

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ЕКОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

МАРТИНЮК МАКСИМ ОЛЕГОВИЧ

Прим. № _____

УДК 556.166

ДИСЕРТАЦІЯ

**ПОВЕНІ НА РІЧКАХ БАСЕЙНУ ВІСЛИ В МЕЖАХ УКРАЇНИ,
МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ЇХ ХАРАКТЕРИСТИК ТА ОЦІНКА
РИЗИКІВ**

103 Науки про Землю

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії.

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ Мартинюк М.О.

Науковий керівник: Овчарук Валерія Анатоліївна, доктор географічних наук,
професор

Одеса – 2023

АНОТАЦІЯ

Мартинюк М.О. Повені на річках басейну Вісли в межах України, методика визначення їх характеристик та оцінка ризиків – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 103 «Науки про Землю». – Одеський державний екологічний університет МОН України, м. Одеса, 2023 р.

Дисертаційна робота присвячена дослідженню та оцінці ризиків затоплення при проходженні максимального стоку весняних водопіль та дощових паводків в українській частині басейну р. Вісла.

У роботі виконаний збір, підготовка та аналіз гідрологічних, метеорологічних вихідних даних та даних дистанційного зондування Землі, що використані при розрахунках максимального стоку весняних водопіль та дощових паводків у досліджуваному басейні, а також подальшого гідрологічного моделювання затоплення окремих ділянок водозбору, які мають потенційно значні ризики затоплення (ТПЗРЗ).

Проведена оцінка однорідності та стаціонарності рядів даних максимального стоку (максимальних витрат води та шарів стоку) весняного водопілля та дощових паводків річок басейну р. Вісла, визначена циклічність коливань стоку, а також виконана статистична обробка вихідних гідрологічних даних від початку спостережень до 2015 року, включно.

Визначення максимального стоку річок басейну р. Вісла в межах України виконане з використанням операторної моделі, розробленої вченими Одеського державного екологічного університету. З метою обґрунтування параметрів регіональної методики, виконаний розрахунок характеристик максимального стоку рідкісної імовірності перевищення, як весняного водопілля, так і дощових паводків. Результатом розрахунків є характеристики схилового припливу (шари стоку паводків і весняного водопілля, тривалість припливу зі схилів до руслової мережі, та максимальні модулі схилового

припливу) географічно узагальнені за територією досліджуваного басейну з використанням GIS-технологій, а також розрахункові рівняння для визначення трансформаційних функцій максимального стоку різного походження (русьове добігання, русло-заплавне регулювання). Обґрунтована регіональна методика дозволяє визначати характеристики максимального стоку рідкісної імовірності перевищення весняних водопіль і дощових паводків за відсутності даних гідрологічних спостережень на території досліджуваного басейну.

Порівняння розрахункових максимальних модулів стоку та витрат води під час проходження паводків рідкісної ймовірності перевищення з максимальними спостереженими та результатами статистичної обробки показало, що представлена методика є теоретично та практично обґрунтованою; точність розрахунків характеристик максимального стоку рідкісної імовірності перевищення для весняних водопіль склала $\pm 8,84\%$, а для дощових паводків $\pm 18,3\%$.

Оцінка ризиків затоплення проведена для ТПЗРЗ, що були визначені згідно Плану управління ризиками затоплення на окремих територіях у межах району басейну річки Вісла на 2023-2030.

У дисертаційному дослідженні проаналізовані існуючі методи та моделі, що використовуються у світовій практиці при визначенні зон затоплення. Виконане гідрологічне моделювання зон затоплення з використанням програмного забезпечення HEC-RAS, розробленого Корпусом інженерів-гідрологів Військово-морських сил США. У якості вихідних даних при моделюванні використана побудована цифрова модель рельєфу, дані промірних робіт та розрахункові гідрографи.

Цифрова модель рельєфу (ЦМР) досліджуваної території розроблена з використанням програмного забезпечення QGIS за SRTM знімками, отриманими з ресурсу EarthExplorer а також за даними проекту HydroSHEDS, проведеному Всесвітнім фондом дикої природи США з метою створення цифрових шарів даних для підтримки широкомасштабних гідроекологічних досліджень.

Розрахункові гідрографи побудовані для весняних водопіль та дощових паводків за методикою, наведеною у СНіП 2.01.14-83 та удосконаленою Є.Д. Гопченко та С.В. Авгайтисом, при цьому окремі параметри обґрунтовані на даних річок досліджуваного регіону басейну р. Вісли.

У роботі проведений порівняльний аналіз розрахункових гідрографів з фактичними за характерні роки (за роки з максимальною спостереженою витратою води весняного водопілля та дощових паводків), який показав високу збіжність форми гідрографів та об'ємів стоку.

Моделювання площі затоплення на території з наявністю даних гідрологічних спостережень проведено на прикладі р. Рата – с. Волиця. Виконане порівняння площі затоплення під час проходження максимальних витрат весняних водопіль і дощових паводків за розрахунковим та фактичним гідрографом, яке показало значну залежність площі затоплення від рельєфу місцевості та характеру підстильної поверхні.

Проведена оцінка ризиків затоплення для ТПЗРЗ р.Рата – с. Пристань за відсутності спостережень за річковим стоком. Загальна площа затоплення склала 2,21 км². Визначена кількість об'єктів, що потрапили до зони затоплення, включаючи будівлі, житлові будинки, культурні пам'ятки, промислові об'єкти, сільськогосподарські території, дороги та мости, величина ризику затоплення помірна.

Представлена методика може бути використана для інших річок басейну р. Вісла з метою визначення величина ризику затоплення ТПЗРЗ та рекомендується з метою подальшої імплементації Паводкової директиви ЄС в Україні та впровадження плану управління ризиками затоплення на окремих територіях у межах району басейну річки Вісла на 2023-2030 роки.

Ключові слова: максимальний стік, паводки, басейн р. Вісла, оцінка ризиків, НЕС-RAS.

ABSTRACT

Martyniuk M. Floods on the rivers of the Vistula basin within Ukraine, the method of determining their characteristics and risk assessment - Qualifying research paper with manuscript rights.

The Ph.D. degree thesis on the specialty 103 "Earth Sciences". – Odesa State Environmental University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Odesa, 2023

The dissertation is devoted to research and flood risk assessment during the passage of the maximum runoff of spring and rain floods in the Ukrainian part of the Vistula River basin.

In the work, the collection, preparation and analysis of hydrological and meteorological raw data and data of remote sensing of the Earth, used in the calculations of the maximum runoff of spring and rain floods in the studied basin, as well as further hydrological flood modeling of individual areas of the catchment, which have potentially significant flooding risks (APSEFR), were performed.

The homogeneity and stationarity of data series of the maximum runoff (maximum water discharges and runoff layers) of the spring and rain floods of the rivers of the Vistula River basin were evaluated, the cyclicity of runoff fluctuations was determined, and statistical processing of the initial hydrological data from the beginning of observations to 2015 was performed.

Determination of the maximum runoff of the rivers of the Vistula River basin within Ukraine was carried out using the operator model developed by scientists of the Odesa State Environmental University.

In order to substantiate the parameters of the regional methodology, the calculation of the characteristics of the maximum runoff of the rare probability of exceeding both spring and rain floods was performed. The results of the calculations are the characteristics of the slope influx (runoff layers of rain and spring floods, the duration of slope influx, and the maximum modules of the slope influx) geographically generalized by the territory of the studied basin using GIS

technologies, as well as calculation equations for determining the transformation functions of the maximum runoff of different origin.

A well-founded regional method allows determining the characteristics of the maximum runoff of the rare probability of exceeding spring and rain floods in the absence of hydrological observation data in the territory of the studied basin.

A comparison of the calculated maximum runoff modules and water discharges during floods of rare probability of exceedance with the maximum observed and the results of statistical processing showed that the presented method is theoretically and practically justified; the accuracy of the calculations of the characteristics of the maximum runoff of the rare probability of exceedance for spring floods was $\pm 8.84\%$, and for rain floods $\pm 18.3\%$.

The flood risk assessment was carried out for APSFR, which were determined according to the Flood Risk Management Plan in individual territories within the Vistula River Basin District for 2023-2030.

The dissertation research analyzed the existing methods and models used in global practice when identifying flood zones. Performed hydrologic modeling of flood zones using HEC-RAS software developed by the Hydrologic Engineering Center of US Army Corps of Engineers. The constructed digital evaluation model, data of measuring works and calculated hydrographs were used as input data for modeling.

The digital evaluation model (DEM) of the study area was developed using QGIS software based on SRTM images obtained from the EarthExplorer resource, as well as data from the HydroSHEDS project conducted by the World Wildlife Fund US to create digital data layers to support large-scale hydroecological research.

Estimated hydrographs were built for spring and rain floods according to the methodology given in SNiP 2.01.14-83 and improved by E.D. Hopchenko. and S.V. Avgaytis, while individual parameters are based on the data of the rivers of the studied region of the Vistula River basin.

In the work, a comparative analysis of calculated hydrographs with actual ones for characteristic years (for years with the maximum observed water discharges

of spring and rain floods) was carried out, which showed a high convergence of the shape of hydrographs and runoff volumes.

Modeling of the inundation area in the territory with the availability of hydrological observation data was carried out on the example of the WGS Rata – Volitsa.

A comparison of the inundation area during the passage of the maximum runoff of spring and rain floods was performed according to the calculated and actual hydrograph, which showed a significant dependence of the inundation area on the topography of the area and the nature of the underlying surface.

The flood risk assessment was carried out for the APSFR Rata - Pristan in the absence of observations of the river runoff. The total area of flooding was 2.21 km². The identified number of objects that fell into the inundation zone, including buildings, residential, cultural monuments, industrial facilities, agricultural areas, roads and bridges, the magnitude of the risk of flooding is moderate.

The presented method can be used for other rivers of the Vistula River basin in order to determine the magnitude of the flood risk of the APSFR and is recommended for the purpose of further implementation of the EU Flood Directive in Ukraine and the implementation of the flood risk management plan in certain areas within the Vistula River Basin District for 2023-2030.

Key words: maximum runoff, floods, Vistula River basin, risk assessment, HEC-RAS.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ НАУКОВИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ
ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у періодичних наукових виданнях, проіндексованих у базах даних Web of Science Core Collection та/або Scopus:

1. **Martyniuk M. O.**, Ovcharuk V. A. Identification of areas with potential significant flood risk using specialized software in the Vistula river basin within Ukraine. *Acta Hydrologica Slovaca*. 2023. Vol. 24, No 1. P. 94-100. DOI: [10.31577/ahs-2023-0024.01.0011](https://doi.org/10.31577/ahs-2023-0024.01.0011)

Статті у наукових фахових виданнях України:

2. Овчарук, В. А., **Мартинюк, М. О.** Застосування операторної моделі для визначення максимальних модулів стоку весняних водопіль і дощових паводків річок басейну Вісли в межах України. *Людина та довкілля. Проблеми неоекології*. 2021. № 36. С. 22-33. DOI: <https://doi.org/10.26565/1992-4224-2021-36-0>

3. **Мартинюк М. О.**, Овчарук В. А. Просторова і часова мінливість максимального стоку в басейні Вісли в умовах кліматичних змін. *Екологічні науки*. Київ, 2023. № 3(48) С. 148-155. DOI: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2023.есо.3-48.24>

4. Гопченко Є. Д., Бурлуцька М. Е., Романчук М. Є., **Мартинюк М. О.** Сучасні методи дослідження максимального стоку весняних водопіль і дощових паводків річок України. *Науковий вісник Херсонського державного університету*. 2019. № 10. С. 114-118. DOI: <https://doi.org/10.32999/ksu2413-7391/2019-10-16>

Наукові статті в інших виданнях:

5. Бурлуцька М. Е., **Мартинюк М. О.** Розрахункові характеристики максимального стоку весняного водопілля в басейні р. Південний Буг. *Таврійський науковий вісник*. 2019. №106. С. 248-254.
6. Гопченко Є. Д., Бурлуцька М. Е., Романчук М. Є., **Мартинюк, М. О.** Максимальний стік дощових паводків і весняних водопіль. *Таврійський науковий вісник*. 2019. № 106. С. 255-261.
7. Леневи́ч О. І., Гречко А. А., **Мартинюк М. О.** Зелено-голуба інфраструктура малих міст (на прикладі м. Яремче, Українські Карпати). *Охорона довкілля* : зб. наук. статей XVII Всеукраїнських наукових Таліївських читань (м. Харків, 21 жовтня 2021 р.). Харків, 2021. С. 107-111.

Тези доповідей і матеріали конференцій:

8. **Martyniuk M. O.**, Ovcharuk V. A. Study of the influence of zonal and azonal factors on the maximum floods runoff in the Vistula basin (within Ukraine). *3rd Baltic Earth Conference. Earth system changes and Baltic Sea coasts* : International Baltic Earth Secretariat Publication No 18 (Jastarnia/online, Poland, 2-3 June, 2020). Jastarnia, 2020. P. 76-77.
9. **Мартинюк М. О.**, Овчарук В. А. Визначення характеристик максимального стоку дощових паводків в басейні Вісли в межах України з використанням супутникових даних і ГІС-технологій. Матеріали ХІХ наукової конференції молодих вчених ОДЕКУ, м. Одеса, 25-29 травня 2020 р. С. 114-115.
10. **Мартинюк М. О.**, Овчарук В. А. Обґрунтування параметрів розрахункової методики для визначення максимального стоку річок району басейну Вісли. *Другий Всеукраїнський гідрометеорологічний з'їзд* : тези доповідей. (м. Одеса, 7-9 жовтня 2021 р.) Одеса, 2021. С. 75-76.
11. **Martyniuk M. O.**, Hrechko A. A., Lenevych O. I. Sewage treatment plants in small towns of Ukraine. *Socio-ecological resilience across Eurasia – Innovation for*

sustainability transition : abstracts on the INTENSE Open Science Conference (Tartu/online, 5-6 October, 2021). Tartu, 2021. P. 20-21.

