьовидне, а не Стрий обумовлене, тим що посту р. Стрий – м. Стрий проводять щоденні вимірювання лише рівня води, на відміну від посту р. Стрий – с. Верхнє Синьовидне.

На р. Дністер - Галич з 1947 - 1964рр. спостерігався маловодний період, з 1965 р. по 1981 р. — багатоводний, з 1982 р. по 1995 р. — знову маловодний, 1996 – 2010 рр. — багатоводний період, після чого знову розпочався маловодний, що триває дотепер.

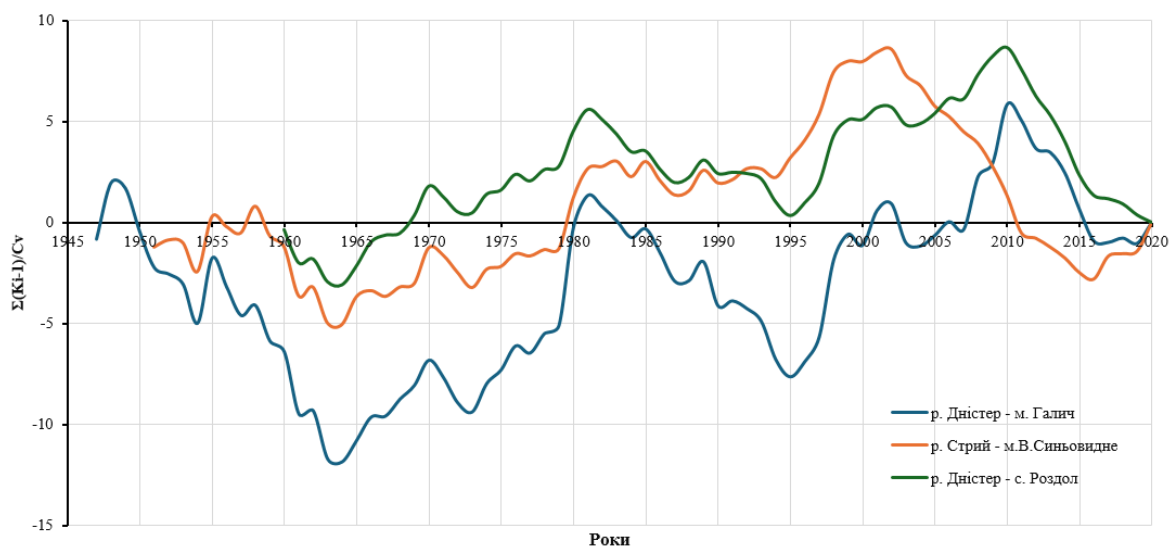


Рис. 1.3. Суміщені різницеві інтегральні криві середньорічних витрат води для досліджуваних водозборів

На р. Стрий з 1951 р. до 2002 р. тривав багатоводний період, з короткими фазовими коливаннями стоку зі зміною водності, з 2003 р. розпочався маловодний період, який триває дотепер. На відміну від Дністра, де можна визначити повні цикли водності, на р. Стрий за даними поста Верхнє Синьовидне, точно зафіксувати це не вдалося, незважаючи на те, що період спостережень - 69 років. Данна різниця між постами вказує на відмінність у характері багаторічної мінливості стоку: для р. Стрий, як гірської притоки, властива більша залежність від локальних опадів, сніготанення та короткочасних паводкових процесів, через що цикли водності проявляються менш чітко, тоді як на Дністрі вони згладжуються завдяки більшій площі басейну та відмінним умовам формування стоку.

На р. Дністер - Роздол з 1960 р. до 1981 р. спостерігався багатоводний період, з 1982 р. по 1995 р. - багатоводний, 1996-2010 рр. - після чого розпочалась маловодна фаза, що триває і дотепер.

Відносна синхронність коливань середньорічного стоку, що спостерігається на різних гідрологічних постах, свідчить про те, що антропогенний вплив на формування водного режиму річок у досліджуваному регіоні є незначним. Це добре простежується на інтегральних кривих, які відображають узгоджений характер змін водності [3].

Стаціонарність рядів спостережень середньорічного стоку є важливою ознакою циклічності гідрологічних процесів. Наявність повних циклів, що включають як багатоводні, так і маловодні періоди, підтверджує закономірну змінність водності річок у багаторічному розрізі [15].

Разом із тим, навіть за умов нині незначного антропогенного впливу, не можна виключати можливих змін у майбутньому, які можуть бути зумовлені кліматичними трансформаціями, господарською діяльністю або іншими чинниками.

РОЗДІЛ 2

ВИХІДНІ ДАНІ ТА АНАЛІЗ ГІДРОЛОГІЧНОЇ ВИВЧЕНОСТІ

2.1 Характеристика мережі гідрологічних постів на досліджуваній ділянці: м. Розділ - м. Стрий - м. Галич

Мережа гідрологічних спостережень на досліджуваній ділянці басейну Дністра включає три репрезентативні гідрологічні пости: м. Розділ на р. Дністер, м. Стрий на р. Стрий та м. Галич на р. Дністер. Просторове розміщення постів зумовлене морфометричними характеристиками басейну, структурою формування стоку та гідрографічними особливостями річкової системи, що дозволяє охопити основні етапи формування, проходження та трансформації стоку в межах верхньої та середньої частини басейну.

Гідрологічний пост у м. Розділ розташований у замикаючому створі гірської частини басейну Дністра приблизно за 75 км вище за течією від поста м. Галич. Його вибір зумовлений тим, що він контролює стік з верхньої, переважно гірської та передгірської частини водозбору, де формуються характерні особливості гідрологічного режиму. У цій частині басейну переважають значні ухили поверхні водозбору та русел, що зумовлює інтенсивний поверхневий стік, швидке стікання атмосферних опадів у річкову мережу, короткий час добігання стоку до створу та значні добові коливання рівнів води. У періоди інтенсивних дощів або танення снігу це призводить до швидкого підвищення рівнів води та формування короткочасних, але високих паводків. Завдяки цим особливостям пост м. Розділ використовується для оперативної оцінки формування і розвитку паводкових процесів у верхів'ї Дністра.

Гідрологічний пост у м. Стрий, розташований на правій притоці Дністра - річці Стрий, є важливим елементом спостережної мережі. Річка Стрий - найбільша права притока на досліджуваній ділянці, що забезпечує близько 60% бокового

припливу води на ділянці між постами Розділ і Галич, суттєво впливаючи на гідрологічний режим Дністра в межах досліджуваної ділянки. Внаслідок цього під час проходження паводків, рівні води в Дністрі, нижче за течією, формуються не лише за рахунок води, що надійшла з верхньої частини басейну, але й за рахунок притоку з р. Стрий. Урахування стоку р. Стрий у розрахунках є обов'язковою умовою для коректного застосування методу відповідних рівнів, оскільки його неврахування призводить до систематичних похибок у прогнозуванні максимальних рівнів води на посту нижче за течією [6].

Гідрологічний пост у м. Галич розміщений на р. Дністер нижче за течією від гирла р. Стрий і відображає стік, сформований водозбором верхньої частини басейну Дністра та боковим припливом. У цьому створі фіксуються всі процеси, що відбуваються на досліджуваній ділянці, і спостерігаються вже змінені характеристики стоку. Порівняно з постом у м. Розділ, тут відбувається зменшення максимальних рівнів води, що пояснюється частковим розливом води на заплаві та її тимчасовим накопиченням. Одночасно збільшується тривалість проходження повені чи паводка, оскільки частина води затримується в заплаві та поступово повертається до русла. Також змінюється форма гідрографа під впливом морфометричних характеристик русла: піки стають більш згладженими, а підйом і спад рівнів відбуваються повільніше. Таке розташування робить пост м. Галич оптимальним для побудови прогностичних регресійних залежностей максимальних рівнів води та для аналізу процесів трансформації паводків у руслово-заплавній системі.

Відстань між постами Розділ і Галич у 75 км є достатньою для прояву основних змін характеристик стоку та виявлення закономірностей трансформації хвилі, включаючи затримку добігання піку, зниження максимальних витрат внаслідок акумуляції води на заплаві та зміну форми гідрографа. Водночас ця відстань не є довгою, що дозволяє зберегти тісний статистично значущий зв'язок між рівнями води на різних постах. Таке розташування постів дозволяє

прослідкувати причинно-наслідковий зв'язок між процесами формування та трансформації стоку: на посту у м. Розділ відбувається формування повені в умовах гірського рельєфу, нижче за течією додається боковий приплив з р. Стрий, що змінює як величину, так і часові характеристики хвилі повені, а на посту у м. Галич спостерігається вже сформований стік під впливом цих процесів, тобто стік з урахуванням як верхньої частини басейну, так і бокового припливу. Застосування методу відповідних рівнів на ділянці Розділ-Галич з урахуванням бокового припливу від р. Стрий дозволяє встановити кількісні залежності між рівнями води у верхньому та нижньому створах для різних фаз водності з урахуванням руслового, руслово-заплавного та повного заплавного режимів стоку, що відповідає гідравліко-морфологічним умовам трансформації паводкового стоку на досліджуваній ділянці [17].

2.2 Аналіз наявних рядів спостережень за рівнями та витратами води

Для виконання гідрологічного аналізу використано наявні ряди спостережень за рівнями води, а на окремих постах - також за витратами води. Основу дослідження становлять гідрологічні пости м. Розділ на р. Дністер, м. Стрий на р. Стрий та м. Галич на р. Дністер. Ці пости є репрезентативними для досліджуваної ділянки басейну Дністра, оскільки охоплюють як верхню частину водозбору, так і ділянку нижче впадіння правої притоки - р. Стрий. Архівні дані, доступні в Українському гідрометеорологічному центрі (УкрГМЦ) ДСНС України, мають різний ступінь деталізації та тривалості залежно від типу спостережень і періоду ведення [17].

За наявними матеріалами, пост м. Розділ має ряди спостережень за рівнями та витратами води за 1959-2023 рр., що забезпечує достатню базу для аналізу стоку в

замикаючому створі гірської частини басейну. Пост м. Стрий - лише ряд спостережень за рівнями за 1985-2023 рр. (середньодобові рівні), хоча спостереження в період водопілля проводять з 1930 р. Пост м. Галич - ряди спостережень за рівнями та витратами води за 1946-2023 рр. (середньодобові), із даними за період водопілля з 1894 р. та теплими паводками і середніми витратами води з 1895 р. Тривалість і довжина рядів спостережень на різних постах є неоднаковими, що необхідно враховувати під час подальшої обробки та використання даних. Найбільш тривалий є ряд поста м. Галич, який створює найкращі умови для аналізу багаторічної мінливості гідрологічного режиму. Пост м. Розділ також має достатньо тривалий ряд, з даними стоку верхньої частини басейну. Дані на посту м. Стрий характеризуються коротшим рядом середньодобових спостережень [17].

Варто зауважити, що гідрологічний пост р. Стрий - м. Стрий функціонує виключно як рівневий пост і на ньому не проводять вимірювання витрат води. Відсутність паралельних спостережень за рівнями та витратами води створює методичні обмеження при розробці прогностичних моделей. У практичному аспекті це означає, що для оцінки бічного припливу доводиться оперувати рівневою інформацією, що може знижувати точність прогнозування, особливо в періоди інтенсивного максимального стоку.

Для переходу від рівневих характеристик до витратних використано метод гідрологічної аналогії з постом-аналогом р. Стрий - с. Верхнє Синьовидне, розташований за 33 км вище за течією від м. Стрий. Відновлення витрат води здійснено за формулою:

$$Q_{\text{Стрий}} = Q_{\text{ВерхСиньов}} \times (F_{\text{Стрий}} / F_{\text{ВерхСиньов}})^{0.75} \quad (2.1)$$

де $F_{\text{Стрий}} = 2720 \text{ км}^2$,

$F_{\text{ВерхСиньов}} = 2400 \text{ км}^2$.

Показник ступеня $n = 0.75$ обґрунтовано передгірськими умовами формування стоку на проміжній ділянці водозбору ($F_{\text{пром}} = 320 \text{ км}^2$, 11.8%), що характеризується зменшенням швидкості течії до 1.5-2.0 м/с, значною звивистістю русла та наявністю заплави, що зумовлює зростання втрат стоку при збільшенні площі водозбору. Використання показника $n < 1.0$ відображає фізично обґрунтований ефект зменшення модуля стоку внаслідок збільшення часу добігання та трансформації паводкової хвилі.

Крім того, під час використання наявних рядів необхідно враховувати можливу наявність пропусків у спостереженнях. Такі пропуски пов'язані з різними причинами: перервами у роботі постів, змінами у методиці спостережень, організаційними труднощами, а також втратою або неповною збереженістю матеріалів за окремі періоди. Це питання особливо актуальне для післявоєнного часу, коли частина даних могла бути відсутня, зафіксована не повністю або не переведена в цифровий формат. Наявність пропусків у рядах спостережень зменшує їхню суцільність, ускладнює статистичну обробку і може впливати на надійність висновків щодо багаторічних змін водного режиму.

Важливими є не лише тривалість рядів, а й їхня синхронність, однорідність та ступінь заповненості. Якщо ряди за різними постами охоплюють неоднакові періоди, це обмежує можливість прямого зіставлення рівнів і витрат води. У такому разі доцільно використовувати лише спільний період спостережень (1985-2023 рр.), що забезпечує коректність порівняння та підвищує достовірність регресійних і кореляційних залежностей.

Для побудови прогнозних рівнянь особливо важливо, щоб обрані дані були узгодженими за часовим інтервалом і відображали одні й ті самі гідрологічні умови.

Наявність як рівневих, так і витратних рядів на постах м. Розділ і м. Галич підвищує цінність спостережної мережі, оскільки дає змогу оцінювати не тільки зміну рівнів води, але й водність річки. Наявність цих двох типів даних є важливим для аналізу фаз підйому і спаду паводків, визначення максимальних характеристик

стоку та дослідження трансформації паводкових хвиль у руслово-заплавній системі. Саме тому ці пости можуть бути використані як основа для побудови прогностичних залежностей на досліджуваній ділянці.

2.3 Порівняльний аналіз гідрографів стоку та оцінка фазового зміщення стоку на річках Дністер і Стрий

На основі аналізу суміщених гідрографів стоку на річках Дністер (пости с. Розділ, м. Галич) і Стрий (пост м. Стрий) за репрезентативні роки різної водності (1998, 2008, 2012, 2015, 2020) встановлено характерні закономірності внутрішньорічного розподілу стоку, фазового зміщення паводкових максимумів між створами та процесів трансформації паводкових хвиль на міжпостовій ділянці Розділ-Галич. Вибір даних років для аналізу зумовлений необхідністю охоплення всього діапазону гідрологічних умов: 1998, 2008 та 2020 роки характеризуються високою водністю з екстремальними паводками, тоді як 2012 та 2015 роки є маловодними з пониженим стоком та відсутністю значних паводкових максимумів.

Форма гідрографа на посту Галич у 1998 році (рис. 2.1) демонструє характерне розтягування паводкової хвилі у часі, згладжування піків та збільшення тривалості фази високої водності порівняно з постом Розділ, що пояснюється процесами руслово-заплавного регулювання стоку на міжпостовій ділянці. Якщо на посту Розділ підйом рівнів до максимуму відбувається протягом 2-3 діб з інтенсивністю 100-150 см/добу, то на посту Галич ця ж фаза підйому займає 3-4 доби з інтенсивністю 80-120 см/добу, що свідчить про акумуляцію частини паводкового стоку на заплавних масивах. Межений стік у 1998 році є помірним: на посту Розділ базові рівні становлять 130-160 см, на р. Стрий - 230-260 см, на

посту Галич - 140-170 см, причому найнижчі рівні спостерігаються у вересні-жовтні перед осінніми паводками.

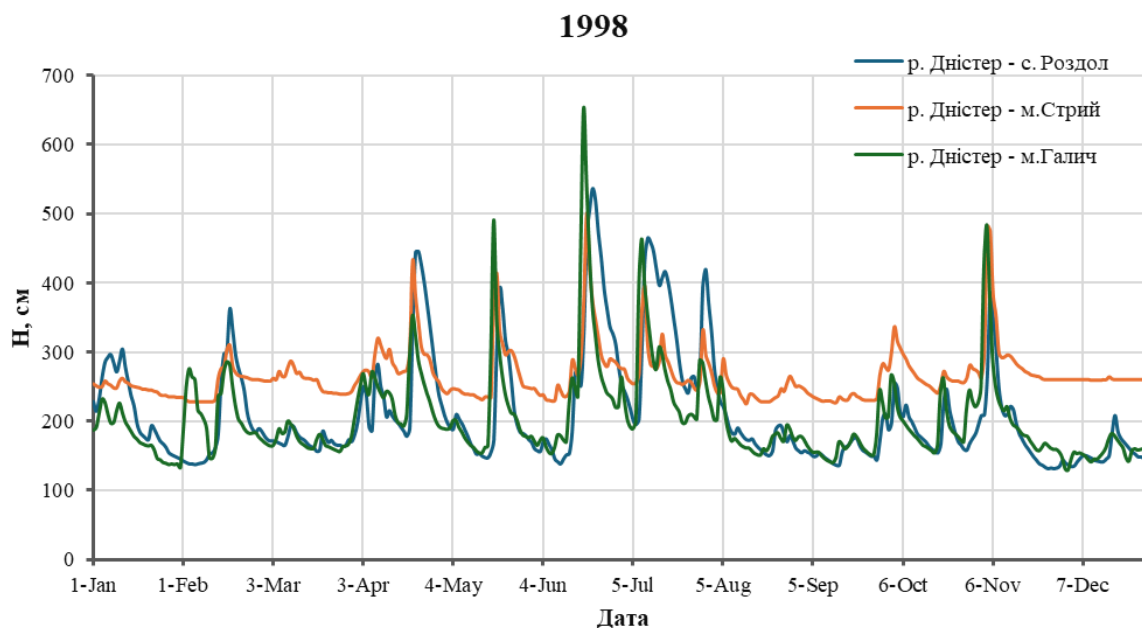


Рис. 2.1. Гідрограф рівнів води за 1998 р.

Гідрологічний режим 2008 року (рис. 2.2) характеризується найекстремальнішими паводковими умовами за весь досліджуваний період. Абсолютний максимум рівня води зафіксовано на посту Галич - 720 см у липні, що відповідає катастрофічному паводку з повним затопленням заплави та значними збитками. На посту Розділ максимальний рівень становив 350 см, тоді як на р. Стрий досягнуто найвищого за весь період показника - 580 см. Це підтверджує ключову роль басейну Стрия у формуванні екстремального паводка 2008 року.

Особливістю водного режиму було зосередження основного паводкового максимуму в літній період на тлі відносно низьких рівнів води навесні та восени. Фазове зміщення між постами Розділ і Галич становило близько 12 годин, однак вирішальним чинником формування піку в Галичі стало майже одночасне проходження паводкових хвиль Дністра і Стрия з різницею лише 6-8 годин.

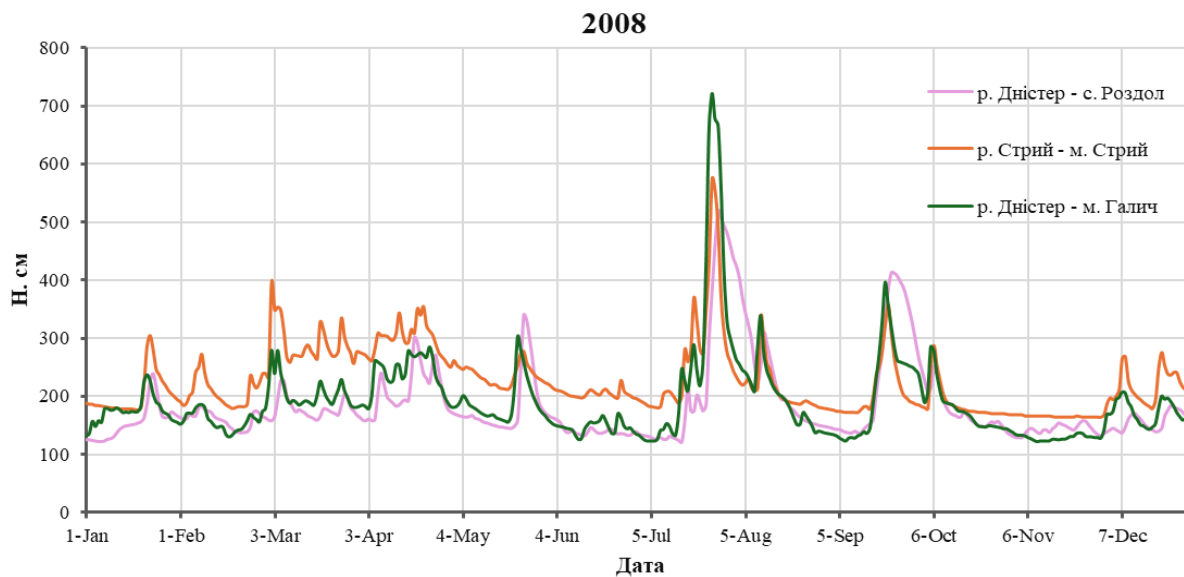


Рис. 2.2. Гідрограф рівнів води за 2008 р.

Розвиток паводка відзначався високою інтенсивністю підйому рівнів: на посту Розділ вона досягала близько 120 см/добу, що вказує на зливовий характер стоку внаслідок інтенсивних опадів у гірській частині басейну. На р. Стрий підйом був ще стрімкішим - 150-180 см/добу, що зумовило формування піку, який значно перевищив рівень Дністра в Роздолі. У створі Галича відбулося майже повне накладання паводкових хвиль, у результаті чого сумарний максимум перевищив рівень у Роздолі на 370 см (понад 105%).

Тривалість формування паводкової хвилі в Галичі становила 5-7 діб від початку підйому до максимуму, тоді як спад рівнів був повільнішим і тривав 10-12 діб. Це свідчить про значну акумуляцію води на заплаві з її поступовим поверненням до русла. Окрім основного липневого піку, спостерігалися менш інтенсивні паводки у травні та серпні, які не спричинили екстремальних рівнів через несинхроність хвиль і меншу водність.

Меженний стік у 2008 році характеризувався помірними рівнями: на посту Розділ - 110-150 см, на р. Стрий - 160-220 см, у Галичі - 100-130 см. Найнижчі значення фіксувалися у лютому-березні та у вересні-жовтні. Водночас навіть у

меженний період рівні на Стрию залишалися відносно високими, що вказує на значну роль підземного живлення та високу водоакумуючу здатність його басейну.

Гідрологічний режим 2012 року (рис. 2.3) характеризується пониженою водністю протягом усього року з відсутністю виражених паводкових максимумів та загалом помірним внутрішньорічним розподілом стоку. Максимальні рівні є суттєво нижчими порівняно з багатоводними роками: на посту Розділ максимум становить 300 см у березні, на р. Стрий найвищий рівень фіксується на позначці 350 см також у весняний період, на посту Галич максимум не перевищує 280 см. Характерною особливістю водного режиму цього року є наявність багатьох невеликих паводкових хвиль протягом року з амплітудою коливань 50-100 см, що свідчить про відсутність масштабних злив. Фазове зміщення між постами є менш вираженим через невелику інтенсивність паводків та повільніший розвиток паводків, проте в середньому становить 12-18 годин, що перевищує значення для масштабних паводків і пояснюється переважанням руслово-заплавного режиму стоку з самого початку підйому рівнів.