12. **Martyniuk M. O.**, Ovcharuk V. A. The modern method for calculating the maximum river runoff on the Vistula River Basin within Ukraine. *Socio-ecological resilience across Eurasia – Innovation for sustainability transition* : abstracts on the INTENSE Open Science Conference (Tartu/online, 5-6 October, 2021). Tartu, 2021. P. 21-22.

13. **Martyniuk M. O.**, Ovcharuk V. A. Application The Space Techniques To Measure The Area Forestation And Wetlands At The Basin Of The Vistula Within Ukraine. *4th Hydrospace-GEOGloWS 2021* (7-11 June 2021, Virtual event). 2021.

14. **Мартинюк М. О.**, Овчарук В. А. Визначення та узагальнення граничних модулів схилового припливу підчас паводків та водопіль в басейні р. Вісла. Матеріали XX наукової конференції молодих вчених ОДЕКУ, м. Одеса, 26-30 квітня 2021 р. Одеса, 2021. С. 95-96.

15. **Мартинюк М. О.**, Овчарук В. А. Використання ГІС-технологій для визначення залісеності басейнів річок Малого та Волинського Полісся. *Геологічне, гідрологічне та біологічне різноманіття Полісся* : збірник наукових праць Міжнародної науково-практичної конференції до 130-річчя від дня народження видатного польського дослідника Полісся Станіслава Малковського та у рамках проведення Водного форуму до 105-річчя Національного університету водного господарства та природокористування. Рівне : НУВГП, 2021. С. 287-291.

16. **Мартинюк М. О.**, Овчарук В. А. Регіональна методика визначення стоку весняних водопіль і дощових паводків річок басейну Вісли в межах України. Матеріали XXI наукової конференції молодих вчених ОДЕКУ, м. Одеса, 23-31 травня 2022 р. Одеса, 2022. С. 95-96

17. Ovcharuk V. A., **Martyniuk M. O.** Determination of inundation zones during floods in the Western Bug sub-basin using HEC-RAS software. *Flood-drought chain disasters and water ecological degradation in a changing environment workshop* (Zhuhai/online, 9-12 December, 2022). Zhuhai, 2022.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	15
РОЗДІЛ 1	
КОРОТКА ФІЗИКО-ГЕОГРАФІЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА БАСЕЙНУ ВІСЛИ В МЕЖАХ УКРАЇНИ.....	20
1.1 Географічне положення, рельєф.....	20
1.2 Інтразональні фактори формування максимального стоку річок в басейні р. Вісла.....	22
1.3 Основні зональні фактори формування максимального стоку на досліджуваній території.....	29
1.4 Гідрометеорологічна вивченість басейну р. Вісла в межах України та водний режим.....	40
Висновки до розділу 1.....	48
Перелік використаних джерел до розділу 1.....	50
РОЗДІЛ 2	
АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД МЕТОДІВ РОЗРАХУНКУ ХАРАКТЕРИСТИК МАКСИМАЛЬНОГО СТОКУ ВЕСНЯНИХ ВОДОПІЛЬ ТА ДОЦОВИХ ПАВОДКІВ.....	55
2.1 Формули редуційного типу.....	55
2.2 Формули об'ємного типу.....	59
2.3 Метод руслових ізохрон.....	62
2.4 Методи розрахунку максимального стоку, що застосовуються у світовій гідрологічній практиці.....	66
2.5 Регіональна методика розрахунку характеристик максимального стоку весняних водопіль і дощових паводків річок басейну р. Вісла в межах України.....	72
Висновки до розділу 2.....	74
Перелік використаних джерел до розділу 2.....	76

РОЗДІЛ 3

СТАТИСТИЧНИЙ ТА ГІДРОЛОГО-ГЕНЕТИЧНИЙ АНАЛІЗ
ХАРАКТЕРИСТИК МАКСИМАЛЬНОГО СТОКУ ВЕСНЯНИХ ВОДОПІЛЬ

ТА ДОЩОВИХ ПАВОДКІВ В БАСЕЙНІ ВІСЛИ В МЕЖАХ УКРАЇНИ.....80

3.1 Оцінка однорідності та стаціонарності часових рядів максимального стоку
весняного водопілля та дощових паводків річок басейну р. Вісла.....823.2 Дослідження циклічності максимального стоку весняного водопілля та
дощових паводків річок басейну р. Вісла.....923.3 Статистична обробка та узагальнення статистичних параметрів часових
рядів по максимальному стоку весняного водопілля та дощових паводків річок
басейну р. Вісла.....1003.4 Оцінка точності вихідної інформації по максимальному стоку весняного
водопілля та дощових паводків басейну р. Вісла.....110

Висновки до розділу 3.....114

Перелік використаних джерел до розділу 3.....116

РОЗДІЛ 4

РЕГІОНАЛЬНІ ОБГРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ОПЕРАТОРНОЇ МОДЕЛІ
ФОРМУВАННЯ МАКСИМАЛЬНОГО СТОКУ РІЧОК БАСЕЙНУ

Р. ВІСЛА.....119

4.1 Просторове узагальнення розрахункових шарів стоку весняного водопілля
і дощових паводків в басейні р. Вісла в межах України.....1214.2 Характеристики схилового припливу підчас максимального стоку
весняного водопілля і дощових паводків в басейні р. Вісла в межах
України.....127

4.3 Трансформаційні функції максимального стоку.....130

4.4 Перевірочні розрахунки максимальних модулів стоку дощових паводків та
весняних водопіль для річок басейну р. Вісла.....133

Висновки до розділу 4.....138

Перелік використаних джерел до розділу 4.....141

РОЗДІЛ 5

ОЦІНКА ГІДРОЛОГІЧНИХ РИЗИКІВ ЗАТОПЛЕННЯ В БАСЕЙНІ ВІСЛИ В МЕЖАХ УКРАЇНИ.....	144
5.1 Попередня оцінка гідрологічних ризиків затоплення.....	144
5.1.1 Сучасний стан досліджень ризиків затоплень.....	147
5.1.2 Фактори, що впливають на ризик затоплення.....	149
5.1.3 Визначення параметрів оцінки ризику затоплення.....	151
5.2. Моделі та методи оцінки ризику затоплення.....	152
5.3. Визначення зон затоплень.....	155
5.3.1 Вихідні дані.....	156
5.3.2 Створення цифрової моделі рельєфу.....	156
5.3.3 Методи проектування гідрографів весняного водопілля та дощових паводків.....	161
5.3.4 Реалізація методики проектування гідрографів весняного водопілля та дощових паводків.....	169
5.3.5 Обґрунтування методики проектування паводкових гідрографів в басейні р. Вісла в межах України за відсутності спостережень.....	173
5.4 Гідрологічне моделювання зони затоплення.....	174
5.5 Оцінка ризиків затоплення.....	179
Висновки до розділу 5.....	182
Перелік використаних джерел до розділу 5.....	184
ВИСНОВКИ.....	190
ДОДАТОК.....	194
ДОДАТОК А.....	195
ДОДАТОК Б.....	196
ДОДАТОК В.....	204
ДОДАТОК Г.....	206
ДОДАТОК Д.....	208
ДОДАТОК Е.....	210
ДОДАТОК Ж.....	212

	14
ДОДАТОК И.....	214
ДОДАТОК К.....	216
ДОДАТОК Л	221

ВСТУП

Дослідження небезпечних гідрологічних явищ, до яких відносяться паводки різного походження, зокрема дощові паводки та весняні водопілля, залишаються надзвичайно актуальними через можливі катастрофічні наслідки таких явищ. Для мінімізації наслідків важливе науково-практичне значення має оцінка та управління ризиками затоплення.

В процесі імплементації Директиви 2007/60/ЄС Європейського Парламенту та Ради від 23 жовтня 2007 року розроблені нормативні документи, такі як Методика попередньої оцінки ризиків затоплення, Методика розроблення карт загроз і ризиків затоплення, Порядок розроблення плану управління ризиками затоплення, головною метою яких є зменшення наслідків затоплення на життя і здоров'я людей, економіку, культурну спадщину.

В рамках відповідних документів необхідними завданнями є визначення зон затоплення при проходженні максимального стоку весняних водопіль та дощових паводків, а отже і розрахунок максимального стоку річок рідкісної імовірності перевищення.

Дисертаційна робота присвячена розробці методики створення карт зон затоплення територій, що мають потенційно значні ризики затоплення, на основі результатів розрахунку максимального стоку з застосуванням операторної моделі.

Метою роботи є оцінка ризиків затоплення територій в українській частині басейну р. Вісла за даними про характеристики максимального стоку паводків різного походження рідкісної імовірності перевищення, визначеними за удосконаленою методикою розрахунку максимального стоку.

Основні завдання дослідження:

1. Провести аналіз сучасних методів розрахунку характеристик максимального стоку та методів моделювання затоплень;

2. Виконати збір вихідної інформації, статистичний та гідролого-генетичний аналіз часових рядів максимального стоку, оцінити однорідність та стаціонарність, циклічність коливань максимального стоку річок досліджуваного басейну;

3. Провести розрахунок та узагальнити у просторі характеристики максимального стоку рідкісної імовірності перевищення весняного водопілля та дощових паводків досліджуваного басейну, обґрунтувати використання методики розрахунку за операторною моделлю;

4. Виконати гідрологічне моделювання проходження максимального стоку весняних водопілля та дощових паводків на територіях з потенційно значними ризиками затоплення з метою визначення площі затоплення та оцінки ризиків затоплення;

5. Виконати попередню оцінку ризиків затоплення на прикладі окремої ТПЗРЗ.

Об'єктом дослідження є максимальний стік весняних водопілля та дощових паводків річок басейну р. Вісла в межах України.

Предметом дослідження є максимальні витрати води весняних водопілля і дощових паводків рідкісної імовірності перевищення річок басейну р. Вісла в межах України та методи їх розрахунку, а також оцінка ризиків затоплення.

Методи дослідження включають статистичний та гідролого-генетичний методи аналізу даних, метод географічного узагальнення характеристик стоку, метод дистанційного зондування Землі при створенні цифрової моделі рельєфу та гідрологічне моделювання.

Наукова новизна роботи. В ході дисертаційного дослідження району басейну р. Вісла вперше отримані такі наукові результати:

- проаналізовані сучасні умови формування максимального стоку в басейні р. Вісла в межах України, зокрема, вперше отримані уточнені дані про площу лісового покриву водозбору за даними дистанційного зондування Землі;

- на основі оцінки статистичної однорідності та стаціонарності вихідних даних по максимальному стоку (з початку спостережень по 2015 рік) виявлені різнонаправлені тренди у часових рядах весняних водопіль і дощових паводків та ході циклічності паводків різного генетичного походження на річках досліджуваної території;

- обґрунтована методика розрахунку максимального стоку річок на базі операторної моделі формування стоку, зокрема, запропоновано два варіанти розрахунку – за наявності даних про заболоченість водозбору, та спрощений – за відсутності даних про заболоченість;

- розраховані та просторово узагальнені максимальні модулі схилового припливу весняних водопіль і дощових паводків рідкісної імовірності перевищення для досліджуваного басейну, вперше для досліджуваного басейну за допомогою ГІС розроблені карти ізоліній шарів стоку з виключенням впливу заболоченості, максимальних модулів схилового припливу та тривалості схилового припливу;

- створені та підготовлені до гідрологічного аналізу цифрові моделі рельєфу басейну р. Вісла в межах України та окремих територій з потенційно значним ризиком затоплення в межах української частини басейну р. Вісла;

- з використанням запроектованих гідрографів проведено гідрологічне моделювання та на його основі побудовані карти зон затоплення в басейні р. Вісла в межах України при наявності даних спостережень на прикладі р. Рата – с. Волиця;

- вперше на основі гідрологічного моделювання надано оцінку ризику затоплення за умов відсутності безпосередніх спостережень за стоком, на прикладі р. Рата – с. Пристань.

Удосконалено:

- базову структуру регіональної розрахункової формули максимального стоку весняних водопіль та дощових паводків;

- методику побудови карт зон затоплення на досліджуваній території.

Особистий внесок автора

Результати, наведені у дисертаційній роботі отримані автором особисто. Внесок автора у дисертаційну роботу та наведені публікації у співавторстві з науковим керівником полягає у зборі, обробці гідрологічної та метеорологічної інформації, аналізі результатів розрахунків максимального стоку та реалізації моделювання зон затоплень.

Апробація і публікація роботи

Дослідження проведене на кафедрі гідрології суші Одеського державного екологічного університету з 2020 по 2023 р. Результати обговорювалися на: IX - XII наукових конференціях молодих вчених ОДЕКУ (Одеса, Україна, 2020, 2021, 2022, 2023рр.); VIII Міжнародній науковій конференції молодих вчених: Екологія, неоекологія, охорона навколишнього середовища та збалансоване природокористування (26-27 листопада 2020 р., м. Харків); 3rd Baltic Earth Conference (Jastarnia/online, Poland, 2020); XVII-х Всеукраїнських Таліївських читаннях (Харків, 2021р); Другому Всеукраїнському гідрометеорологічному з'їзді (Одеса, Україна, 2021 р.); INTENSE Open Science Conference «Socio-ecological resilience across Eurasia – Innovation for sustainability transition» (Tartu, Estonia, 2021); Міжнародній науково-практичній конференції до 130-річчя від дня народження видатного польського дослідника Полісся Станіслава Малковського та у рамках проведення Водного форуму до 105-річчя Національного університету водного господарства та природокористування: Геологічне, гідрологічне та біологічне різноманіття Полісся, 13.10.2020 р.; 4th Hydrospace-GEOGloWS (Online, 2021); The International Commission of Water Quality (ICWQ) of IAHS workshop «Flood-drought chain disasters and water ecological degradation in a changing environment» (Zhuhai, China, 2022).