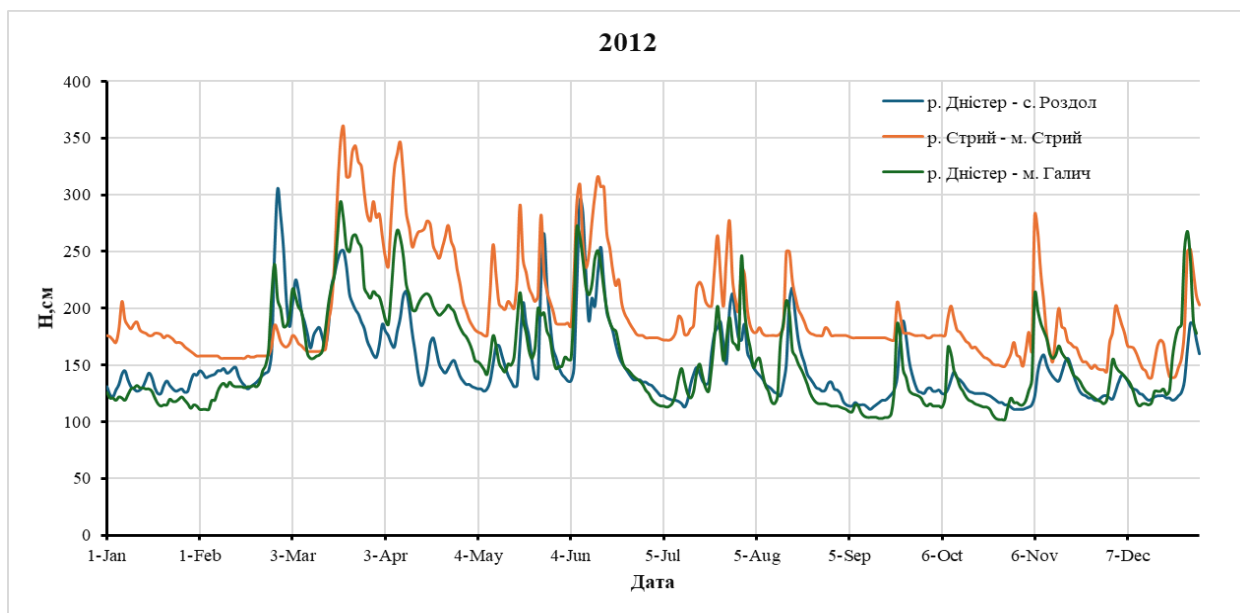


Рис. 2.3. Гідрограф рівнів води за 2012 р.

Меженні рівні у 2012 році є одні з найнижчих: на посту Розділ мінімуми становлять 100-120 см у літній та осінній періоди, на р. Стрий меженні рівні знижуються до 150-180 см, на посту Галич мінімальні рівні фіксуються на позначках 100-110 см. Тривалість меженних періодів у 2012 році є значно більшою порівняно з 1998 та 2008 роками і становить сумарно близько 7-8 місяців, тоді як в інші роки межень займає лише 3-4 місяці.

Гідрологічний режим 2015 року (рис. 2.4) представляє проміжний тип водності з окремими помірними паводками на фоні загалом зниженої водності басейну. Максимальні рівні становлять: на посту Розділ - 250 см у червні, на р. Стрий - 375 см також у червні, на посту Галич - 370 см з незначним часовим зміщенням відносно максимуму на р. Стрий. Характерною особливістю водного режиму цього року є наявність двох основних паводкових періодів: весняно-літнього у травні-червні та осіннього у жовтні-листопаді, проте обидва характеризуються помірною інтенсивністю без екстремальних максимумів. Фазове зміщення між постами Розділ і Галич становить 10-14 годин, що близько до середніх значень для паводків різної інтенсивності. Важливим спостереженням для 2015 року є те, що максимум на р. Стрий (375 см) суттєво перевищує максимум на Дністрі у Розділі (250 см) на 125 см або на 50%, що свідчить про те, що червневий паводок формувався переважно в басейні притоки, тоді як у верхній частині басейну Дністра паводкова активність була значно меншою. Внаслідок чого, максимум на посту Галич (370 см) практично співпадає з максимумом на р. Стрий і лише на 20 см нижчий, що підтверджує домінуючу роль бокового припливу у формуванні паводкового стоку на досліджуваній ділянці в умовах нерівномірного просторового розподілу інтенсивності опадів. Перевищення максимуму на посту Галич відносно максимуму на посту Розділ становить 120 см або 48%, що цілком зумовлено припливом від р. Стрий. Крім червневого паводка, у 2015 році спостерігався осінній паводок у жовтні з максимальними рівнями близько 340 см на р. Стрий та 330 см на посту Галич, причому цей паводок характеризувався більш синхронним

проходженням на обох річках з різницею лише 4-6 годин. Меженні рівні у 2015 році є помірними: на посту Розділ базові рівні становлять 100-130 см, на р. Стрий - 150-180 см, на посту Галич - 80-100 см, причому найнижчі рівні спостерігалися у серпні-вересні в період між літнім та осіннім паводками.

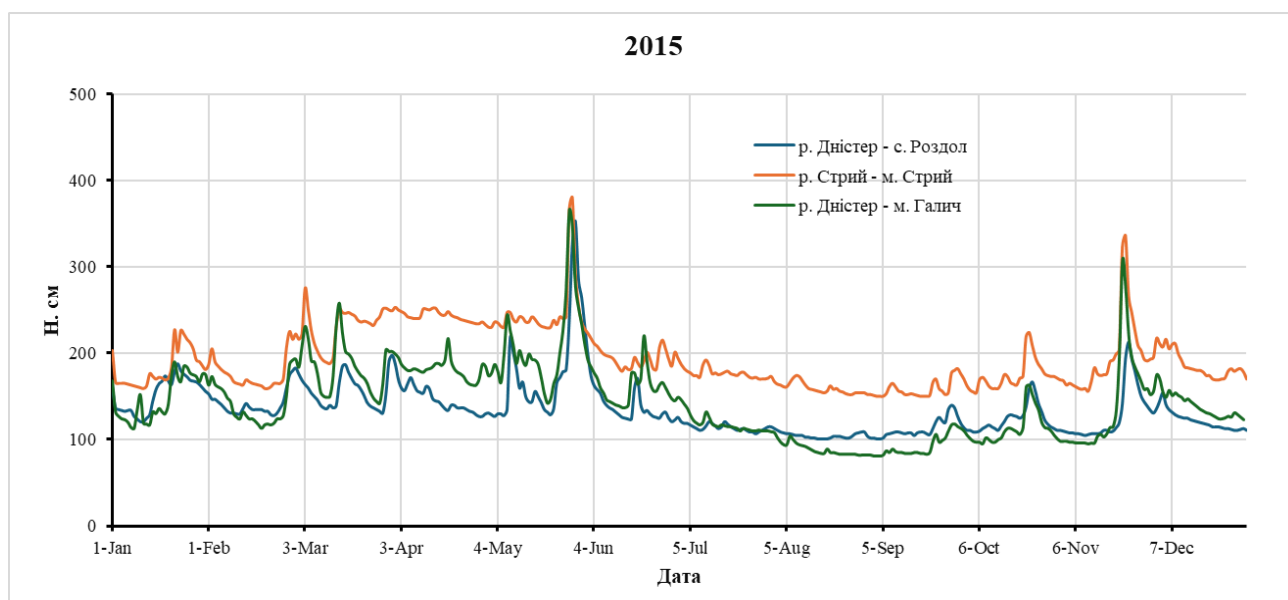


Рис. 2.4. Гідрограф рівні води за 2015 р.

Гідрологічний режим 2020 року (рис. 2.5) характеризується найбільш вираженим одиночним паводковим піком серед усіх досліджуваних років з екстремально інтенсивним розвитком паводкових процесів. Максимальний рівень на посту Галич досягає 700 см у червні, на посту Розділ максимум становить 381 см, на р. Стрий фіксується рівень 420 см у той самий період. Характерною особливістю є гостра форма паводкового піку з інтенсивним підйомом рівнів, досягненням максимуму та відносно швидким спадом, що свідчить про зливовий характер стоку внаслідок короткочасних, але інтенсивних атмосферних опадів. Інтенсивність підйому рівнів на посту Розділ становила близько 90-100 см/добу, на р. Стрий - 130-150 см/добу, на посту Галич - 180-200 см/добу, що є одним з найвищих показників

за весь період спостережень. Фазове зміщення між постами Розділ і Галич становить близько 8-10 годин, що є найкоротшим серед усіх аналізованих років і пояснюється високими швидкостями руслового стоку під час проходження інтенсивного паводка з переважанням вільного руслового режиму течії без значного затоплення заплави на початковій стадії.

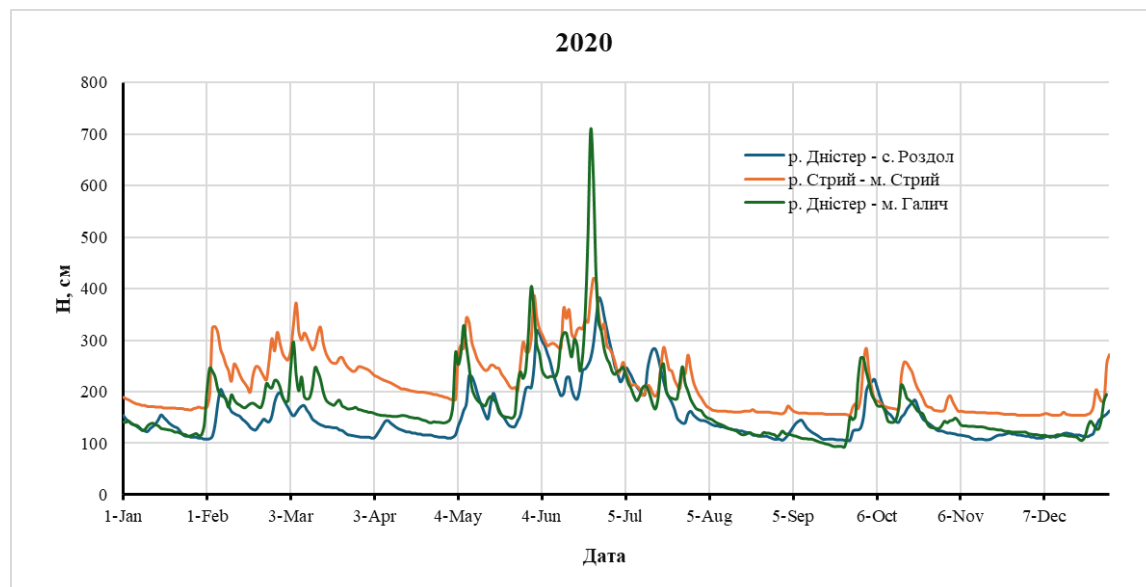


Рис. 2.5. Гідрограф рівнів води за 2020 р.

Пік на р. Стрий проходить з незначною затримкою лише 4-6 годин відносно піку на Дністрі у Розділі, що підтверджує роль синхронності проходження максимумів для формування найвищих рівнів на посту Галич через накладання паводкових хвиль. Тривалість проходження паводкової хвилі на посту Галич від початку підйому до досягнення максимуму становила близько 3-4 доби, тоді як спад рівнів тривав близько 6-8 діб, що значно коротше порівняно з паводком 2008 року і свідчить про менший ступінь затоплення заплави та швидше повернення акумульованої води до русла. Меженні періоди у 2020 році характеризуються найнижчими рівнями серед 1998 та 2008 років: на посту Розділ мінімальні рівні становлять 80-100 см у літній та осінній періоди, на р. Стрий меженні рівні

знижуються до 150-170 см, на посту Галич мінімуми фіксуються на позначках 80-100 см, що свідчить про зміну водного режиму з екстремально високих паводків до межені.

Порівняльний аналіз п'яти років спостережень дозволяє встановити загальні закономірності фазового зміщення паводкових максимумів та їх залежність від інтенсивності паводкових процесів. Час добігання піку паводка від поста Розділ до поста Галич варіює в діапазоні від 8 до 18 годин залежно від гідравлічних характеристик потоку та режиму затоплення заплави.

Фазове зміщення між максимумами на Дністрі у Розділі та на р. Стрий демонструє значну варіативність від практично синхронного проходження з різницею 2-4 години, що спостерігалось під час червневого паводка 2020 року, до значної різночасності з різницею 12-18 годин, що характерно для окремих невеликих паводків 2012 року. Найбільш критичні ситуації з екстремально високими рівнями на посту Галич виникають саме при майже одночасному або близькому в часі (4-8 годин) проходженні піків на обох річках, що чітко простежується у 1998, 2008 та 2020 роках. У цих випадках паводкові хвилі досягають створу Галич практично одночасно або з незначним зміщенням, що призводить до їх накладання та сумарного максимуму, який значно перевищує максимуми на верхніх постах. Навпаки, при значному часовому розриві між проходженням піків на Дністрі та Стрию, що спостерігається в окремих паводках 2012 та 2015 років, на посту Галич формується гідрограф з двома окремими піками меншої висоти, розділеними фазою відносно стабільних високих рівнів, або спостерігається подовжена фаза підвищеної водності тривалістю 5-7 діб без екстремального максимуму. Ці закономірності є важливими для побудови прогностичних залежностей методом відповідних рівнів з урахуванням бокового припливу та розподілом за режимами затоплення заплави.

РОЗДІЛ 3

ТЕОРЕТИКО-МЕТОДИЧНІ ОСНОВИ ПРОГНОЗУВАННЯ СТОКУ РІЧОК

3.1 Огляд сучасних методик гідрологічного прогнозування в Україні та за кордоном (математичне моделювання, штучний інтелект, балансові методи)

Сучасне гідрологічне прогнозування є важливою складовою управління водними ресурсами та попередження небезпечних гідрологічних явищ, таких як паводки, повені та посухи. У світовій науковій і практичній діяльності воно розвивається на основі інтегрованого підходу, який поєднує математичне моделювання, дані дистанційного зондування Землі, геоінформаційні системи, автоматизовані гідрометеорологічні спостереження та методи штучного інтелекту. Комплексний підхід дає можливість враховувати значну кількість чинників формування стоку, зокрема атмосферні опади, температуру повітря, запаси снігу, вологість ґрунту, особливості рельєфу та структуру руслової мережі. Це сприяє підвищенню точності прогнозування рівнів води, витрат стоку й розвитку паводкових процесів. Водночас результативність таких систем значною мірою визначається наявністю якісних, безперервних і просторово репрезентативних даних.

Математичне моделювання залишається основою більшості сучасних прогнозів, оскільки дозволяє фізично обґрунтовано описувати процеси формування та трансформації стоку за допомогою систем рівнянь, що враховують характеристики басейну, гідравлічні умови течії та метеорологічні фактори. Такі моделі дають змогу детально відтворювати проходження паводкових хвиль і прогнозувати зони затоплення, однак їх застосування потребує великого обсягу достовірних вхідних даних і складного калібрування параметрів. За відсутності достатньої інформації точність результатів суттєво знижується, що є особливо актуальним для багатьох басейнів в Україні [18].

Балансові методи ґрунтуються на оцінці співвідношення між додатною та витратною частинами водного балансу і дозволяють визначати загальні характеристики водного режиму, обсяги водних ресурсів і вплив господарської діяльності. Вони відзначаються відносною простотою, наочністю та можливістю застосування навіть за обмеженої інформації, проте не забезпечують достатньої деталізації змін рівнів води у часі, що обмежує їх використання для оперативного прогнозування паводків [1, 19].

Методи штучного інтелекту та машинного навчання належать до найбільш перспективних і динамічних напрямів сучасної гідрології. Їх основою є виявлення статистичних і нелінійних взаємозв'язків у великих обсягах гідрометеорологічної інформації, що дає змогу оперативно формувати прогнози навіть для складних природних систем. Перевагами таких підходів є висока швидкість обробки даних, адаптивність і здатність інтегрувати інформацію з різних джерел, зокрема супутникових спостережень. Водночас ефективність таких моделей значною мірою залежить від обсягу та якості навчальних вибірок, а результати часто складно інтерпретувати з фізичної точки зору.

Розвиток гідрологічного прогнозування в Україні відбувався під впливом як природних умов, так і особливостей організації спостережень. Обмежена густота та нерівномірне розміщення гідрометеорологічної мережі у поєднанні з високою просторово-часовою мінливістю гідрологічних процесів зумовили переважання методів, що спираються на аналіз фактичних спостережень. Це особливо характерно для гірських басейнів, зокрема Карпатського регіону, де інтенсивні опади, складний рельєф і швидке формування стоку спричиняють різкі коливання рівнів води та ускладнюють застосування складних математичних моделей через нестачу оперативних даних [8, 9].

У таких умовах в Україні набули широкого поширення статистико-ймовірнісні методи та регіональні узагальнення, які дозволяють отримувати прийнятні результати за обмеженої інформації. Аналіз сучасних підходів свідчить,

що зі зменшенням обсягу та якості вихідних даних ефективність складних моделей знижується, тоді як значення методів, орієнтованих на безпосереднє використання спостережень, зростає. Це зумовлює необхідність застосування підходів, які дозволяють встановлювати стійкі залежності між характеристиками водного режиму без залучення великої кількості додаткових параметрів [18].

У сучасних умовах як у світовій, так і в українській практиці простежується тенденція до поєднання різних методів у межах гібридних систем прогнозування. Найбільш ефективним є підхід, за якого математичне моделювання забезпечує фізичну обґрунтованість прогнозів і детальне відтворення процесів, балансові методи використовуються для оцінки водних ресурсів і довгострокових змін, а методи штучного інтелекту підсилюють прогнозування за рахунок обробки великих масивів даних. Така інтеграція дозволяє підвищити точність і надійність гідрологічних прогнозів у різних природних та інформаційних умовах.

3.2 Обґрунтування вибору методу відповідних витрат для умов басейну Дністра (переваги та обмеження)

Метод відповідних витрат (відповідних рівнів) є одним із базових і найбільш усталених підходів короткострокового гідрологічного прогнозування. Він ґрунтується на встановленні емпіричного зв'язку між значеннями витрат чи рівнів у верхньому та нижньому створах з урахуванням часу добігання τ паводкової хвилі. Для басейну Дністра цей метод можна вважати науково обґрунтованим і методично коректним саме тому, що він поєднує простоту реалізації, фізичну наочність і чіткі критерії оцінки якості, а також відповідає реально існуючим умовам мережі гідрологічних постів та характеру формування стоку [13, 14].

Причиною вибору методу відповідних рівнів для басейну Дністра є відповідність його природним умовам формування паводкових та водопільних хвиль. Відповідні рівні (витрати) відображають загальний вплив всіх факторів, що формують стік, без необхідності детальної опису кожного з них, як у випадку з розподіленими гідрологічними моделями.

З методичної точки зору обґрунтування вибору методу відповідних рівнів для басейну Дністра базується на наявності:

- довгострокових, якісних рядів щоденних витрат води у мережі гідрологічних постів, розташованих уздовж Дністра та його притоків;
- чітко виражених максимумів паводкових хвиль на гідрографах, що дозволяє однозначно визначити відповідні піки між створами;
- стійкого часу добігання хвилі на відносно однорідних із гідравлічного погляду відрізках річкової мережі.

Це дає змогу побудувати лінійні зв'язки :

$$H_{\text{нижній}}(t+\tau) = f(H_{\text{верхній}}(t)) + H_{\text{нижній}}(t+\tau) = f(H_{\text{верхній}}(t)) , \quad (3.1)$$

що фактично представляють закономірності переміщення й трансформації паводкової хвилі в часі та просторі, що відповідає фізичній моделі рухомої хвилі.

Для басейну Дністра метод відповідних рівнів має низку суттєвих переваг, а саме характеризується простотою реалізації, не потребує складного програмного забезпечення, великої кількості параметрів або спеціалізованих математичних пакетів. Базова схема методу - побудова графіків відповідних витрат, визначення часу добігання τ , розрахунок регресійної залежності та оцінка допустимої похибки - успішно реалізується засобами Excel та іншого стандартного програмного забезпечення, що відповідає потребам оперативних підрозділів гідрологічного прогнозування, де важливою є швидкість підготовки прогнозу [13, 14].

Метод базується на реальних спостережуваних змінах режиму стоку між гідрологічними створами, а не на параметрах розподіленої математичної моделі, що забезпечує фізичну обґрунтованість та прозорість прогнозної процедури. Це дозволяє чітко простежити, яким чином формується прогноз і які спостережні дані визначають його точність, що вважається важливою перевагою в оперативній практиці гідрологічного прогнозування.

Додатковою перевагою є наявність чітко формалізованих критеріїв оцінки якості прогнозу. Зокрема, використовується допустима похибка $\delta_{\text{доп}} = \pm 0.674 \cdot \sigma_{\Delta}$ або $\pm 20\%$ від прогнозованої величини для витрат води, забезпеченість допустимої похибки $P\%$ та показник середньої похибки S відносно стандартного відхилення. Це дозволяє кількісно оцінювати ефективність методу та порівнювати її з альтернативними підходами [13, 14].

Водночас цей метод характеризується певними обмеженнями, які слід враховувати під час його використання. Насамперед, його ефективність залежить від стабільності гідрологічного режиму між створами. Зміни умов формування стоку, пов'язані з роботою гідротехнічних споруд, антропогенним впливом або змінами клімату, можуть порушувати встановлені залежності та знижувати точність прогнозу.

Крім того, метод має обмежену чутливість до різких змін гідрологічних умов, оскільки ґрунтується на історичних зв'язках між рівнями чи витратами. Це ускладнює його застосування в умовах швидкої трансформації режиму стоку. Важливим фактором є також залежність від якості та тривалості рядів спостережень: при недостатній довжині або фрагментованості даних надійність отриманих залежностей може знижуватися.

Обмеження проявляються і на гірських та сильно приточних ділянках верхнього Дністра, де значна просторово-часова неоднорідність опадів і складні руслові умови призводять до інтенсивної трансформації паводкових хвиль.

3.3 Сутність методу відповідних рівнів (витрат) води та рівняння водного балансу

Метод відповідних рівнів (або відповідних витрат) є одним із базових підходів короткострокового гідрологічного прогнозування. Його сутність полягає в тому, що відповідними вважають такі рівні води (або витрати води), які відповідають одному і тому ж етапі гідрологічного явища (наприклад, піку паводку, межені, швидкому підйому рівня) у верхньому та нижньому створах, але в різні моменти часу, розділені часом добігання паводкової хвилі τ .

Фізична основа методу - це закономірність переміщення паводкової хвилі вздовж русла річки: під час паводка рівень води визначеним чином переміщається від верхнього поста до нижнього, зберігаючи відносно постійну форму хвилі. Відповідні піки, мінімуми, а іноді й проміжні точки на гідрографах двох або більше гідрологічних постів, можна зіставити в часі, встановивши для них одну і ту саму фазу.