Публікації

За матеріалами дослідження опубліковано 17 наукових робіт, в тому числі, 1 стаття, що входить до періодичних наукових видань держави, яка входить до Європейського Союзу (та індексується у наукометричній базі

SCOPUS), 3 статті у наукових фахових виданнях України, 3 статті в інших виданнях, 10 тез і матеріалів доповідей на міжнародних і всеукраїнських наукових конференціях, з яких 5 у закордонних конференціях.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Окремі результати автора дослідження частково увійшли до науково-дослідної роботи кафедри гідрології суші Одеського державного екологічного університету: «Регіональні наукові дослідження в області гідрологічних розрахунків і прогнозів водного режиму річок і водойм України» ДР № 0118U001221, 2018-2022 рр.

Практична і наукова значимість

Результати дослідження, викладені у дисертаційній роботі, можуть бути використані при проведенні робіт по оцінці ризиків затоплення в басейні р. Вісла в межах України. Наведена в дисертаційній роботі методика може використовуватись науковими організаціями та організаціями у сфері розвитку водного господарства, управління та використання водних ресурсів.

Структура і обсяг дисертації

Дисертація складається зі вступу, 5 розділів, висновків, списку використаних джерел, що містить 176 найменувань і 10 додатків. Загальний обсяг дисертації становить 222 сторінки, у тому числі 85 рисунків і 16 таблиць.

РОЗДІЛ 1

КОРОТКА ФІЗИКО-ГЕОГРАФІЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА БАСЕЙНУ
ВІСЛИ В МЕЖАХ УКРАЇНИ

1.1 Географічне положення, рельєф

Вісла — найбільша річка, що впадає в Балтійське море. Вона бере свій початок у Західних Бескидах в Польщі від злиття Чорної та Білої Вісли і впадає у Гданську затоку. Басейн р. Вісли на території України розташований у межах Львівської та Волинської областей, вододіли проходять по грядам і пагорбам, тому чітко виражені.

Площа басейну Вісли в межах України становить 12892 км², що становить 2,13% території держави і налічує 3112 річок, загальна довжина яких складає 7356 км [1 – 4].

На території України басейн р. Вісла представлений двома суббасейнами – р. Західний Буг та р. Сян. Фізико-географічна карта розташування басейну р. Вісла в межах України представлені на рис. 1.1.

Найбільші праві притоки р. Сян – річки Вяр, Вишня, Шкло – у верхів'ях мають V-подібні долини з крутими схилами висотою більше 100 м. В середній та нижній течії долини трапецеїдальні, широкі (2-3 км), з крутими схилами.

Заплави річок лугові, зволожені, часто заболочені, шириною 0,2-0,5 км, місцями розширюються до 1-1,5 км. Щорічно, в період весняного водопілля та значних дощових паводків затоплюються на 2-3 тижня. Русла в верхів'ях вузькі (2-6 м), далі розширюються до 5-20 м; дно піщане, місцями замулене; глибини на перекатах – 0,3-0,5 м, на плесах 1,5 м; берега висотою 1-4 м. Середні ухили річок у межах 0,8-1,6 ‰, у верхів'ї р Сян – 5,98 ‰.

лугові, зволожені, шириною від 0,2 км до 1,5 км. Русла сильно звивисті, нерозгалужені, з піщаним чи замуленим дном і пологими берегами.

Водозбір р. Західний Буг розташований на Волино-Подільській височині, він асиметричний, з сильно розвиненим лівобережжям, має неправильну форму. Середня висота його 240 м, середній ухил 29 ‰. Поверхня водозбору має загальний ухил з південного сходу на північний захід. Довжина вододільної лінії 492 км. Найбільша довжина водозбору 117 км, середня ширина 60 км. Характеризується неоднорідним розчленованим рельєфом з наявністю гірських гряд та окремих пагорбів.

У південній частині басейну р. Західний Буг часто зустрічаються широкі заболочені долини.

Долина річки Західний Буг слабозвивиста, з помірно крутими схилами висотою 20-35 м біля витоку (с. Верхобуж). У нижній частині течії долина слабо виражена, заплава до м. Буськ шириною 50-100 м.

Зустрічаються каналізовані ділянки біля с. Верхобуж і в районі смт Добротвір з пересіченими, перпендикулярно направленими в руслі осушувальними та дренажними каналами.

Глибина річки в середньому складає 0,5-2,0 м, найбільша 6,1 м (с. Литовеж), найменша – 0,2 м (с. Верхобуж). Швидкість течії змінюється від 0,1 м/с до 1,5 м/с (с. Бужок), середня 0,2-0,5 м/с.

Біля смт Добротвір розташоване Добротвірське водосховище, що характеризується значними розмірами: довжина 15,1 км, найбільша ширина 0,9 км, глибина 8,5 м [5].

1.2 Інтразональні фактори формування максимального стоку річок в басейні р. Вісла

До категорії інтразональних факторів зазвичай відносять ті, які в цілому підкорюються географічній зональності, але в межах кожної природної зони можуть суттєво різнитися. На розглядуваній території до цієї категорії можна

віднести: ґрунтовий та рослинний покрив, залісеність, заболоченість, а також наявність карсту та озер.

Ґрунти. В геологічному відношенні басейн р. Вісла в межах України є палеозойською западиною, наповненою породами кам'яновугільного, крейдяного та четвертинного періодів. Кам'яновугільні відклади представлені товщою сланців що чергуються, вапняків та піщаників з прошарками вугля [1].

Крейдяні відклади характеризуються широкими площами та великою потужністю (300 – 400 м) і представлені більшою частиною мергелем, білою крейдою, глауконітовими пісками, піщаними вапняками, піщаниками та конгломератами.

Ґрунти у басейні р. Вісла в межах України переважно легко- та середньосуглинкові, на південному сході частіше супіщані, піщані та піщано-глинисті, у північно-східній частині лучні, лучно-болотні, болотні та торф'яно-болотні. Піщано-глиняні відклади та перекриваючі крейдяні товщі сприяють поглинанню атмосферних опадів та талих вод і трансформації їх у ґрунтовий та підземний стік. На рівнинах, де річки слабо дрениують крейдяну товщу, джерела майже не зустрічаються, або зустрічаються дуже нечасто. Тут виходи ґрунтових вод сприяють заболочуванню заплавл річок та утворенню торф'яників, потужність яких на окремих ділянках перевищує 2 – 3 м [1].

Карст – сукупність процесів і явищ, що спостерігається на ділянках земної поверхні, ґрунт яких складається з розчинних грубозернистих гірських порід і які виражаються в розчиненні гірських порід і утворенні в них порожнин, а також своєрідних форм рельєфу.

Карст на території басейну р. Вісла в межах України характеризується одночасно широким розвитком на значних площах, а також розміщенням окремих форм в долинній мережі.

Прибузький карстовий район включає частину басейну р. Західного Бугу, розташовану в області поширення мело-мергельних відкладень крейди. Південно-західна частина басейну характеризується карбонатними та гіпсовими відкладами, що також схильні до карстування (рис. 1.2) [6,7].



Рисунок 1.2 – Схема карстових районів на території України [8]

Карст спричиняє перерозподіл запасів підземних вод між водозборами і викликає проблеми в розрахунках річкового стоку.

Поглинання стоку в річкових долинах або фільтрації річкових вод в тріщинуваті породи через водопроникний алювій, а також підживлення річок карстовими водами пояснює відмінності в показаннях стоку, отриманих експедицією УкрНІГМІ в 1967 р. Ці дані вказують на те, що водність Західного Бугу значна в верхів'ях (модуль мінімального стоку у Сасові $3,47 \text{ л/с}\cdot\text{км}^2$) і знижена вздовж течії річки на північ (модуль мінімального стоку у Кам'янки - Бузької зменшується в чотири рази) [7].

Забезпеченість приток Західного Бугу підземним живленням різна: найбільша у р. Луга (0,30) - в її долині багато джерел карстових вод, найменша у річок Кам'янка та Холоївка (0,05) [1].

Басейн р. Вісла в межах України у північній та центральній частині охоплює Західно-Волинський (VI-A-1), Мало-Поліський (VI-A-3) та Придністровський Лівобережний (VI-B-2) карстові райони, що

характеризуються крейдяними відкладами. На південному заході знаходиться Стебникський (II-B-1) карстовий район з переважаючими карбонатними породами, гіпсами та ангідритами та Складчато-флішевий (II-A-3) район з різновіковими карбонатними породами, що значно менше схильні до карстування.

Озера. У басейні налічується 559 озер та замкнених западин. Ряд озер, розташованих у западинах крейдяного рельєфу, мають змішане живлення (снігове, дощове та ґрунтове), більшою мірою вони замулені і заболочені. Озера, особливо карстового походження, мають правильну форму, живляться переважно підземними водами, що надходять у вигляді потужних висхідних джерел. Водозбори таких озер дуже малі, стікаючі з їх поверхні води не забезпечують постійного живлення озер [1].

Рослинність. Один з основних факторів, від яких залежить гідрологічний режим території, наряду з кліматичними, ґрунтово-геологічними та геоморфологічними є рослинність. Рослинність кількісно і якісно перерозподіляє опади та значно змінює гідрологічний режим території, переводить поверхневий стік в ґрунтовий, затримує частину опадів на своїй поверхні, витрачає вологу на транспірацію.

Географічне положення, ґрунтово-кліматичні умови, висотний розподіл досліджуваної території сприяли формуванню багатого та різноманітного рослинного покриву. Територія району басейну річки Вісла знаходиться у трьох фізико-географічних зонах: зоні мішаних лісів (Українське Полісся), що характеризується наявністю переважно соснових та сосново-дубових лісів, лісостеповій зоні з розповсюдженням широколистяних, зокрема дубових, грабових та дубово-грабових лісів, та у зоні висотної поясності Українських Карпат.

В заболочених частинах басейну р. Вісла в межах України переважає вологолюбна та болотна рослинність – верба, осока, мохи та лишайники.

Головним типом рослинності Українських Карпат, на території яких частково знаходиться верхня частина басейну р.Західний Буг є лісова. Тут переважають смерекові та ялинові ліси [1].

Важливим питанням в гідрологічних дослідженнях є вплив інтразональних факторів на стік річок. Основні гідрографічні характеристики водозборів річок України свого часу були описані й представлені в монографічному довідковому виданні «Ресурсы поверхностных вод СССР» та у довідниках «Основные гидрологические характеристики». Зокрема, для басейну р. Вісла в межах України ці дані представлені у Томі 6. Вип.1 [1].

Серед основних гідрографічних характеристик басейнів річок представлені лісистість, заболоченість, озерність та розораність, які були отримані в основному по великомасштабним топографічним картам видання 1941, 1945–47 рр (додаток А). Для деяких постів використовувались більш нові великомасштабні карти, зіставлені за матеріалами аерофотозйомки [9].

Наведені у додатку А характеристики, такі як озерність, лісистість, заболоченість та розораність були визначені (у %) як відношення сумарної площі досліджуваних об'єктів (окремо озер, боліт, лісів та розораних ділянок) до площі басейну. Площі досліджуваних об'єктів вимірювались по великомасштабним картам палеткою.

Звичайно, для сучасних досліджень потрібно користуватися актуальними даними. Очевидно, що з 1940х років площі лісових насаджень, боліт та ставків могли значно змінитися, що і зумовлює необхідність уточнення цих даних.

Одним з сучасних інструментів, який можна використовувати для цих цілей є ГІС-технології, зокрема, нами в якості програмного забезпечення використовувалась географічна інформаційна система QGIS.

В якості вихідних даних використані дані про залісеність по 15 гідрологічним постам в басейні р. Вісла (в межах України). Залісеність вказана для водозбірних басейнів ділянки річки, замикаючим створом якої є гідрологічний пост (додаток А). Для дослідження площі, зайнятої лісовими

насадженнями, в басейні р. Вісла в межах України в якості вихідної інформації використовувались знімки сенсора OLI Landsat8 по 7 каналам, отримані за допомогою ресурсів USGS (<https://earthexplorer.usgs.gov>) та Libra (<https://libra.developmentseed.org/>), і надалі канали зливались в один повнокольоровий знімок [9,10].

Знімки обирались за період з травня по серпень 2018 р., щоб захопити період вегетації більшості рослин і максимальний розвиток листяного покриву [11].

Як основний інструмент використовувався плагін SemiAutomatic Classification QGIS. Через значну неоднорідність лісу та досить велику площу досліджуваної території проводити автоматизовану класифікацію за допомогою спектральних індексів недоречно, адже в такому випадку варто очікувати на значні похибки [12].

Отже, за допомогою плагіну і на основі знімків високої роздільної здатності вручну формувалась набір тренувальних ділянок для подальшої класифікації шляхом виділенням спектральних сигнатур (характерних еталонних площ).

Таким чином, скориставшись плагіном SemiAutomatic Classification була проведена напівавтоматична класифікація знімку та визначені ділянки з рослинним покривом на території басейну р. Вісла в межах України (рис. 1.3).