Математично метод відповідних рівнів формулюється через залежність між витратами (або рівнями) у верхньому та нижньому створах з урахуванням часового зсуву:

$$Q_{\text{низ}(t+\tau)} = f(Q_{\text{верх}(t)} + Q_{\text{прит}(t)}) \quad (3.2)$$

або для рівнів:

$$H_{\text{низ}(t+\tau)} = f(H_{\text{верх}(t)} + H_{\text{прит}(t)}), \quad (3.3)$$

де $Q_{\text{верх}(t)}$ - витрата води у верхньому створі в момент часу t ;

$Q_{\text{прит}(t)}$ - витрата води на притоці в момент часу t ;

$Q_{\text{низ}(t+\tau)$ - відповідна (прогнозована) витрата у нижньому створі через час τ після моменту t ;

$H_{\text{верх}(t)}$, $H_{\text{прит}(t)}$, $H_{\text{низ}(t+\tau)}$ - аналогічно для рівнів води;

τ - час добігання хвилі, який встановлюють за допомогою аналізу хронології пікових значень на гідрографах обох постів за ряд років.

Функція f зазвичай визначається як лінійна регресія типу:

$$H_{\text{низ}(t+\tau)} = a \cdot (H_{\text{верх}(t)} + H_{\text{прит}(t)}) + b \quad (3.4)$$

або нелінійна залежність, яка описує зв'язок між створами на основі статистичного аналізу ряду відповідних значень. Така залежність використовується як рівняння методу для прогнозу.

Прогноз за відповідними рівнями (витратами) будується таким чином:

- за значенням у верхньому створі на певний момент часу (t);
- обчислюється очікуване значення у нижньому створі на момент $H_{\text{низ}(t+\tau)}$;
- отримана величина інтерпретується як прогноз рівня чи витрати на період завчасності τ , тобто на кілька годин або доби вперед - залежно від часу добігання.

Рівняння водного балансу є фундаментальним інструментом гідрологічного аналізу, оскільки він кількісно описує рух і перетворення води в певному об'єкті - це може бути річковий басейн, водозбір, водойма, агрегат система водних об'єктів тощо. Водний баланс відображає зв'язок між приходом води, її втратами і зміною запасів у водному об'єкті за певний інтервал часу [1, 18].

У загальному вигляді для річкового басейну або водозбору рівняння водного балансу можна записати так:

$$P = E + R + \Delta W, \quad (3.5)$$

де (P) - шар атмосферних опадів;

(E) - сумарне випаровування;

(R) - стік;

(ΔW) - зміна вологозапасів водозбору за розрахунковий інтервал (включає зміну снігозапасів, вологості ґрунту, рівня ґрунтових вод, поверхневої акумуляції).

Фізична сутність рівняння полягає в балансовому співвідношенні між надходженням вологи на водозбір, її витратою на випаровування, стоком та акумуляцією в різних компонентах гідрологічного циклу. За відомих значень окремих елементів балансу можливе визначення невідомої складової: зокрема, за заданими P і E розраховується очікуваний стік R, або за P і R оцінюються втрати на випаровування.

Для багаторічних та довгострокових розрахункових періодів справедливе припущення $\Delta W \approx 0$, оскільки на тривалих часових інтервалах середні вологозапаси басейну залишаються статистично стабільними. За цієї умови рівняння набуває вигляду $P \approx E + R$, що означає рівність норми річного стоку різниці між нормою опадів і нормою сумарного випаровування. Це співвідношення становить основу розрахунків водних ресурсів басейнів та оцінки їх стокоформуєної здатності.

Рівняння водного балансу застосовується для кількісної оцінки водних ресурсів басейну та водогосподарського потенціалу території, генетичного аналізу сезонного розподілу стоку з виділенням весняного водопілля, літньо-осінньої та зимової межені, довгострокового прогнозування характеристик стоку та екстремальних гідрологічних явищ, а також діагностики впливу кліматичних флуктуацій і антропогенної трансформації водозборів на формування водного режиму.

Метод відповідних рівнів води та рівняння водного балансу функціонують на різних просторово-часових масштабах гідрологічного аналізу, проте становлять взаємодоповнюючі компоненти комплексної методології дослідження водного режиму. Метод відповідних рівнів води є емпірико-статистичним інструментом короткострокового прогнозування, який описує кінематику руху та гідравлічну

трансформацію паводкової хвилі між гідрометричними створами на часових інтервалах від кількох годин до однієї-двох діб. Рівняння водного балансу являє собою фізико-математичне співвідношення, яке визначає кількісні закономірності перерозподілу вологи між опадами, випаровуванням і стоком на часових масштабах від доби до сезону, року або багаторічного періоду [13, 14].

Результати короткострокових прогнозів максимальних витрат води окремих паводків, отримані методом відповідних рівнів, можуть інтегруватися як вхідна інформація до балансових моделей формування стоку річкового басейну, тоді як отримані з балансових розрахунків норми та статистичні характеристики стоку слугують критеріями верифікації та оцінки гідрологічної репрезентативності прогнозних рівнів.

3.4 Закономірності трансформації та накладання стоку у місці злиття річок

Закономірності трансформації та накладання стоку у місці злиття річок становлять один із найбільш складних аспектів гідрології річкових систем, оскільки в зоні впадіння відбувається взаємодія водних мас з різними гідравлічними характеристиками, що визначає специфічні умови водного режиму та паводкову небезпеку нижче за течією.

Процес трансформації паводкової хвилі на ділянці вище від злиття головної річки з притокою визначається морфометричними характеристиками русла, гідравлічними умовами течії та режимом затоплення заплави. Під час руху паводкової хвилі вниз за течією відбувається поступова зміна її форми внаслідок акумуляції частини паводкового стоку на заплаvnих масивах, збільшення тривалості проходження паводка, зменшення інтенсивності підйому та спаду рівнів

води, а також можливого зниження максимальних витрат внаслідок розподілу стоку між руслом та заплавою. Інтенсивність трансформації безпосередньо залежить від співвідношення пропускної здатності русла та величини паводкового стоку: при високих паводках, коли витрати води значно перевищують руслову пропускну здатність, відбувається масштабне затоплення заплави з відповідним сповільненням швидкостей течії та збільшенням часу добігання паводкової хвилі, тоді як при паводках середньої та малої інтенсивності трансформація є менш вираженою.

У зоні злиття головної річки та притоки формується складна гідравлічна взаємодія потоків, яка визначається співвідношенням їх водності, різницею рівнів води, кутом впадіння притоки та морфологією русла. Особливе значення має синхронність проходження паводкових максимумів. При одночасному або близькому у часі надходженні піків формується ефект накладання паводкових хвиль, що призводить до значного зростання сумарного максимуму нижче від злиття. Це явище обумовлене, зокрема, підпірним ефектом: підвищені рівні на головній річці уповільнюють стік з притоки, спричиняючи тимчасову акумуляцію води у пригирловій зоні та її подальше інтенсивне надходження після проходження піку [6].

Фазове зміщення паводкових максимумів є одним із факторів формування гідрографа нижче від злиття. За синхронного або майже синхронного проходження піків (різниця 2-8 годин) формуються найвищі рівні води. При помірному зміщенні (10-20 годин) спостерігається подовжена фаза високих рівнів із згладженим максимумом, тоді як при значному зміщенні (понад 24 години) формується два окремих піки, що знижує паводкову небезпеку.

Важливу роль відіграє також співвідношення водності головної річки та притоки. У більшості випадків домінує головна річка, однак за умов інтенсивних опадів у басейні притоки її внесок може бути визначальним у формуванні

максимуму нижче від злиття. Це особливо характерно для гірських територій із високою просторовою неоднорідністю опадів.

Морфологія русла та заплави в зоні злиття суттєво впливає на трансформацію паводкових хвиль. Розширення русла сприяє зниженню швидкостей течії та згладжуванню піків, тоді як звуження викликає підпір і підвищення рівнів води. Наявність розвиненої заплави забезпечує додаткову акумуляцію стоку, що зменшує максимальні витрати, але збільшує тривалість паводка.

Для басейну Дністра, зокрема на ділянці з впадінням р. Стрий, ці закономірності проявляються особливо виразно. Річка Стрий формує значну частину бокового припливу, і при синхронному проходженні паводкових максимумів на Дністрі та Стрию на посту Галич спостерігаються найвищі рівні води. За наявності часової асинхронності піків формується або подовжена фаза високої водності, або два окремі максимуми меншої величини.

3.5 Особливості визначення часу добігання від різних вхідних створів

Визначення часу добігання паводкової хвилі від різних вхідних створів до замикаючого поста є одним з ключових етапів побудови прогностичних залежностей методом відповідних рівнів, оскільки правильне встановлення часових зміщень між спостереженнями на різних постах, що впливає на точність та завчасність гідрологічного прогнозу.

Час добігання паводкової хвилі визначається як часовий інтервал між проходженням характерної точки гідрографа на верхньому посту та настанням відповідної точки на нижньому посту. Найбільш поширеним та практично значущим для прогнозування є визначення часу добігання паводкового максимуму,

оскільки саме максимальні рівні води становлять найбільшу небезпеку для прибережних територій та об'єктів інфраструктури.

Методи визначення часу добігання можуть бути розділені на емпіричні, що базуються на аналізі фактичних гідрографів спостережених паводків, та розрахункові, що ґрунтуються на гідравлічних характеристиках русла та витратах води. Емпіричний підхід є найбільш надійним для практичного застосування, оскільки він безпосередньо відображає реальні умови проходження паводкових хвиль на конкретній ділянці річки з урахуванням усіх морфометричних особливостей русла, заплави та гідравлічних умов течії. Для емпіричного визначення часу добігання необхідно проаналізувати синхронні гідрографи на верхньому та нижньому постах для репрезентативної вибірки паводків різної інтенсивності та сезонної приналежності [13, 14].

Процедура емпіричного визначення часу добігання полягає в наступному. Для кожного окремого паводка на гідрографі верхнього поста визначається момент проходження максимального рівня води з точністю до години або доби залежно від дискретності спостережень. Потім на гідрографі нижнього поста визначається момент проходження максимального рівня для цього ж паводка, що ідентифікується за характерною формою гідрографа та послідовністю подій. Різниця між цими моментами часу дає значення часу добігання для даного конкретного паводка. Повторення цієї процедури для всіх паводків з вибірки дозволяє отримати статистичний розподіл часу добігання та встановити його залежність від характеристик паводка.

Варіативність часу добігання для різних паводків на одній і тій же ділянці річки є характерною особливістю, що пояснюється різницею в гідравлічних умовах проходження паводків різної інтенсивності. Для катастрофічних паводків з великими витратами води та швидким підйомом рівнів час добігання, як правило, є меншим внаслідок високих швидкостей руслового стоку та переважання вільного режиму течії в руслі. Для паводків помірної та низької інтенсивності час добігання

збільшується через більш повне затоплення заплави, збільшення коефіцієнта шорсткості та активізацію руслово-заплавного обміну водою, що призводить до зниження середніх швидкостей течії та сповільнення переміщення паводкової хвилі.

Залежність часу добігання від інтенсивності паводка може бути представлена у вигляді емпіричної кривої, яка відображає зменшення часу добігання зі збільшенням максимального рівня води на посту Галич. Така крива будується на основі статистичного аналізу фактичних значень часу добігання для паводків різної інтенсивності. Наявність такої залежності дозволяє попередньо оцінити очікуваний час добігання на основі прогнозованого максимального рівня води, що підвищує точність визначення моменту настання максимуму на посту Галич.

Особливості визначення часу добігання від поста на притоці вимагають додаткового розгляду, оскільки в цьому випадку паводкова хвиля від притоки не проходить безпосередньо до нижнього поста на головній річці, а накладається на стік головної річки в зоні злиття. Час добігання від поста на р. Стрий до поста Галич на Дністрі визначається як сума часу добігання від поста Стрий до гирла р. Стрий та часу добігання від гирла до поста Галич [13, 14].