Подальшою задачею стало порівняння отриманих даних з тими, що наводяться у «Ресурсах поверхностных вод СССР». Для цього були окремо виділені басейни, що відносяться до кожного досліджуваного гідрологічного поста і розрахована площа лісу на цих басейнах. Залісеність водозборів була визначена (у %) як відношення сумарної площі лісів до площі басейну. Отримані результати занесені в табл. 1.1.

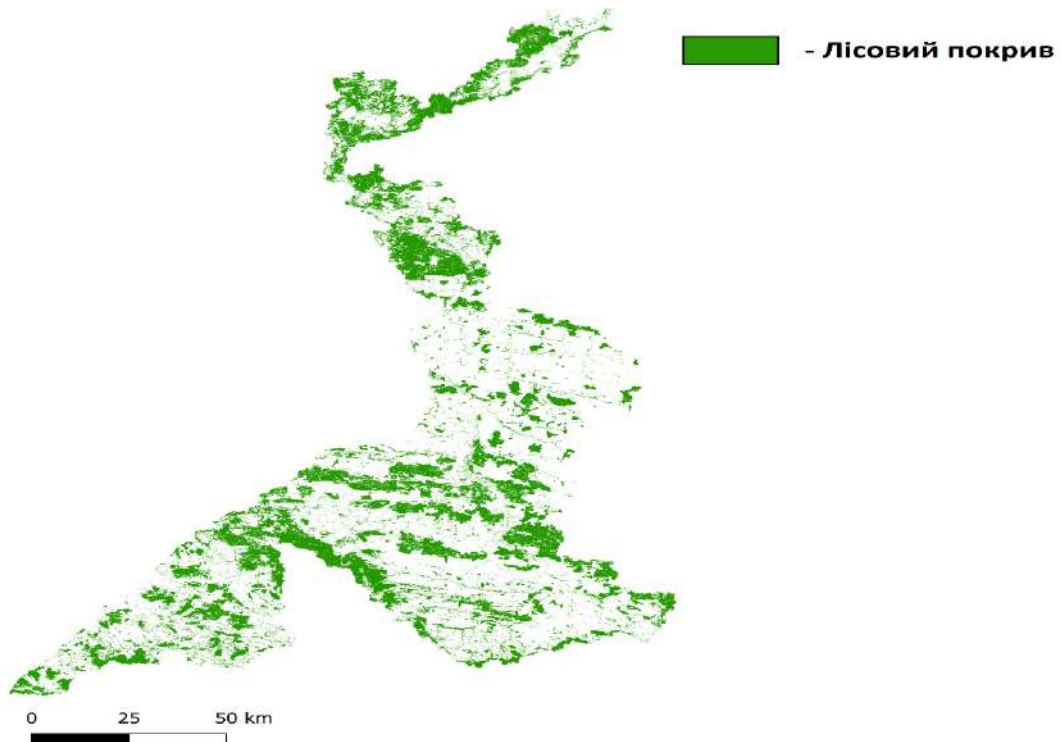


Рисунок 1.3 – Лісовий покрив у басейні р. Вісла в межах України [9,10]

Таблиця 1.1 – Порівняння лісистості в басейні р. Вісла в межах України [9,10]

№ за/п	Річка – пост	F, км ²	f _л % РПВ	f _л % GIS	Δf _л %
1	Желдець - с. Лугове	246	22	17	-5
2	стр. Кам'янка - м. Кам'янка-Бузька	141	10	8	-2
3	Луга - м. Володимир-Волинський	1270	10	10	0
4	Полтва - м. Буськ	1440	12	8	-4
5	Рата - с. Межиріччя	1740	21	16	-5
6	Рата - с. Волиця	1140	17	15	-2
7	Шкло - м. Яворів	236	21	19	-2
8	Солокія - м. Червоноград	931	11	10	-1
9	Свиня - м. Жовква (м.Нестерів)	98,6	9	10	-1
10	Вишня - с. Твіржа	562	5	8	+3
11	Західний Буг - м. Кам'янка-Бузька	2350	15	12	+3
12	Західний Буг - с. Литовеж	6740	-	10	0
13	Західний Буг - смт Сасів	107	6	8	-2
14	Західний Буг - м. Сокаль	6250	12	11	-1
15	Золочевка - с. Золочевка	90	25	21	-4

Як видно з табл. 1.1, у більшості випадків залісеність, визначена за допомогою використання GIS-технологій, на 1-5% менша значення залесеності, наведеного в «Ресурсах поверхностных вод СССР» [9,10].

Лише для таких постів як р. Свиня - м. Жовква (м.Нестерів), р. Вишня - с. Твіржа та р. Західний Буг - смт Сасів значення залісеності незначно зросло.

Таким чином, аналіз отриманих результатів показав, що дані про залісеність, отримані за допомогою проведення класифікації супутникових знімків, відрізняються від даних, наведених у літературних джерелах, але незначно.

Тим не менш, той факт, що практично у всіх випадках залісеність водозборів зменшилась за останні 70 років, необхідно враховувати при оцінці регулюючої здатності лісових масивів в періоди проходження паводків різного походження на річках досліджуваної території.

Окрім залісеності також для тих водозборів, по яких були відсутні дані про середню висоту водозбору та ухил річки, ці характеристики визначені за допомогою цифрової моделі рельєфу за даними USGS EarthExplorer [13].

1.3 Основні зональні фактори формування максимального стоку на досліджуваній території

Як відомо, формування стоку річок відбувається під впливом великої кількості взаємопов'язаних між собою факторів. Тим не менш, за визначенням видатного географа і кліматолога, академіка О.І. Воейкова: «Річки є продуктом клімату», отже кліматичні, або зональні фактори є основними при формуванні стоку річок будь-якої території, зокрема й максимального.

Регіон досліджень розташований у зоні впливу континентальних і атлантичних повітряних мас помірних широт і характеризується Атлантико - континентальним кліматом, що має перехідний характер - від помірно-теплого вологого Західноєвропейського до континентального Східноєвропейського [3].

Характерними його рисами є значна кількість опадів в межах від 500 мм до 800 мм, при чому 65-75% опадів випадає в тепле півріччя; помірні річні амплітуди температур повітря, що не перевищують 24°C, м'яка зима (середня температура - 3,5°-5°C) з частими відлигами і нестійким сніговим покривом, помірно-тепле літо з достатньою кількістю опадів під час вегетаційного періоду.

На території басейну р. Вісла в межах України існує досить розвинена метеорологічна мережа, що налічує 6 метеорологічних станцій, які переважно зосереджені в центральній та південній частині басейну (рис. 1.4).

Аналіз даних приземної температури повітря та опадів, отриманих на метеорологічних станціях, розташованих в різних частинах басейну, дозволяють отримати інформацію про кліматичну ситуацію на досліджуваній території.

Середня річна температура повітря становить від 6,7°C до 7,5°C. Максимальна температура +38°C, мінімальна -39°C. Найхолоднішим місяцем є січень, а найтеплішим – червень.

Середня тривалість періоду наявності снігового покриву становить 80 – 100 днів за рік, а кількість днів на рік з температурою нижче 0°C знаходиться в межах від 50 днів до 60 днів [14].

Водозбір р. Вісла в межах України знаходиться в зоні достатнього зволоження, але розподіл річних опадів нерівномірний за територією. Найбільша кількість опадів спостерігається у верхів'ях р. Західний Буг (Розточчя) з річною нормою опадів 800 мм.

На північний захід, зі зменшенням висоти водозбору кількість опадів знижується, і у Волинському Поліссі становить 650 мм. Випаровування з поверхні ґрунту становить в середньому 550-600 мм, а з поверхні води – до 550 мм [15].

Термічний режим залежить від радіаційних факторів та властивостей повітряних потоків, які надходять на дану територію; особливу роль відіграють підстильна поверхня, рослинність та сніговий покрив.

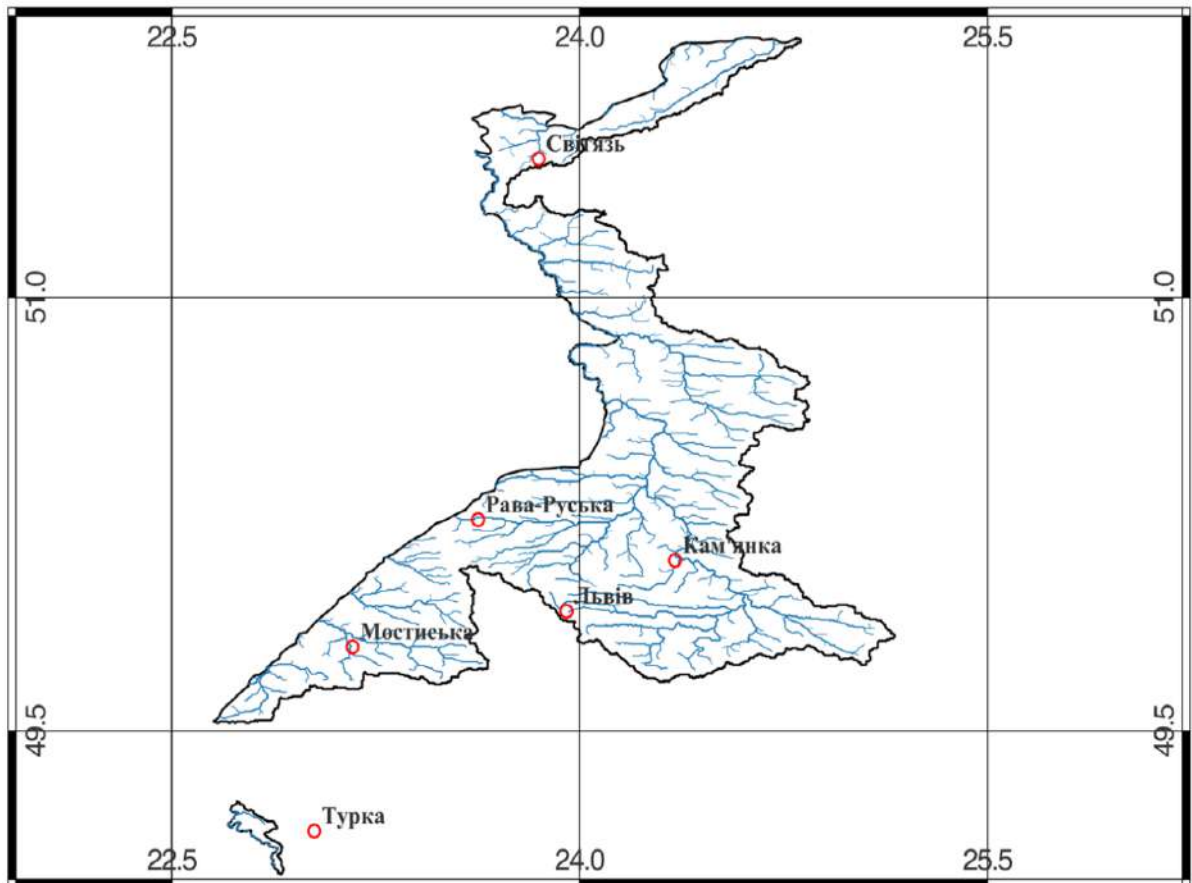


Рисунок 1.4 – Карта-схема розташування метеорологічних станцій в басейні р. Вісла в межах України

В холодний період року значну роль відіграють циркуляційні процеси. В результаті циркуляції відбувається часта зміна повітряних мас, внаслідок чого температура холодного сезону відрізняється більшою нестійкістю. В літній період циклонна діяльність затухає, температура становиться більш стійка. Головну роль грає місцева трансформація повітряних мас.

Для аналізу багаторічного ходу температур повітря та опадів у басейні р. Вісла в межах України були обрані 3 метеорологічні станції: Світязь – розташована у північній рівнинній частині басейну, Рава-Руська – в центральній рівнинній частині басейну і Турка, що розміщена на півдні басейну у гірській частині (рис. 1.5, 1.6).