Сезонна мінливість часу добігання може бути пов'язана з різницею в морфометричних характеристиках русла та заплави в різні сезони року. Взимку та ранньою весною при наявності льодових явищ час добігання може збільшуватися через підвищення гідравлічного опору течії. Влітку та восени при низьких меженних рівнях та відсутності затоплення заплави час добігання для невеликих паводків може зменшуватися через переважання руслового стоку. Проте для досліджуваної ділянки Розділ-Галич сезонні варіації часу добігання є менш значущими порівняно з варіаціями, зумовленими інтенсивністю паводка.

Точність визначення часу добігання залежить від гідрологічних спостережень на постах. При спостереженнях один раз на добу точність визначення часу добігання обмежується одною добою, що може бути недостатнім для

короткочасних паводків з часом добігання менше доби. При спостереженнях двічі на добу або погодинних спостереженнях під час проходження паводків точність суттєво підвищується, що дозволяє встановити час добігання з точністю до декількох годин. Для історичних паводків, які становлять найбільшу практичну небезпеку, зазвичай організовуються посилені спостереження з частотою 3-6 годин або навіть погодинні вимірювання, що забезпечує необхідну точність визначення часу добігання.

Врахування припливу від малих приток та поверхневого стоку на ділянці між постами може впливати на визначення часу добігання. Якщо на міжпостовій ділянці випадають інтенсивні опади, то додатковий приплив може призвести до підвищення рівнів на нижньому посту та зміщення моменту настання максимуму, що буде помилково інтерпретовано як зменшення часу добігання від верхнього поста. Для виключення таких помилок необхідно аналізувати метеорологічну інформацію та дані спостережень на проміжних постах, якщо такі є в наявності, а також використовувати критерій подібності форм гідрографів на верхньому та нижньому постах.

РОЗДІЛ 4

РОЗРОБКА МЕТОДИКИ ПРОГНОЗУВАННЯ ДЛЯ ДІЛЯНКИ

РОЗДІЛ - ГАЛИЧ

4.1 Визначення часу добігання стоку між створами

Час добігання стоку є проміжком часу, необхідним для проходження водної маси між двома гідрологічними створами. Для методу відповідних рівнів це основний параметр, що визначає часовий зсув між рівнями води на нижньому пості (р. Дністер - м. Галич) та верхніх постах (р. Дністер - с. Роздол, р. Стрий - м. Стрий). Коректне визначення часу добігання є необхідною умовою для побудови надійних прогностичних залежностей, оскільки саме цей параметр визначає фазу паводкової хвилі, яка досягне замикаючого створу при заданому часі прогнозу. Неправильний вибір часу добігання призводить до систематичних похибок, коли прогностична залежність встановлює зв'язок між несинхронізованими фазами гідрологічного процесу.

Час добігання визначався шляхом кореляційного аналізу рівнів води при різних часових зсувах. Аналізувалися зсуви від 0 до 24 годин із зміщенням 4 години для різних фаз водного режиму річки. Вибір такого зсуву зумовлений тим, що на гідрологічних постах рівні води вимірюються через кожні 4 або 8 годин у паводковий період, а в стандартному режимі тільки о 8 та 20 годині. Для кожного режиму розраховувались множинні коефіцієнти кореляції між рівнями води у верхніх створах та створі м. Галич при різних часових інтервалах. Оптимальним вважався той час добігання, при якому спостерігався найтісніший зв'язок між характеристиками стоку. При цьому враховувалась не лише величина коефіцієнта кореляції, але й практичні міркування щодо завчасності прогнозу та можливості

його оперативного використання в системі попередження про небезпечні гідрологічні явища.

Час добігання стоку не є постійною величиною і постійно змінюється протягом року залежно від фази водного режиму. Це пояснюється значними відмінностями в гідравлічних умовах формування стоку на різних етапах водного режиму річки. Швидкість течії, шорсткість підстильної поверхні, наявність або відсутність льодових явищ, вихід води на заплаву - всі ці фактори визначають швидкість добігання паводкової хвилі або зміни рівня від верхніх створів до замикаючого. Кожна фаза водного режиму характеризується різним поєднанням цих факторів, що і зумовлює необхідність визначення окремого часу добігання для різних режимів [13, 14].

Водний режим річок характеризується чергуванням фаз, що визначаються співвідношенням між надходженням води у річкову мережу та її витратою. Під фазами водного режиму розуміють характерні періоди у річному циклі водності річки, які відрізняються джерелами живлення, гідравлічними умовами води та закономірностями формування стоку. Для напівгірського Дністра у середній течії характерні літньо-осінні паводки дощового походження, які часто перевищують весняне водопілля, межені (літня та зимова), льодостав та перехідні періоди. Кожна з цих фаз має свої особливості формування стоку, швидкості руху води та характеру зміни рівнів, що впливає на час добігання стоку між створами. Літньо-осінні паводки формуються внаслідок інтенсивних злив у Карпатах і характеризуються різкими підйомами та спадами рівнів. Меженний період супроводжується мінімальними витратами та низькими швидкостями течії. Льодостав змінює гідравлічні умови через додатковий опір льодового покриву.

Весь період спостережень було розділено на 4 групи залежно від фази водного режиму: межень, відкрите русло, льодовий режим та паводки. Такий поділ базується на аналізі багаторічних рядів спостережень та враховує як гідрологічні

(водність, джерела живлення), так і гідравлічні (швидкість течії, наявність льоду, заплаву) характеристики кожної фази (табл. 4.1).

Таблиця 4.1.

Множинні коефіцієнти кореляції між рівнями води у створах Розділ, Стрий та Галич

Режим водності	Час зсуву, год	Множинний коефіцієнт кореляції R
Межень	24	0,97
Відкрите русло	24	0,88
Льодовий режим	24	0,94
Паводок	4	0,90
Паводок	8	0,898
Паводок	12	0,881
Паводок	16	0,842
Паводок	20	0,817
Паводок	24	0,801

Для межені множинний коефіцієнт кореляції при зсуві 24 години становить $R = 0,97$, що доводить на дуже тісний зв'язок між рівнями у верхніх та нижньому створах при добовому інтервалі. Для відкритого русла, тобто у періоди з помірною водністю без значних паводкових підйомів, множинний коефіцієнт кореляції при добовому зсуві становить $R = 0,88$. Для льодового режиму, коли на річці є льодові явища, $R = 0,94$ при часі добігання 24 години.

Для паводкових залежності множинного коефіцієнта кореляції від часу зсуву суттєво відрізняється від меженних умов. Аналіз показав, що найтісніший зв'язок спостерігається при часі добігання 4 години ($R = 0,90$), що вказує на дуже швидке проходження паводкової хвилі через досліджувану ділянку. При збільшенні часового зсуву множинний коефіцієнт кореляції поступово знижується: при 8 годинах $R = 0,898$, при 12 годинах $R = 0,881$, при 16 годинах $R = 0,842$, при 20 годинах $R = 0,817$, при 24 годинах $R = 0,801$ (табл. 4.1). Паводки характеризуються швидкими змінами рівнів, високими швидкостями течії та інтенсивним

проходженням максимумів через ділянку від верхніх створів до замикаючого. За таких умов зв'язок між рівнями у верхніх і нижньому створах є максимально тісним при мінімальному часі добігання, який відповідає реальній швидкості руху паводкової хвилі та мінімальній її трансформації на ділянці. Паводкова хвиля при русі трансформується: пік хвилі знижується за рахунок акумуляції частини об'єму на заплаві, а тривалість збільшується. Чим більший часове зміщення, тим більше змінюється форма хвилі і тим слабшим стає статистичний зв'язок.

Незважаючи на те, що найкращий зв'язок при зсуві на 4 години, даного часу недостатньо для забезпечення завчасності попереджень в оперативної гідрології, оскільки для своєчасного оповіщення населення про небезпеку, організації евакуації з потенційно небезпечних зон підтоплення, підготовки захисних споруд та інших заходів. Для ефективної реалізації попереджувальних заходів необхідна завчасність прогнозу щонайменше 12+ годин, тому для практичного застосування обрано час добігання 12 годин ($R = 0,881$). При цьому зсуві множинний коефіцієнт кореляції лише на 0,03 нижче максимального значення, досягнутого при 4 годинах. Таке незначне зниження тісноти зв'язку є цілком прийнятним порівняно для збільшенням завчасності прогнозу, що створює необхідний часовий резерв для реалізації комплексу протипаводкових заходів, включаючи оповіщення, евакуацію та підготовку захисних споруд. При подальшому збільшенні часу зсуву понад 12 годин зв'язок знижується більш суттєво - при 24 годинах коефіцієнт становить лише $R = 0,801$, що призводить до зростання похибок прогнозу.

4.2 Побудова та оцінка прогностичних залежностей

З метою підвищення точності прогнозу одне узагальнене рівняння не може коректно описувати всі гідравлічні умови формування стоку на досліджуваній

ділянці р. Дністер від с. Роздол до м. Галич. Це пояснюється суттєвими відмінностями у стоці, швидкостях течії та впливом заплави на різних фазах водного режиму. Тому для кожної фази виведено окремі рівняння множинної регресії.

Для меженного періоду, льодоставу, відкритого русла та паводкових режимів розроблено окремі прогностичні залежності з часом добігання 24 години для межені, льодоставу та відкритого русла, і 12 годин для паводків. Найбільшу складність становить прогнозування паводків, оскільки на цій фазі спостерігаються найбільші зміни гідравлічних умов залежно від рівня води. Для паводків виявилось недостатнім одне рівняння через суттєву зміну гідравлічних умов при виході води на заплаву. Рівень 400 см у с. Роздол визначений як рівень виходу на заплаву. Значення рівня 480 см у м. Галич є виходом на заплаву у замикальному створі на досліджуваній ділянці. Для р. Стрий відмітка виходу на заплаву становить 610 см, однак за період спостережень зафіксовано лише близько 10 випадків перевищення цього рівня, чого недостатньо для виведення окремого рівняння та його перевірки на незалежному матеріалі.

Для паводка в межах русла, коли рівень у с. Роздол нижчий за 400 см, а у м. Галич - нижчий за 480 см, паводкова хвиля рухається в межах русла з відносно стабільними морфометричними параметрами [20]. Рівняння побудовано на вибірці обсягом 304 спостереження і має вигляд:

$$H_{(\text{Галич}, t+12)} = -38,83 + 0,47 \cdot H_{(\text{Роздол}, t)} + 0,70 \cdot H_{(\text{Стрий}, t)}, \quad (4.1)$$

де $H_{(\text{Галич}, t+12)}$ - прогнозований рівень води у м. Галич через 12 годин, см;

$H_{(\text{Роздол}, t)}$ - поточний рівень води у с. Роздол, см;

$H_{(\text{Стрий}, t)}$ - поточний рівень води у м. Стрий, см.

Множинний коефіцієнт кореляції становить $(R) = 0,82$, що вказує на достатньо тісний зв'язок між верхніми постами та прогнозованим рівнем в Галичі;

коефіцієнт детермінації $R^2 = 0,68$ вказує, що 68% прогнозованого рівня пояснюється вхідних факторів; стандартна помилка моделі $\sigma_{\Delta} = 19$ см; гранична допустима помилка $\delta_{\text{доп}} = \pm 13$ см. Коефіцієнт регресії при Стрию (0,70) є більшим за коефіцієнт при Роздолі (0,47), що підтверджує значний вплив бокового припливу у формування паводка на ділянці між с. Роздол та м. Галич.

Для паводка з виходом на заплаву в смт Роздолі, коли рівень перевищує 400 см, а у м. Галич залишається нижчим за 480 см, вода виходить на заплаву, зростає шорсткість через рослинність та відбувається акумуляція частини паводкового об'єму. Рівняння побудовано на вибірці з 69 спостережень і має вигляд:

$$H_{(\text{Галич}, t+12)} = -236,45 + 0,90 \cdot H_{(\text{Роздол}, t)} + 0,69 \cdot H_{(\text{Стрий}, t)} \quad (4.2)$$

Множинний коефіцієнт кореляції $R = 0,86$ вказує на тісний зв'язок між верхніми постами та прогнозованим рівнем в Галичі, причому цей показник є вищим порівняно з русловим режимом; коефіцієнт детермінації $R^2 = 0,74$ вказує, що 74% прогнозованого рівня пояснюється даним рівнянням; стандартна похибка моделі зростає до $\sigma_{\Delta} = 29$ см через ускладнення гідравлічних умов при виході на заплаву; гранична допустима помилка $\delta_{\text{доп}} = \pm 20$ см. Коефіцієнт регресії при Роздолі зростає до 0,90 (проти 0,47 у русловому режимі), тоді як коефіцієнт при Стрию практично не змінюється (0,69 проти 0,70). Це демонструє зростання ролі верхнього створу при затопленні його заплави, оскільки акумульований там об'єм води надходить до нижнього створу.

Для паводка із затопленням заплави Галич, коли перевищує 480 см, відбувається трансформація паводкової хвилі з максимальною акумуляцією води. Рівняння виведено за 68 спостереженнями і має вигляд:

$$H_{(\text{Галич}, t+12)} = 262,92 + 0,15 \cdot H_{(\text{Роздол}, t)} + 0,68 \cdot H_{(\text{Стрий}, t)} \quad (4.3)$$

Множинний коефіцієнт кореляції $R = 0,76$ вказує на достатньо тісний зв'язок навіть в умовах екстремального затоплення заплави; коефіцієнт детермінації $R^2 = 0,57$ показує, що 57% рівня пояснюється даним рівнянням; стандартна помилка моделі значно зростає до $\sigma_{\Delta} = 122$ см, що пояснюється високою мінливістю рівнів при екстремальних паводках та складністю гідравлічних умов при затопленні заплави; допустима помилка $\delta_{\text{доп}} = \pm 82$ см. Коефіцієнт регресії при Роздолі різко знижується до 0,15 (проти 0,90 у рівнянні затоплення смт Роздолі), що відображає слабкий вплив верхнього створу при затопленні заплави безпосередньо у замикаючому створі - вода акумулюється локально на заплаві нижнього створу і мало не залежить від процесів вище по течії. Коефіцієнт при Стрию зберігається на рівні 0,68, що вказує на стабільний вплив бокового припливу незалежно від ступеня затоплення заплави.

Для меженного режиму рівняння побудовано на вибірці обсягом 557 спостережень і має вигляд:

$$H_{(\text{Галич}, t+1)} = 0,20 + (-0,02) \cdot H_{(\text{Роздол}, t)} + 0,10 \cdot H_{(\text{Стрий}, t)} + 0,87 \cdot H_{(\text{Галич}, t)}, \quad (4.4)$$

де $H_{(\text{Галич}, t+1)}$ - прогнозований рівень води у м. Галич через добу, см;

$H_{(\text{Роздол}, t)}$ - поточний рівень води у с. Роздол, см;

$H_{(\text{Стрий}, t)}$ - поточний рівень води у м. Стрий, см;

$H_{(\text{Галич}, t)}$ - поточний рівень води у м. Галич, см.

У цьому рівнянні з'являється третя змінна - поточний рівень у замикаючому створі $H_{(\text{Галич}, t)}$ з коефіцієнтом 0,87. Це пояснюється тим, що в межених умовах при низьких швидкостях течії та незначних коливаннях рівнів: рівень води завтра значною мірою залежить від рівня сьогодні у тому ж створі, оскільки швидкість течії низька і зміни рівня незначні. Коефіцієнти регресії при верхніх створах є мінімальними: -0,02 для Роздолу (що фактично вказує на відсутність впливу цього

фактору) і 0,10 для Стрию, що підтверджує основний вплив поточного рівня над впливом з верхів'я річки.

Множинний коефіцієнт кореляції $R = 0,97$ вказує на дуже тісний зв'язок; коефіцієнт детермінації $R^2 = 0,95$ вказує, що 95% прогнозованого рівня описується рівнянням, що є найвищим показником серед усіх режимів; стандартна помилка рівняння $\sigma_{\Delta} = 7$ см є мінімальною; допустима помилка $\delta_{\text{доп}} = \pm 5$ см.

Для льодоставу рівняння побудовано на основі 371 спостереження і має вигляд:

$$H_{(\text{Галич}, t+1)} = 2,26 + 0,01 \cdot H_{(\text{Роздол}, t)} + 0,13 \cdot H_{(\text{Стрий}, t)} + 0,80 \cdot H_{(\text{Галич}, t)} \quad (4.5)$$

Аналогічно до межені, у рівнянні використовується третя змінна - поточний рівень у замикаючому створі $H_{(\text{Галич}, t)}$ з коефіцієнтом 0,80. Це зумовлено тим, що під льодовим покривом швидкості течії знижуються через додатковий гідравлічний опір від поверхні льоду, коливання рівнів є мінімальними, тому рівень учора в замикаючого створу є основним для значення через добу. Коефіцієнти регресії для верхніх постів є мінімальними: 0,01 для Роздолу та 0,13 для Стрию, що вказує на незначний вплив притоку з верхніх постів при льодовому режимі.

Множинний коефіцієнт кореляції $R = 0,94$ вказує на дуже тісний зв'язок; коефіцієнт детермінації $R^2 = 0,88$ показує, що 88% прогнозованого рівня описується рівнянням; стандартна помилка рівняння $\sigma_{\Delta} = 5$ см; допустима помилка $\delta_{\text{доп}} = \pm 4$ см.

Для відкритого русла рівняння виведено за 536 спостереженнями і має вигляд:

$$H_{(\text{Галич}, t+1)} = 24,66 + 0,35 \cdot H_{(\text{Роздол}, t)} + 0,40 \cdot H_{(\text{Стрий}, t)} \quad (4.6)$$

На відміну від межені та льодоставу, у цьому рівнянні відсутня третя змінна $H_{(\text{Галич}, t)}$, що вказує на більшу динамічність гідрологічних процесів - вплив

попереднього стану водності у замикаючому створі є меншим, натомість зростає вплив верхніх створів та бокового припливу. Коефіцієнти регресії при Роздолі (0,35) та Стрию (0,40) є близькими, що відображає майже однаковий вплив обох постів у формування прогнозованого рівня.

Множинний коефіцієнт кореляції $R = 0,88$ вказує на тісний зв'язок; коефіцієнт детермінації $R^2 = 0,78$ показує, що 78% прогнозованого рівня описується рівнянням; стандартна помилка моделі $\sigma_{\Delta} = 13$ см; гранична допустима помилка $\delta_{\text{доп}} = \pm 9$ см.

4.3 Перевірка справджуваності прогнозів на незалежному матеріалі та розрахунок похибок

Перевірка справджуваності прогностичних рівнянь проводилась на незалежному матеріалі - рядах спостережень, які не використовувалися при побудові моделей. Для кожного режиму відібрано перевіірочну вибірку, обсяг якої варіював від 21 випадку для режиму запливи Галич до 152 випадків для межені.

Оцінка якості прогнозів проводилась за трьома критеріями. По-перше, розраховувалось відношення середньої помилки на перевіірочній вибірці до стандартної помилки моделі S/σ_{Δ} , яке вказує, наскільки добре модель працює на незалежних даних порівняно з навчальною вибіркою. По-друге, визначалась справджуваність за рівнем P_H - частка випадків, коли фактична помилка прогнозу рівня не перевищує допустиму помилку $\delta_{\text{доп}}$. Цей показник є основним критерієм для перевірки рівняння з метою практичного використання. По-третє, розраховувалась справджуваність за витратою P_Q - частка випадків, коли похибка прогнозування витрати не перевищує $\pm 20\%$ від прогнозованої величини [13, 14].

Для розрахунку показника P_Q рівні води переводились у витрати через криві витрат $Q = f(H)$ (рис. 4.1) для кожної фази водності. Використання кривих витрат

замість методу аналога поста (Верхнє Синьовидне) є виправданим, оскільки дозволяє простіше зрозуміти причини несправджуваності прогнозу, чи причина в рівнянні прогнозу чи в переведенні в витрату рівнів води, саме тому всі розрахунки проводилися по даних рівня води. Однак при виході на заплаву (заплава Роздолу та заплава Галич) перехід до витрат не здійснювався, оскільки штормові дані УкрГМЦ надаються тільки у вигляді рівнів води, а подовження кривої витрат на екстремальні рівні води призводить до значних похибок через зміну гідравлічних умов при затопленні заплави.

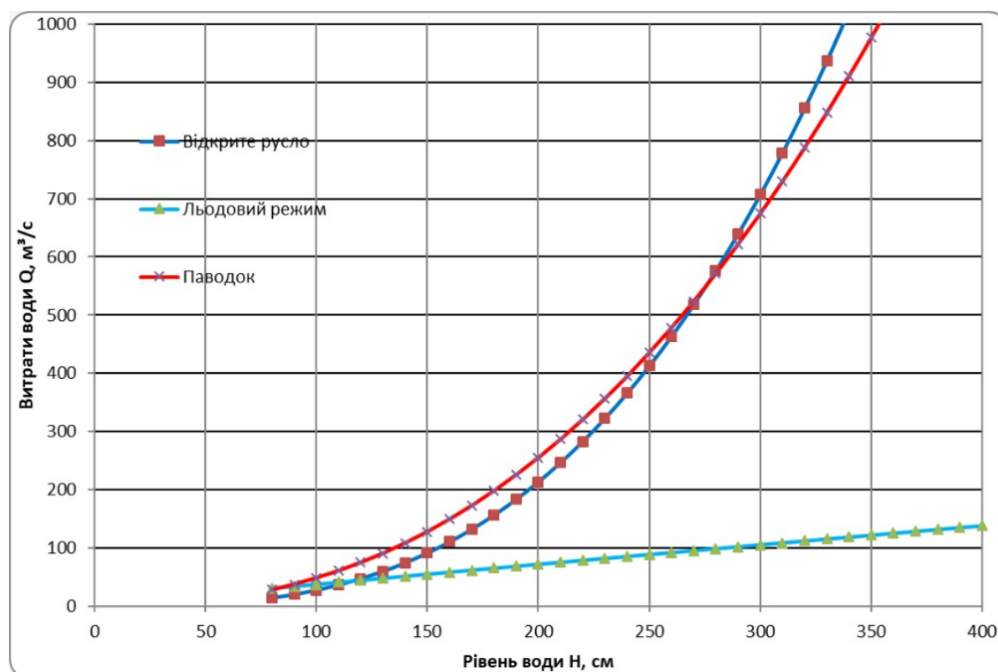


Рис. 4.1 Крива витрат води $Q = f(H)$ для гідропосту Галич

Для режиму льодоставу перевірка проведена на вибірці обсягом 57 випадків. Середня помилка прогнозу становить $S = 4$ см, що не перевищує граничну допустиму помилку $\delta_{\text{доп}} = \pm 4$ см. Відношення середньої помилки до стандартної помилки моделі $S/\sigma_{\Delta} = 0,72$, що вказує на задовільну якість прогнозу. Справджуваність за рівнем $P_H = 75\%$, тобто у трьох випадках з чотирьох фактична

помилка не перевищує граничну допустиму. Справджуваність за витратою також $P_Q = 75\%$. За всіма трьома критеріями рівняння для періоду льодоставу оцінюється як задовільний.

Для режиму відкритого русла перевірка проведена на вибірці обсягом 85 випадків. Середня помилка прогнозу $S = 6$ см значно нижча за граничну допустиму помилку $\delta_{\text{доп}} = \pm 9$ см. Співвідношення $S/\sigma_\Delta = 0,44$ вказує на добру якість прогнозу. Справджуваність за рівнем $P_H = 88\%$, справджуваність за витратою $P_Q = 95\%$. За всіма трьома критеріями рівняння для відкритого русла оцінюється як добре.