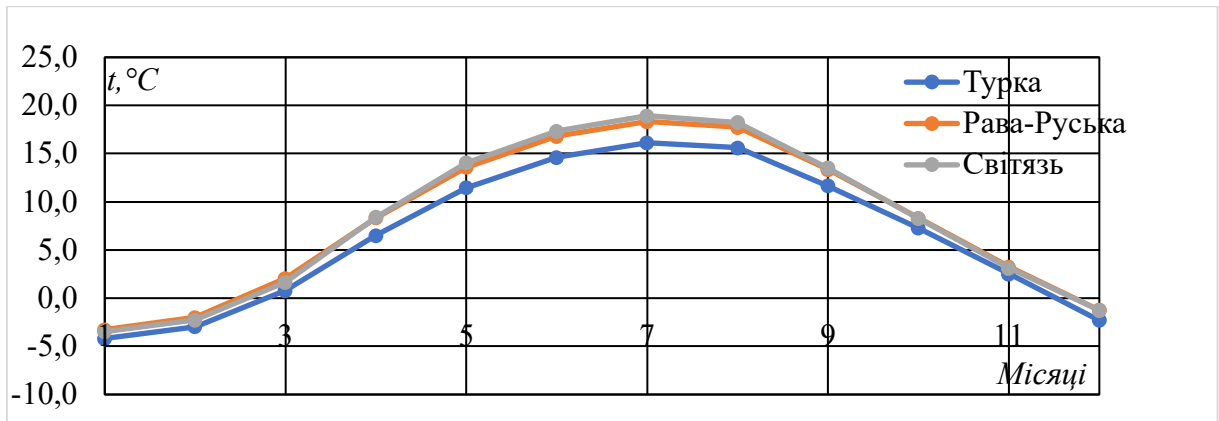


Рисунок 1.5 – Багаторічний хід температури приземного шару повітря у басейні р. Вісла в межах України

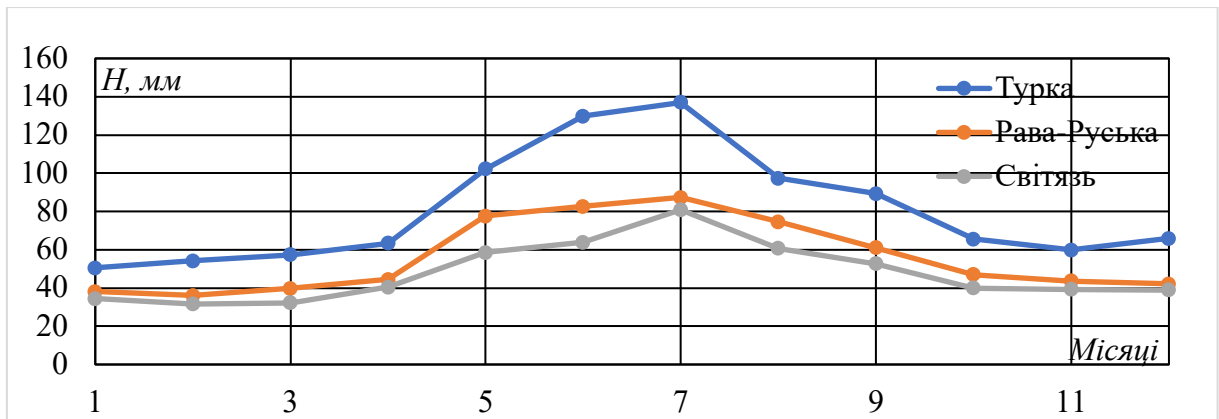


Рисунок 1.6 – Внутрішньорічна динаміка кількості опадів у басейні р. Вісла в межах України

Аналіз ходу температури повітря та опадів (рис. 1.5, 1.6) показує значну їх залежність від географічного розташування метеорологічних станцій, а саме від висотного положення. Так, впродовж всього року температура була нижчою на станції Турка, яка, як вже зазначалося вище, знаходиться в гірському районі.

Опади також значною мірою залежать від висоти водозбору, що добре видно з рис. 1.6. Місячна сума опадів за багаторічний період найбільша у районі Українських Карпат (Турка), поступово знижується зі зниженням висоти у центральній частині басейну (Рава-Руська) та сягає мінімуму в нижчій частині басейну, в районі Волинського Полісся (Світязь). Також характерний розподіл спостерігається і в річному ході місячних сум опадів, які

у теплі місяці року збільшуються саме у гірському районі і сягають 137 мм у липні. Максимальна місячна сума опадів на станції Світязь також припадає на липень і становить 81 мм. Мінімальні суми опадів спостерігаються на всіх станціях у лютому і коливаються від 32 мм (Світязь) до 54 мм (Турка).

Температурний режим та опади в умовах кліматичних змін. Кліматичні зміни є надзвичайно актуальною проблемою у XXI сторіччі. Прояви змін клімату значною мірою відображаються у мінливості температурного режиму, кількості атмосферних опадів, що вже суттєво впливає на гідрологічний режим річок, та у зростанні повторюваності та інтенсивності небезпечних гідрометеорологічних явищ.

В гідрологічних дослідженнях перехідним роком вважається 1989 р., після якого кліматичні зміни суттєво вплинули на гідрологічний режим річок України [16].

Для визначення впливу кліматичних змін побудовані графіки порівняння багаторічного ходу приземних температур повітря та сум опадів за два періоди – з 1961 по 1990, та з 1991 по 2020 роки за даними по трьом метеорологічним станціям – Світязь, Рава-Руська та Турка (рис. 1.7 – 1.12)

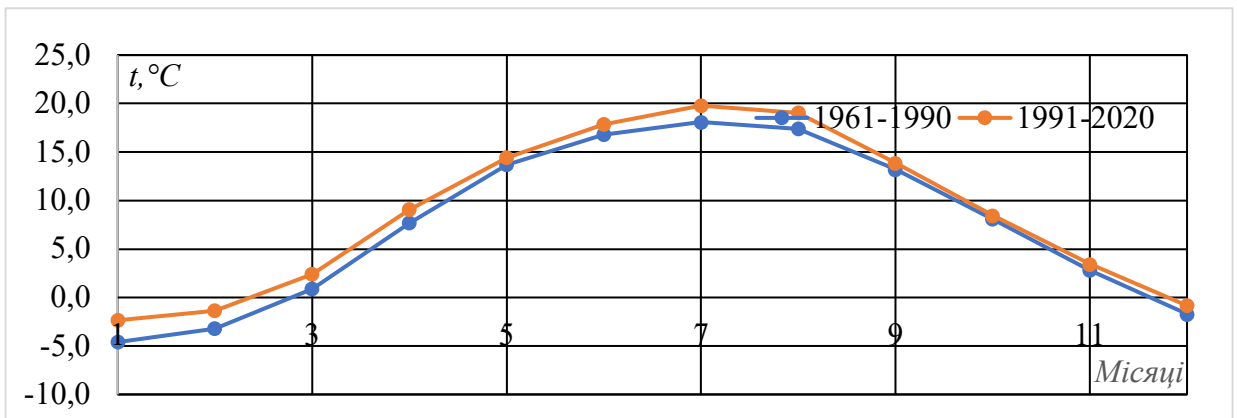


Рисунок 1.7 – Порівняння багаторічного ходу приземних температур повітря на станції Світязь за різні періоди

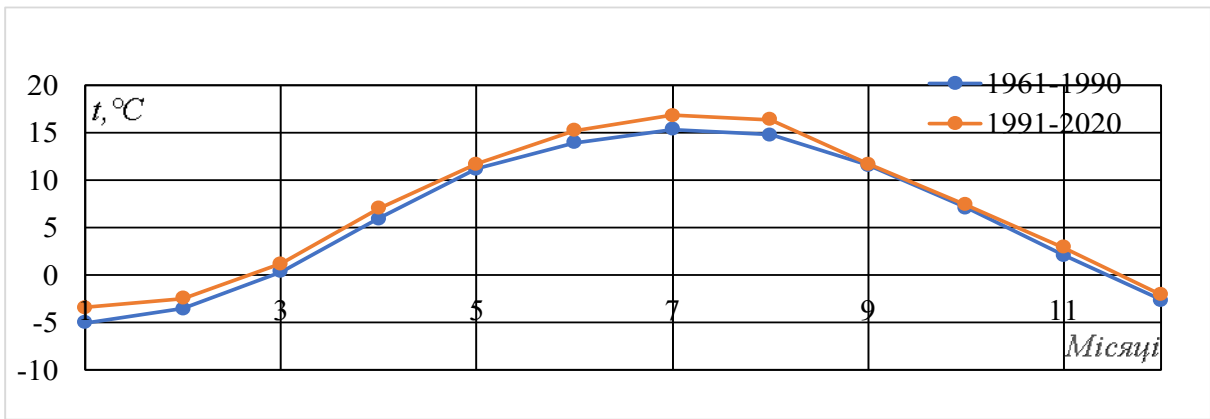


Рисунок 1.8 – Порівняння багаторічного ходу приземних температур повітря на станції Рава-Руська за різні періоди

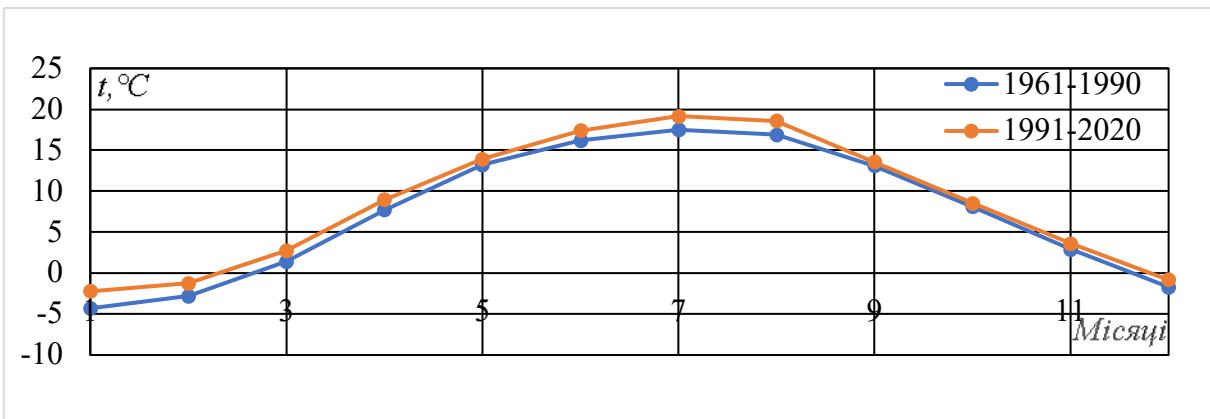


Рисунок 1.9 – Порівняння багаторічного ходу приземних температур повітря на станції Турка за різні періоди

Як видно з графіків (рис. 1.7 – 1.9), на метеорологічних станціях басейну р. Вісла в межах України спостерігається збільшення середньомісячних температур повітря за період спостережень з 1991 по 2020 рр. у порівнянні з періодом з 1961 по 1990 рр. Найбільше зростання середньомісячної температури приземного шару повітря спостерігається в січні на трьох метеорологічних станціях і складає 1,6 – 2,2 °С, найменше – вересні-жовтні 0,3 – 0,6 °С. Це свідчить зокрема про більш теплі зими за період з 1991 по 2020 рр., що може призводити до меншого накопичення снігозапасів та промерзання ґрунту. Причому, різниця подібна для всіх станцій, з чого можна зробити висновок, що залежності від висоти водозбору не спостерігається.

Аналіз динаміки місячних сум опадів на території досліджуваного басейну за різні періоди не показав значного збільшення чи зменшення значень (рис. 1.10-1.12). Водночас, графіки місячних сум опадів для всіх метеорологічних станцій за період з 1991 по 2020 рр. мають більш розпластаний вигляд у порівнянні з першим періодом спостережень, декількома піками, тобто, опади за цей період характеризуються більшою рівномірністю випадання впродовж року.

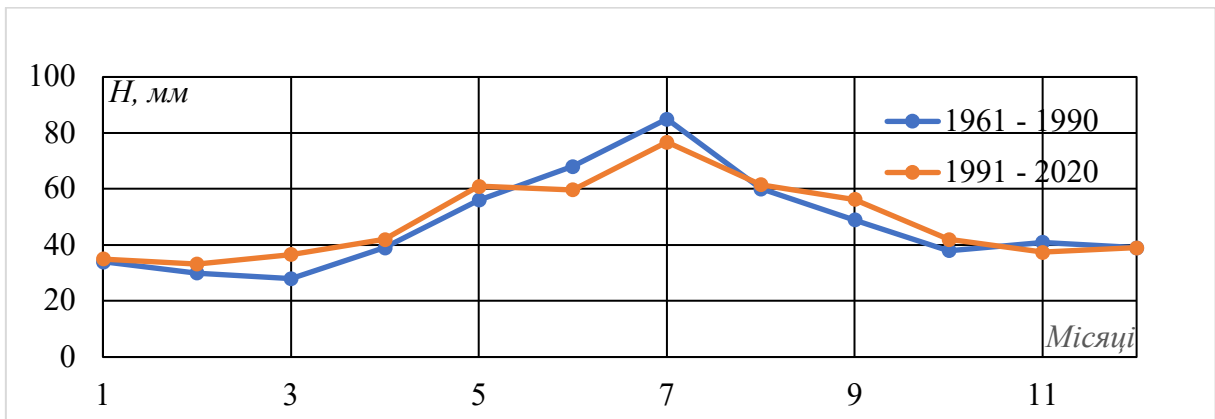


Рисунок 1.10 – Порівняння динаміки місячних сум опадів на станції Світязь за різні періоди

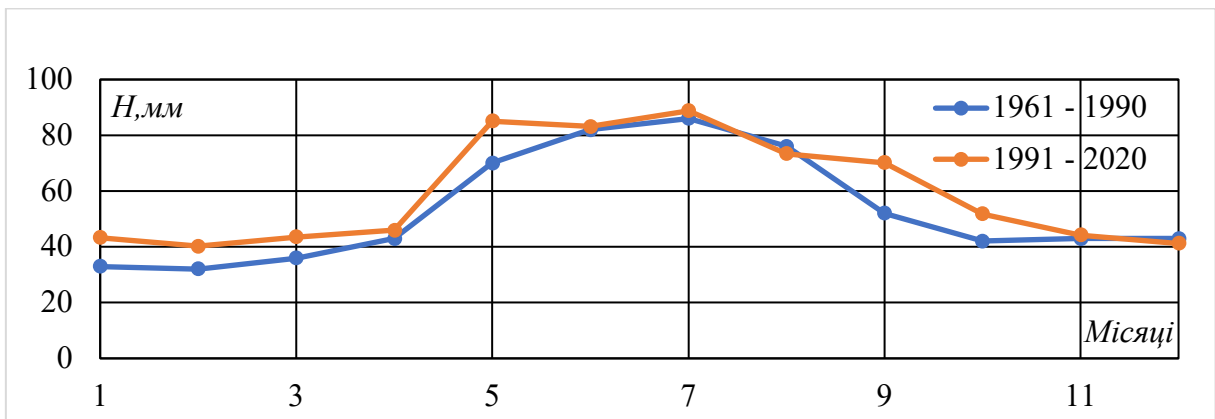


Рисунок 1.11 – Порівняння динаміки місячних сум опадів на станції Рава-Руська за різні періоди

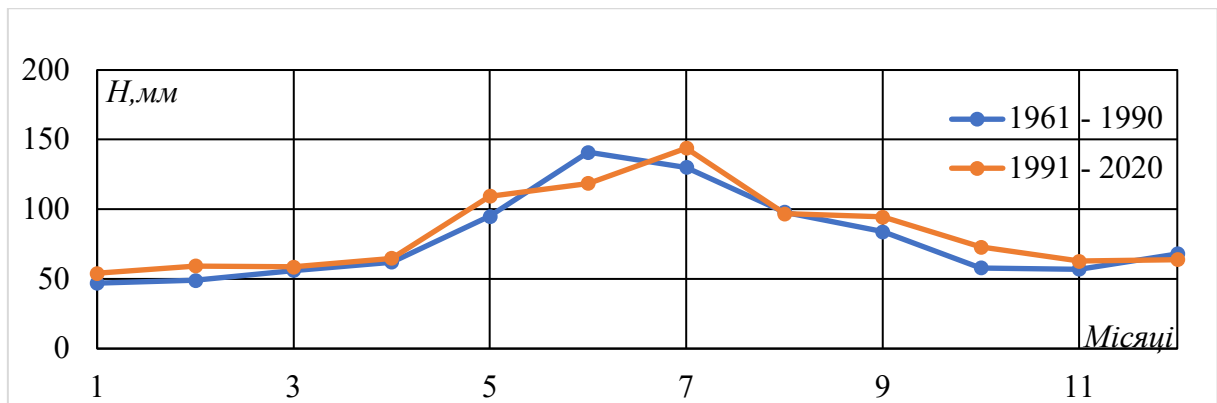


Рисунок 1.12 – Порівняння динаміки місячних сум опадів на станції Турка за різні періоди

Майбутні зміни клімату. Перші дослідження стосовно впливу майбутніх змін клімату на водність річок України були отримані А.І. Шерешевським у 1998 р. [17], розрахунки проводились за моделями GDFL, MPI. Далі оцінка можливих змін водних ресурсів України виконувалась водно-балансовим методом [18] з використанням результатів прогнозу кількості опадів та температури приземного шару повітря за сценарієм А1В. Прогноз зменшення водних ресурсів України з використанням водно-балансової моделі та кліматичних сценаріїв RCP 4.5 Та RCP 8.5 наводиться в роботах Н.С. Лободи [19]. Оцінка зміни річного стоку річок басейну Західного Бугу проводились у 2010 р. [20], за результатами яких прогнозовано зменшення стоку на 24,5 – 28%. В.В. Гребенем також у 2010 р. [21], оцінено зміни в розподілі максимального стоку між весняним водопіллям та дощовими паводками, зокрема й для Бузько-Дністровської ландшафтно-гідрологічної провінції.

Для ілюстрації прогнозних оцінок зміни температури приземного шару повітря та кількості опадів в басейні р. Вісла в межах України використані два сценарії RCP (Representative Concentration Pathways), які відповідають зміні концентрації парникових газів в атмосфері: RCP 8,5 - найбільш песимістичний сценарій зміни клімату зі збільшенням середньої глобальної температури приземного шару повітря до 2100 років приблизно на 4,5 °С від доіндустріального рівня, і RCP2.6 – найбільш оптимістичний із збільшенням

на 1,5 °C [22]. Прогнозні дані за двома сценаріями розраховані з 2005 до 2050 року для трьох метеорологічних станцій – Світязь, Рава-Руська та Турка з включенням історичних даних з 1979 р. по 2004 р. Графіки, що відображають багаторічну динаміку коливань температури повітря та кількості опадів побудовані з використанням сервісу KNMI (Royal Netherlands Meteorological Institute) Climate Explorer, призначеного для статистичного аналізу кліматичних даних. Додаток є частиною Регіонального кліматичного центру ВМО в KNMI [23]. Прогнозні дані щодо змін клімату отримані за даними моделі GCM: CMIP5 (IPCC AR5 Atlas Subset) (рис.1.13 – 1.18).

В ході аналізу отриманих прогнозних моделей, наведених на рис. 1.13 – 1.15 можна відмітити, що прогнозовані температури повітря по трьом метеорологічним станціях суттєво не відрізняються. На всіх отриманих графіках спостерігається зростання температури повітря за обома сценаріями. За сценарієм RCP 2.6 у 2050 р. середньорічна приземна температура на досліджуваній території прогнозується на рівні +9,8 °C, а за сценарієм RCP 8.5 + 10,9°C. Також варто відмітити, що до 2036 р. приземна температура повітря за обома сценаріями прогнозується однакова, і становитиме +10°C.

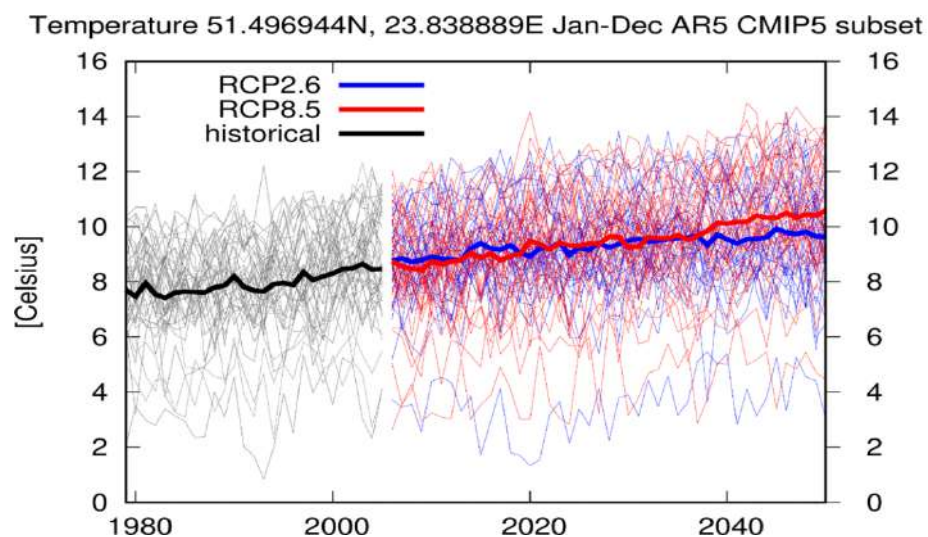


Рисунок 1.13 – Багаторічна динаміка коливань приземної температури за прогнозними сценаріями RCP 8.5 та RCP 2.6, на основі моделі GCM: CMIP5 на станції Світязь [22]

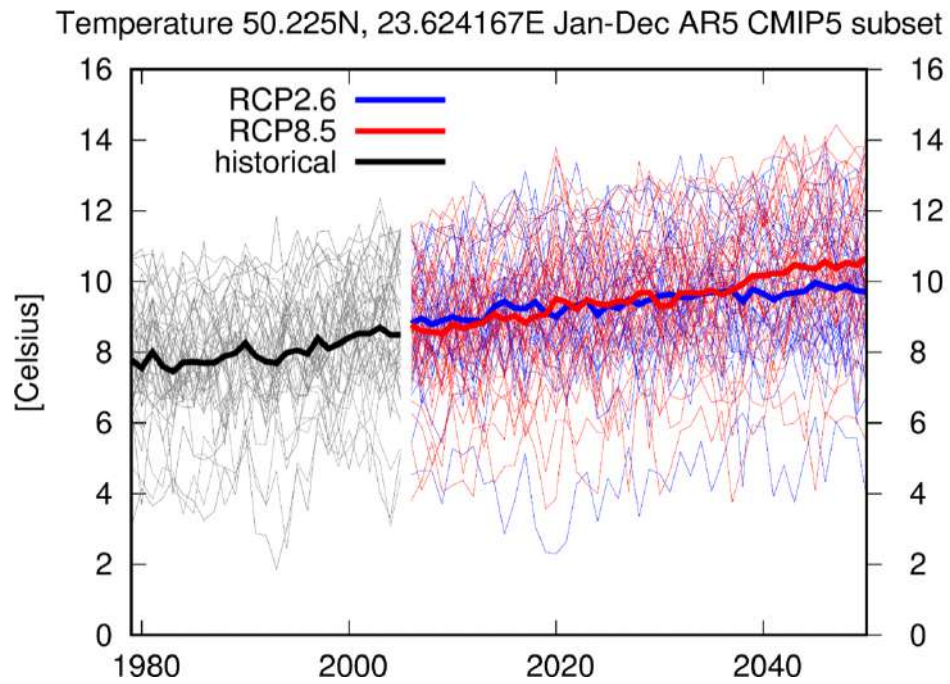


Рисунок 1.14 – Багаторічна динаміка коливань приземної температури за прогнозними сценаріями RCP 8.5 та RCP 2.6, на основі моделі GCM: CMIP5 на станції Рава-Руська [23]

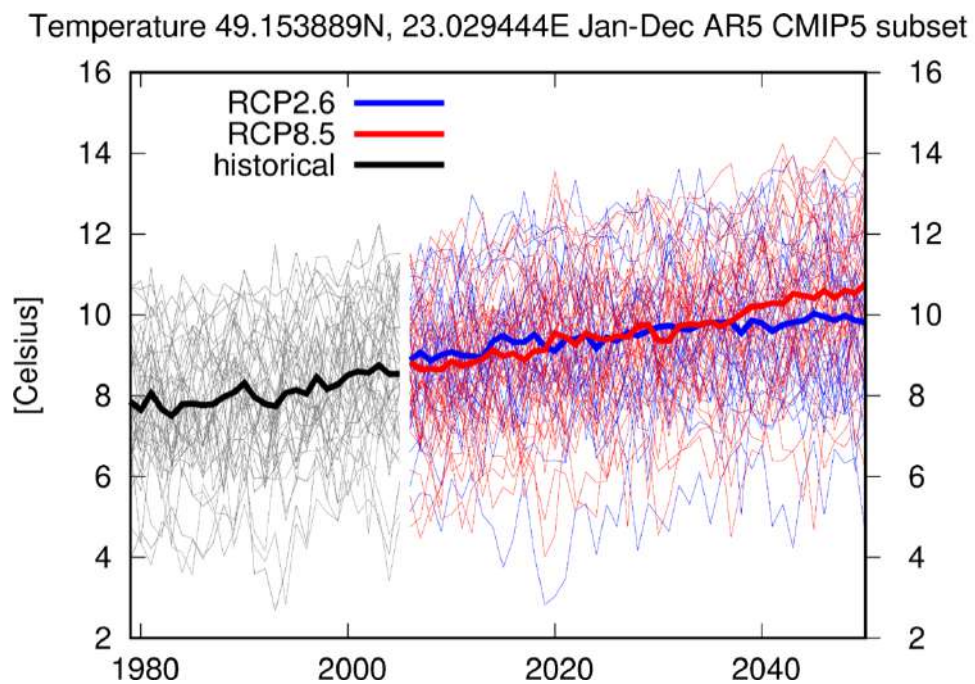


Рисунок 1.15 – Багаторічна динаміка коливань приземної температури за прогнозними сценаріями RCP 8.5 та RCP 2.6, на основі моделі GCM: CMIP5 на станції Турка [23]

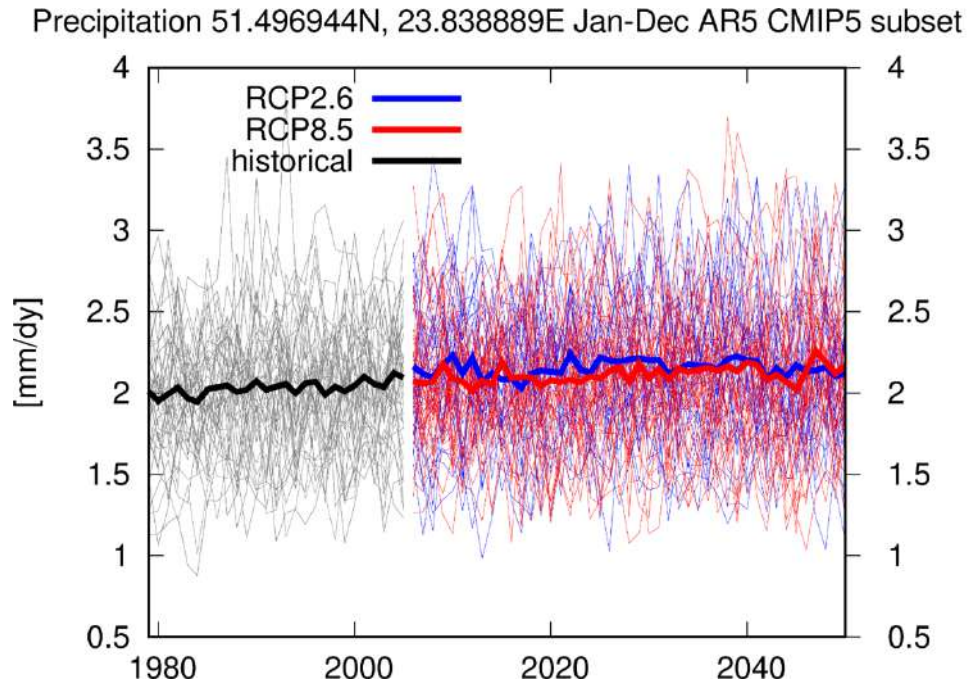


Рисунок 1.16 – Багаторічна динаміка коливань кількості опадів за прогнозними сценаріями RCP 8.5 та RCP 2.6, на основі моделі GCM: CMIP5 на станції Світязь [23]