Для режиму межені перевірка проведена на найбільшій вибірці обсягом 152 випадки. Середня помилка прогнозу $S = 5$ см при допустимій помилці $\delta_{\text{доп}} = \pm 5$ см. Співвідношення $S/\sigma_\Delta = 0,79$ свідчить про задовільну якість прогнозу. Справджуваність за рівнем $P_H = 75\%$, справджуваність за витратою $P_Q = 89\%$. За критеріями S/σ_Δ та P_H рівняння оцінюється як задовільне, за критерієм P_Q - як добра.

Для режиму паводків в межах русла перевірка проведена на вибірці обсягом 71 випадок. Середня помилка прогнозу $S = 13$ см дорівнює допустимій помилці $\delta_{\text{доп}} = 13$ см. Відношення $S/\sigma_\Delta = 0,68$ вказує на задовільну якість прогнозу. Справджуваність за рівнем $P_H = 69\%$, справджуваність за витратою $P_Q = 86\%$. За критеріями S/σ_Δ та P_H рівняння оцінюється як задовільне, за критерієм P_Q - як добра.

Для режиму заплави Роздолу перевірка проведена на вибірці обсягом 31 випадок. Середня помилка прогнозу $S = 22$ см дещо перевищує граничну допустиму помилку $\delta_{\text{доп}} = \pm 20$ см, що зумовлено складністю гідравлічних умов при виході води на заплаву у верхній частині ділянки. Відношення $S/\sigma_\Delta = 0,75$ свідчить про задовільну якість прогнозу. Справджуваність за рівнем $P_H = 68\%$, що є найнижчим показником серед усіх режимів. Показник справджуваності за витратою P_Q не розраховувався, оскільки штормові дані надаються тільки у вигляді рівнів, а екстраполяція кривої витрат на високі рівні з виходом на заплаву призводить до значних похибок. За наявними критеріями модель оцінюється як задовільна з урахуванням складності умов прогнозування.

Для режиму заплави Галич перевірка проведена на найменшій вибірці обсягом 21 випадок через рідкісність екстремальних паводків з рівнями понад 480 см у м. Галич. Середня помилка прогнозу $S = 33$ см значно нижча за граничну допустиму помилку $\delta_{\text{доп}} = \pm 82$ см. Відношення $S/\sigma_{\Delta} = 0,27$ є найнижчим серед усіх режимів. Справджуваність за рівнем $P_H = 90\%$ є найвищою серед усіх режимів. Показник P_Q не розраховувався з тих самих причин, що й для заплави Роздолу. Однак такі високі показники на перевірочній вибірці зумовлені насамперед її малим обсягом (21 випадок), а не ідеальною якістю рівняння. При збільшенні обсягу перевірного матеріалу показники можуть погіршитися. За наявними критеріями модель оцінюється як добра.

ВИСНОВКИ

1. Охарактеризовано фізико-географічні умови формування стоку на досліджуваній ділянці басейну Дністра від Розділу до Галича. Встановлено, що клімат гірської частини басейну є помірно-континентальним з рисами гірського, річна сума опадів зростає з висотою від 600–700 мм у передгірській зоні до 1400–1600 мм на окремих вершинних ділянках, причому близько 65–70% опадів припадає на теплий період року. Проаналізовано гідрологічний режим річки Дністер у створах Розділ і Галич та річки Стрий на посту Стрий. Встановлено, що для Верхнього Дністра характерними є паводки протягом усього року внаслідок інтенсивних дощів, сніготанення в горах під час відлиг та загального танення снігового покриву навесні. Аналіз динаміки середньорічних витрат води за період спостережень показав наявність повних циклів водності з чергуванням багатоводних та маловодних періодів, причому відносна синхронність коливань стоку на різних гідрологічних постах свідчить про незначний антропогенний вплив на формування водного режиму річок у регіоні.

2. Оцінено вплив бокового припливу річки Стрий на формування стоку Дністра у створі Галич. Річка Стрий, є найбільшою правою притокою на досліджуваній ділянці, забезпечує до 70% бокового припливу води на ділянці між постами Розділ і Галич, суттєво впливаючи на гідрологічний режим Дністра. Порівняльний аналіз суміщених гідрографів стоку за репрезентативні роки різної водності показав, що найвищі рівні води на посту Галич формуються при синхронному або майже синхронному проходженні паводкових максимумів на Дністрі та Стрию з різницею 2–8 годин. За таких умов відбувається накладання паводкових хвиль, що призводить до формування сумарного максимуму, який значно перевищує максимуми на верхніх постах.

3. Встановлено закономірності трансформації хвилі паводку на ділянці Дністра між гідрологічними постами Розділ і Галич та визначено час добігання для різних фаз водного режиму. Під час проходження паводкової хвилі вниз за течією відбувається поступова зміна її форми внаслідок акумуляції частини паводкового стоку на заплавних масивах, збільшення тривалості проходження паводка, зменшення інтенсивності підйому та спаду рівнів води. Для меженного режиму, відкритого русла та льодоставу найтісніший зв'язок між рівнями у верхніх та нижньому створах спостерігається при часі добігання 24 години з множинними коефіцієнтами кореляції від 0,88 до 0,97. Для паводкових умов обрано час добігання 12 годин, що створює необхідний часовий резерв для реалізації комплексу протипаводкових заходів при збереженні високої тісноти статистичного зв'язку.

4. Обґрунтовано критерії розрахункових залежностей за умовами затоплення русла та заплави. Визначено, що рівень 400 см у створі Розділ є рівнем виходу води на заплаву у верхній частині досліджуваної ділянки, а рівень 480 см у створі Галич відповідає виходу води на заплаву у замикаючому створі. Це дозволило розділити паводковий режим на три окремі категорії та для кожної категорії вивести окремі рівняння множинної регресії, що враховують різні гідравлічні умови формування стоку. Встановлено, що коефіцієнти регресії при рівнях води на річці Стрий у всіх паводкових залежностях є більшими або близькими до коефіцієнтів при рівнях на Дністрі у Розділі, що кількісно підтверджує визначальну роль бокового припливу у формуванні паводкового стоку на досліджуваній ділянці.

5. Розроблено та апробовано методику прогнозу щоденних рівнів та витрат води у створі Галич методом відповідних рівнів з урахуванням бокового припливу річки Стрий. Для паводків у межах русла побудовано рівняння з множинним коефіцієнтом кореляції 0,82 та стандартною помилкою 19 см. Для паводків з виходом на заплаву у створі Розділ коефіцієнт кореляції становить 0,86 при стандартній помилці 29 см. Для паводків із затопленням заплави Галич

коефіцієнт кореляції становить 0,76 при стандартній помилці 122 см. Для меженного режиму, льодоставу та відкритого русла побудовано рівняння з часом добігання 24 години, які характеризуються множинними коефіцієнтами кореляції від 0,88 до 0,97 та стандартними помилками від 5 до 13 см.

6. Перевірено та оцінено точність розробленої методики на незалежному матеріалі за трьома критеріями: відношення середньої помилки до стандартної помилки моделі, справджуваність за рівнем та справджуваність за витратою. Для режимів льодоставу, відкритого русла, межені та паводків у межах русла отримано показники, що відповідають задовільній або доброї якості прогнозу. Розроблена методика може бути впроваджена в практику оперативного прогнозування Українського гідрометеорологічного центру для підвищення точності короткострокових прогнозів рівнів та витрат води річки Дністер у створі Галич. Застосування методики дозволить своєчасно попереджати про небезпечні гідрологічні явища у верхній течії Дністра, що сприятиме зменшенню ризиків підтоплення населених пунктів, об'єктів інфраструктури та сільськогосподарських угідь.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕЛ

1. Баланс водний. ВУЕ. URL: https://vue.gov.ua/Баланс_водний.
2. Вишневський В. І., Косовець О.О. Гідрологічні характеристики річок України. Київ : Ніка-Центр, 2003. 324 с.
3. Вишневський В. І., Куций А. В. Багаторічні зміни водного режиму річок України. К.: Наукова думка, 2022. 252 с.
4. Географічна енциклопедія України : в 3-х томах / редкол.: О. М. Маринич (відпов. ред.) та ін. Київ: "Українська Радянська Енциклопедія" ім. М. П. Бажана, 1993. 480 с.
5. Географічний часопис. Волинського національного університету імені Лесі Українки. *Видавничий дім «Гельветика»*. URL: <https://dspace.udpu.edu.ua/bitstream/123456789/17510/1/2.pdf>.
6. Гідрологія гірських областей : навч.-метод. посібник. Чернівці: Чернівець. нац. ун-т ім. Ю. Федьковича, 2024. 144 с.
7. Гідрохімічний режим та якість поверхневих вод Дністра на території України/ В.К. Хільчевський, О.М. Гончар, М.Р. Забокрицька та ін.; за ред. В.К. Хільчевського та В.А. Сташука. Київ : Ніка-Центр, 2013. 256 с.
8. Гребінь В.В. Сучасний водний режим річок України (ландшафтно-гідрологічний аналіз). – К. : Ніка-Центр, 2010. – 315 с.
9. Гребінь В.В. Сучасний водний режим річок України. Київ: Ніка-Центр, 2010. 316 с. 2. Загальна гідрологія / В.К. Хільчевський, О.Г. Ободовський, В.В. Гребінь та ін. Київ: ВПЦ «Київський університет», 2008. 399 с.
10. Дністер. Український гідрометеорологічний центр. URL: http://dnister.meteo.gov.ua/ua/about_dnister.
11. Каталог типів оселищ Українських Карпат і Закарпатської низовини / Ред. Б. Проць та О. Кагало. Львів: Меркатор, 2012. 294 с.

12. Л.О. Горбачова. Сучасний внутрішньорічний розподіл водного стоку річок України УГЖ. Про журнал УГЖ. URL: <https://ukrgeojournal.org.ua/uk/node/488>.
13. Методичні вказівки до виконання практичних робіт з дисципліни «Математичні методи в гідрометеорології» для студентів географічного факультету / О.І. Лук'янець. Київ: Видавничо-поліграфічний центр «Київський університет», 2010. 52 с.
14. Методичні вказівки до виконання практичних робіт з курсу «Гідрологічні прогнози» / О.І.Лук'янець. Київ : ВПЦ “Київський університет”, 2003. 25 с.
15. Мудра К. В. Основні характеристики водного режиму річок басейну Дністра в умовах змін клімату : дис. канд. геогр. наук : 11.00.07. Київ, 2019. 259 с.
16. План управління річковим басейном Дністра. *Державне агентство водних ресурсів України*. URL: <https://davr.gov.ua/plan-upravlinnya-richkovim-basejnom-dnistra34>.
17. УкрГМЦ - Погода в Україні, гідрологічна та радіаційна ситуація. *Офіційний вебсайт*. URL: <https://www.meteo.gov.ua/>.
18. Фесюк В. О. Кількісні методи в гідрології : курс лекцій. Луцьк : [б. в.], 2023. 58с.
19. Чорноморець Ю.О., Лук'янець О.І. Вплив сучасних змін у співвідношенні сніго-дощового живлення річок на структуру водного балансу їх басейнів (на прикладі річкового басейну Ворскли). Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія, 2019. № 4(55). С. 40-52. URL: <https://doi.org/10.17721/2306-5680.2019.4.3>.
20. Пригорницька О.С. Прогнозування максимальних рівнів води р. Дністер у м. Галич методом відповідних рівнів з урахуванням бокового припливу р. Стрий. Шевченківська весна – 2026: ГЕОГРАФІЯ: Збірник наукових праць XXII міжнародної наукової міждисциплінарної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених. Київ : Видавництво «Наукова столиця», 2026. Випуск XXIII. С. 137-140.