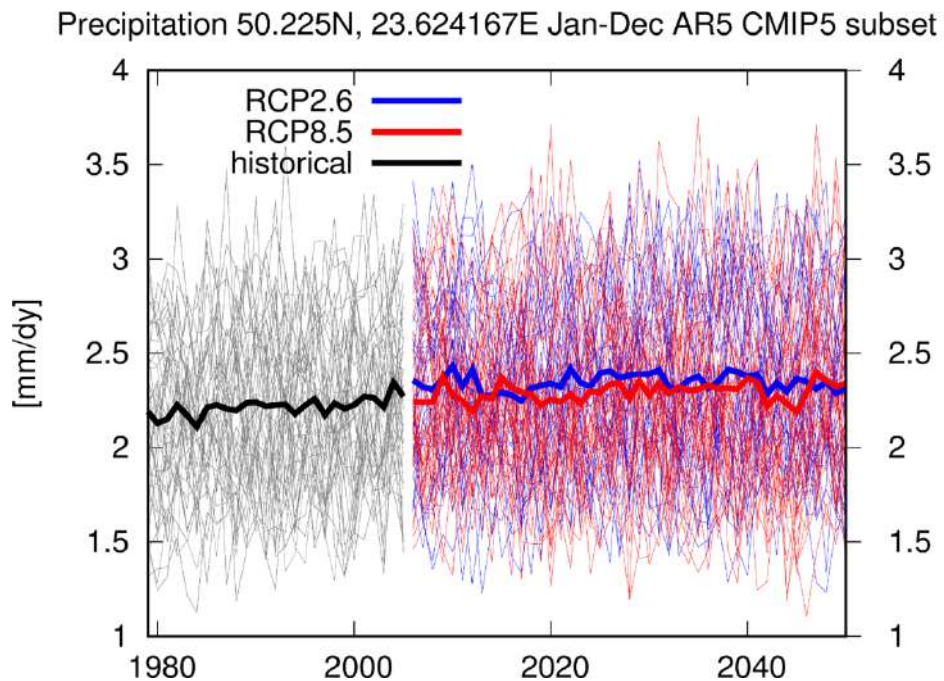


Рисунок 1.17 – Багаторічна динаміка коливань кількості опадів за прогнозними сценаріями RCP 8.5 та RCP 2.6, на основі моделі GCM: CMIP5 на станції Рава-Руська [23]

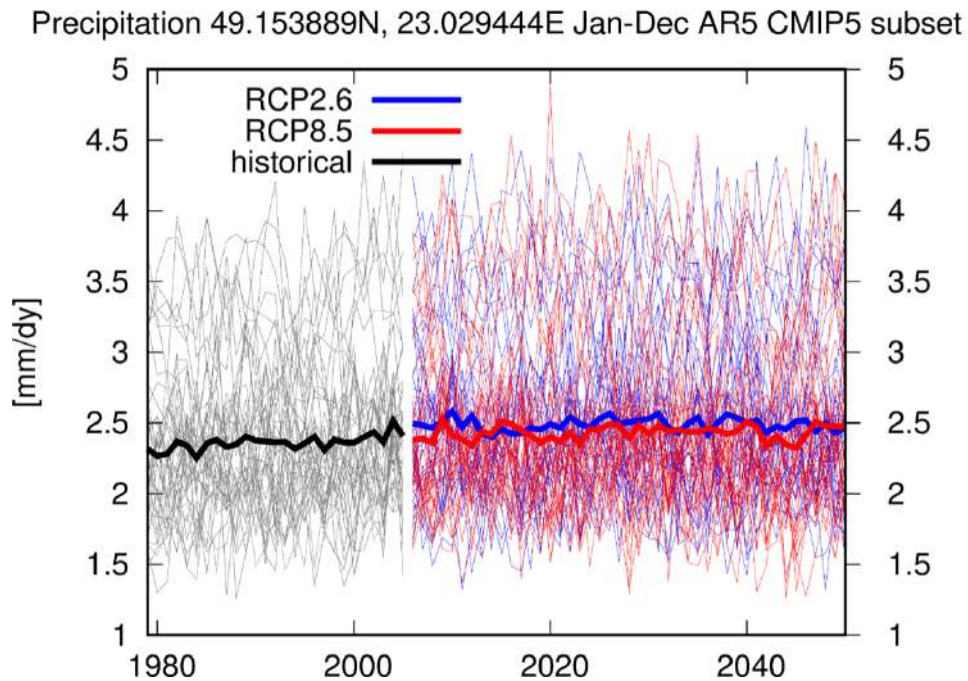


Рисунок 1.18 – Багаторічна динаміка коливань кількості опадів за прогнозними сценаріями RCP 8.5 та RCP 2.6, на основі моделі GCM: CMIP5 на станції Рава-Руська [23]

Прогнозні сценарії RCP 2.6 і RCP 8.5 для атмосферних опадів характеризуються незначним зростанням середньорічних значень (рис. 1.16 – 1.18). Як видно з графіків, при прогнозі до 2050 не відзначається суттєвої різниці ходу річних сум опадів за двома сценаріями, в середньому на 2050 рік прогнозована кількість опадів збільшується лише на 0,2 мм на всіх досліджуваних метеорологічних станціях при обох сценаріях.

1.4 Гідрометеорологічна вивченість басейну р. Вісла в межах України та водний режим

Перші історичні відомості про паводки у басейні р. Вісла знаходять у різноманітних хроніках, архівах та літописах від 988 року. Кількість друкованих джерел, що збереглися, суттєво збільшується на початку XVI сторіччя, а з початку XIX сторіччя велике розповсюдження набуває картографічна інформація про масштаби паводків. Дослідженню цих джерел

присвячені роботи вчених університету імені Яна Казимира (Львівський державний університет ім. Івана Франка) [24, 25]. Починаючи з 1919 року за вимірювання кількості опадів, рівнів води та дослідження паводків відповідав Інститут Гідрології та Метеорології (згодом – Інститут Метеорології та Водного Управління Польщі).

Найбільш повно історія вивчення паводків і водопіль у всьому басейні р. Вісла описана в роботах [26, 27].

В українській частині басейну р. Вісла затоплення внаслідок паводків різного походження також є серйозною проблемою, яка потребує комплексного підходу і прийняття відповідних мір для мінімізації збитків. Аналіз затоплень в українській частині басейну р. Вісла, наведений в роботі О.В. Гриня показує, що за період з 1987 по 2010 роки спостерігалось 67 затоплень. Дослідження також описує масштаби та наслідки затоплень [28].

Одними з перших досліджень басейну р. Вісла в межах України, а саме її притоки р. Західний Буг, слід відзначити роботи К.І. Геренчука [29, 30] в яких наведено фізико-географічне районування значної території басейну в межах Львівської та Волинської областей.

Важливий внесок у вивченні водотоків і водойм басейну р. Західний Буг складають роботи П.А Тутковського [31] (Волинська область), О.М. Маринича [32] (Українське Полісся). Результати дослідження водойм, лімно-географічні характеристики озер Волинської області наведені в роботах Я.О. Мольчака і Л.В. Ільїна [33, 34].

Початок формування мережі гідрологічних постів в басейні р. Західний Буг припадає на кінець XIX сторіччя. В роботі М.М. Айзенберга описана історія формування гідрометеорологічної мережі в досліджуваному районі, вказано, що на 1900 рік на території басейну функціонувало 6 гідрологічних постів. На початку 1950-х років продовжувалось дослідження гідрологічного режиму річок басейну р. Західний Буг і найбільш детальна характеристика надається в «Ресурсах поверхностных вод СССР. Украина и Молдавия. 1969. Т.6, вып. 1» [1]. В подальшому П.Ф. Вишневським [35] досліджувалися зміни

поверхневого стоку річок в басейні р. Західний Буг, зокрема під впливом господарської діяльності: спорудження водосховищ, забір води на господарсько-питне та технічне водопостачання, осушення боліт, гідромеліоративні заходи.

Значну увагу формуванню меженного стоку приділяли М.І. Дрозд та К.А. Лисенко [36], що виявили значний вплив карсту на гідрологічний режим річок басейну. Виявлено збільшення величин шару стоку літньої межні в центральній та східній частині басейну внаслідок дренажування. Дослідження максимального стоку весняного водопілля, що проводились Я.О. Фоменко [37] також показали значний вплив карсту та заболочених ділянок на стік.

Дослідженню максимального стоку в басейні р. Західний Буг та формуванню дощових паводків в басейні р. Вісла в межах України присвячені роботи В.О. Розлач та М.М. Сосєдко [38].

Перші дослідження стосовно прогнозування максимального стоку весняного водопілля були виконані Г.В. Павленко і С.П. Шендрік [39], які запропонували методику прогнозу об'єму та максимальних витрат води за даними про снігозапаси, норму опадів в період повені та характеристиками витрат води до початку повені.

Характеристика водного, льодового, термічного режиму та стоку наносів була виконана В.К. Хільчевським та І.П. Ковальчуком [40]. В роботі В.І. Вишневецького та О.О. Косовця [41] наведені дані про характерні рівні та витрати води за деякими гідрологічними постами включно по 2000 р.

Спостереження за гідрологічним режимом річки Вісла в межах України станом на 2020 рік проводиться Львівським регіональним центром з гідрометеорології та Басейновим управлінням водних ресурсів річок Західного Бугу та Сяну. Спостереження за рівнями, витратами, льодовим режимом та температурою води здійснюються на 9 річках басейну р. Вісла в межах України. Додатково на одному гідрологічному пості здійснюється спостереження за зваженими наносами [42].

В табл.1.2 представлений перелік гідрологічних постів басейну р. Вісла в межах України та періоди спостереження на них, а на рис. 1.19 – їх розташування в басейні р. Вісла в межах України [1]. Гідрологічна вивченість території значною мірою характеризується загальною тривалістю спостережень на гідрологічних постах. В басейні р. Вісла в межах України тривалість рядів спостережень за стоком води змінюється від 5 (р. Золочевка - с. Золочевка) до 69 років (р. Західний Буг - м. Кам'янка-Бузька, р. Полтва - м. Буськ).

Таблиця 1.2 – Список пунктів гідрологічних спостережень в басейні р. Вісли в межах України

№ за/п	Назва водного об'єкта	Місцезнаходження (назва) поста	Код поста	F, км ²	Період дії, число, місяць, рік	
					відкритий	закритий
1	р. Вишня	с. Твіржа	79720	562	01.09.1945 (13.02.1974)	Діє
2	р. Шкло	м. Яворів	79721	236	17.08.1970	01.09.1988
3	р. Західний Буг	сmt Сасів	79723	107	1888 (31.03.1977)	Діє
4	р. Західний Буг	м. Кам'янка-Бузька	79726	2350	1913 (19.07.1944)	Діє
5	р. Західний Буг	м. Сокаль	79735	6250	1886 (01.04.1957)	01.10.1988
6	р. Золочевка	с. Золочевка	79736	90	1970	01.09.1975
7	р. Західний Буг	с. Литовеж	79397	6740	15.05.1979	Діє
8	р. Полтва	м. Буськ	79747	1440	1887	Діє
9	стр. Кам'янка	м. Кам'янка-Бузька	79749	141	1961	1975
10	р. Рата	с. Волиця	79753	1140	1939	Діє
11	р. Рата	с. Межиріччя	79755	1740	1898	Діє
12	р. Свиня	м. Жовква (м.Нестерів)	79757	98,6	07.01.1897 (23.09.1954)	Діє
13	р. Желдець	с. Лугове	79758	246	04.10.1945 (15.11.1962)	01.09.1988

Кінець таблиці 1.2

№ за/п	Назва водного об'єкта	Місцезнаходження (назва) поста	Код поста	F, км ²	Період дії, число, місяць, рік	
					відкритий	закритий
14	р. Солокія	м. Червоноград	79761	931	1901 (29.09.1962)	Діє
15	р. Луга	м. Володимир-Волинський	79763	1270	1926 (01.12.1964)	Діє
16	р. Полтва	с. Пельтев	79748	725	1948	1970
17	р. Холоївка	х. Бирок	79744	46	1950	1962

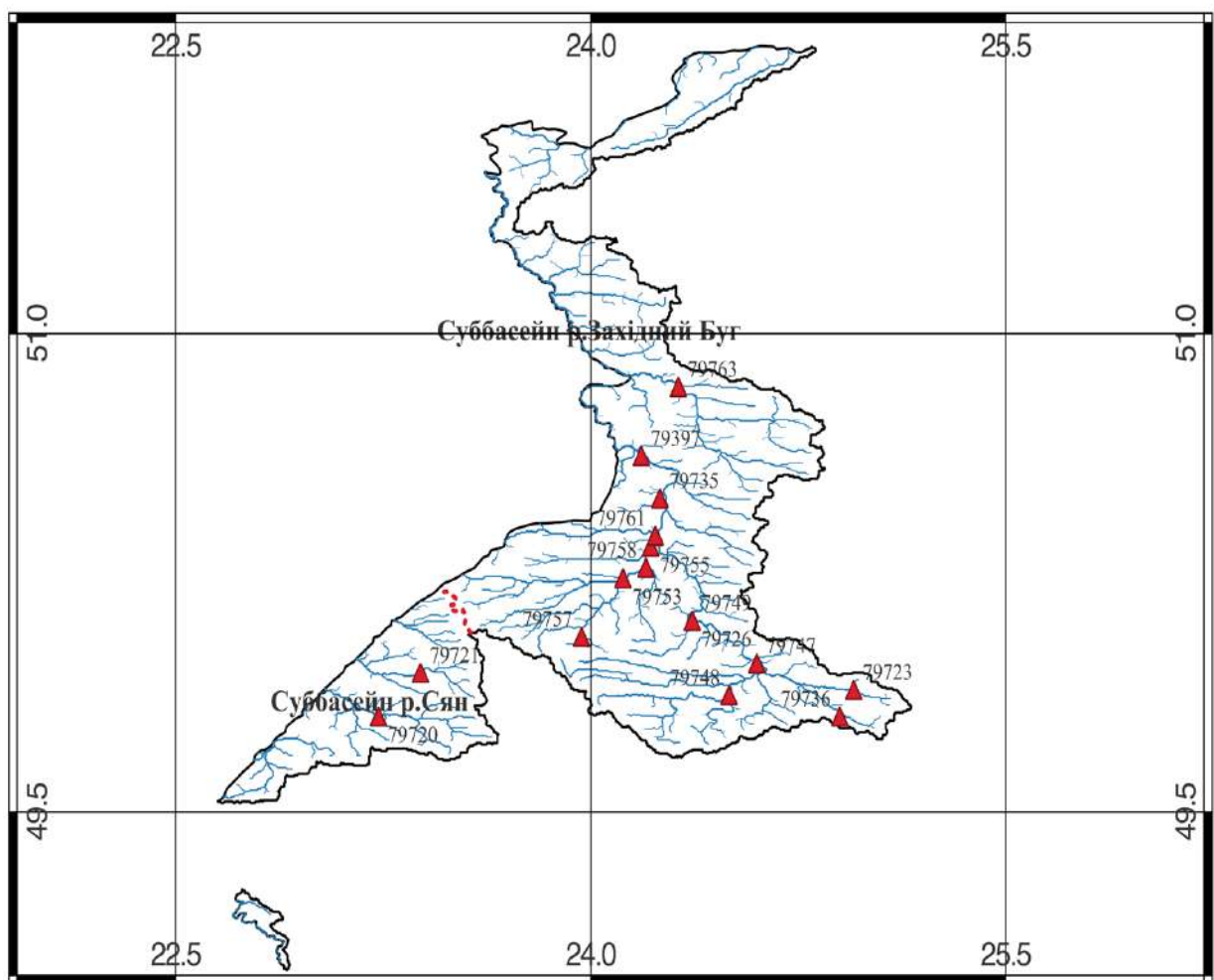


Рисунок 1.19 – Карта - схема розташування постів басейну р. Вісла в межах України

Більшість постів на досліджуваному водозборі мають ряди спостережень тривалістю від 41 років до 60 років (29,5%), пости з тривалістю

спостережень 21-40 і 61-80 років складають по 23,5% від загальної кількості, як і ряди довжиною менше 20 років (табл. 1.3).

На сьогодні основним документом у галузі водної політики ЄС є Директива № 2000/60/ЄС від 23 жовтня 2000 р., (ВРД ЄС), згідно з якою річки за розміром поділяються на: малі — 10–100 км²; середні — 100–1 000 км²; великі — 1,0–10 тис. км²; дуже великі — понад 10 тис. км² [43].

Таблиця 1.3 – Розподіл водозборів за тривалістю спостережень і величиною їх площ водозборів

Площа водозбору, км ²	Кількість гідрологічних постів з періодом спостережень					
	≤ 20	21 - 40	41 - 60	61 - 80	Всього	%
10 – 100	2		1		3	18
101 - 1000	2	2	1	2	7	41
1001 – 10000		2	3	2	7	41
Всього	4	4	5	4	17	100
%	23,5	23,5	29,5	23,5	100	

Аналіз діапазону площ водозборів досліджуваних річок показав, що більша їх частина відноситься до категорій середніх (7 постів) та великих річок (7 постів), відповідно по 41%. На річках, що відносяться до категорії малих працює 3 гідрологічних пости (18%). Відповідно, дуже великих річок на досліджуваній території немає.

Водний режим. Для візуалізації водного режиму побудовані гідрографи стоку річок басейну р. Вісла в межах України на прикладі р. Західний Буг - м. Кам'янка Бузька, р. Полтва - м.Буськ, р.Рата - м.Межиріччя (рис.1.20 – 1.22).

На гідрографах чітко виражені весняні водопілля, які у 2009 – 2010 роках відзначаються синхронністю і проходять з березня по травень.

Водний режим р. Полтва характеризується вираженими паводками з максимальними витратами води, що перевищують аналогічні за період весняного водопілля, та нетривалою меженню з жовтня по грудень (рис. 1.21).

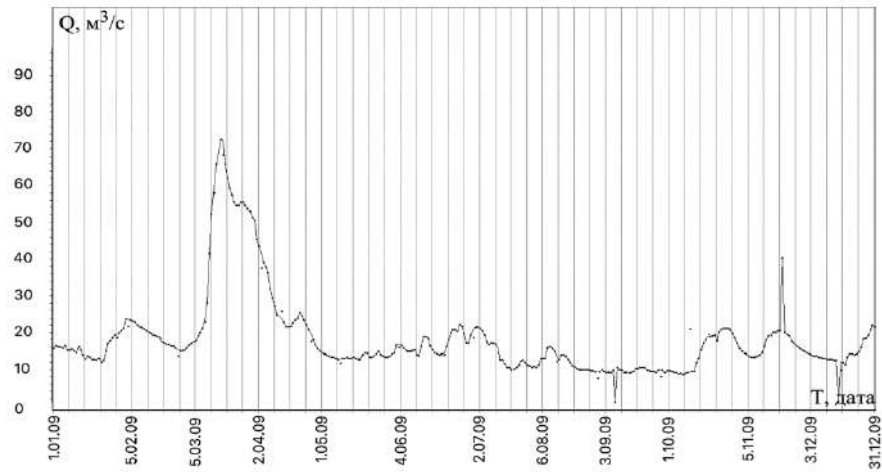


Рисунок 1.20 – Гідрограф стоку р. Західний Буг - м. Кам'янка Бузька 2009 р.

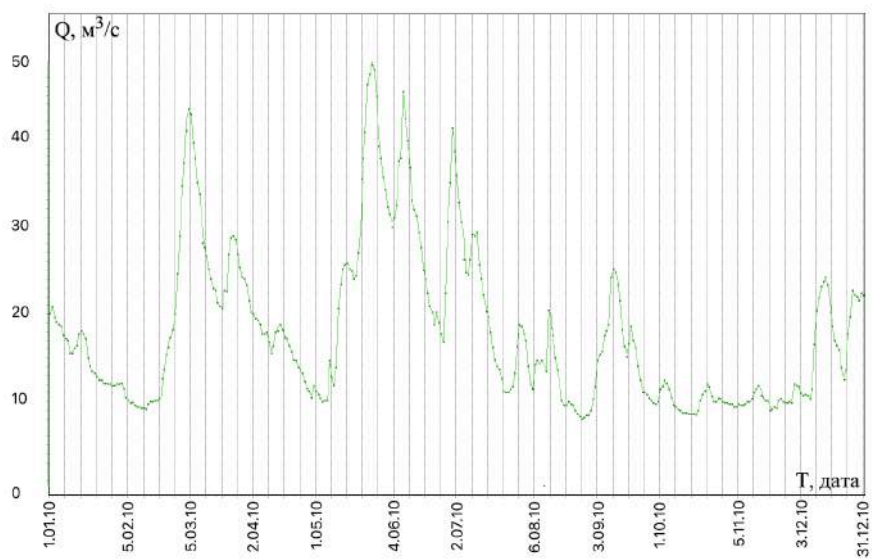


Рисунок 1.21 – Гідрограф стоку р. Полтва - м. Буськ 2010 р.

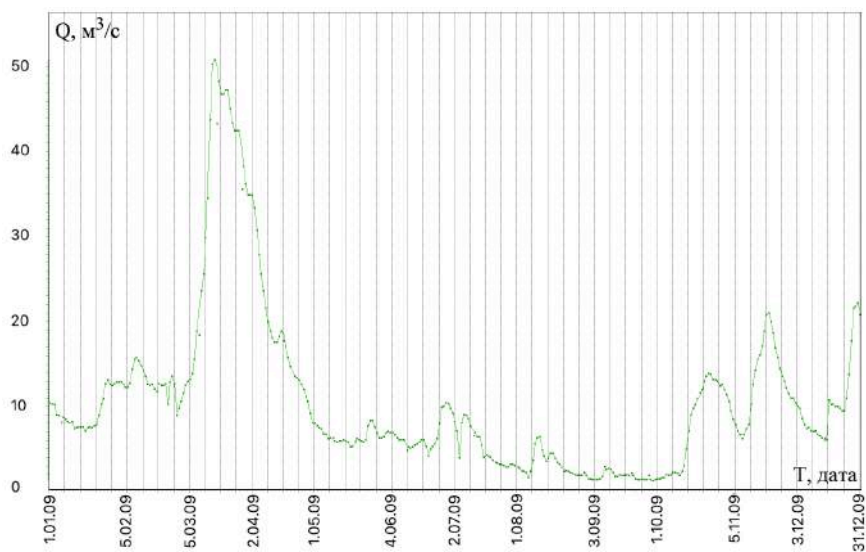


Рисунок 1.22 – Гідрограф стоку р. Рата - м. Межиріччя 2009 р.

Річний стік на постах р. Західний Буг - м. Кам'янка Бузька та р. Рата - м. Межиріччя характеризується менш вираженими паводками в червні – липні та низькою меженню (особливо р. Рата). Згідно гідрографів, паводки зумовлені випадінням дощу влітку та восени.

Побудовані гідрографи стоку р. Західний Буг – м. Кам'янка Бузька для характерних років з найбільшими за період спостережень строковими витратами весняного водопілля (рис. 1.23) і дощових паводків (рис.1.24).

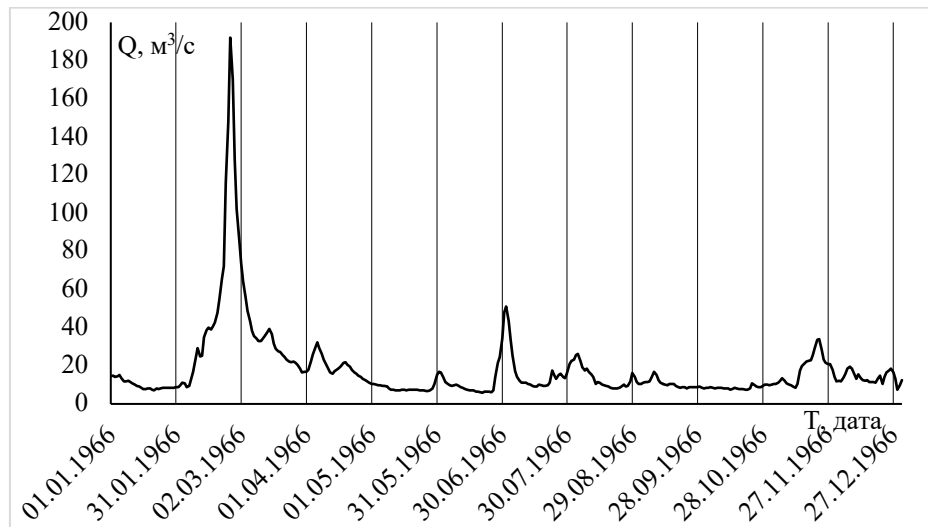


Рисунок 1.23 – Гідрограф стоку р. Західний Буг - м. Кам'янка Бузька 1966 р.

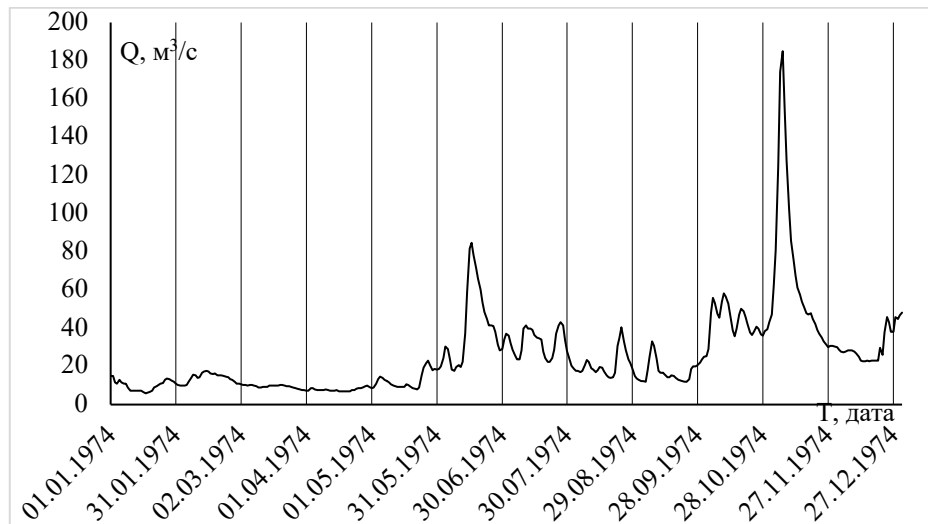


Рисунок 1.24 – Гідрограф стоку р. Західний Буг - м. Кам'янка Бузька 1974 р.

За наведеними графіками видно, що за величиною максимальні спостережені витрати води дощових паводків можуть бути подібними відповідним витратам весняного водопілля.

Також характерно, що весняне водопілля може не бути вираженим (максимальна витрата води весняного водопілля 1974р. на р. Західний Буг - м. Кам'янка Бузька складає 17,8 м³/с).

Висновки до розділу 1

1. Гідрологічні пости досліджуваного басейну розташовані нерівномірно і не охоплюють спостереженнями північну частину басейну;
2. Карст має значний вплив на водний режим річок басейну р. Вісла в межах України;
3. Порівняння даних про залісеність, отриманих за допомогою проведення класифікації супутникових знімків, показало, що вони відрізняються від даних, наведених у літературних джерелах, але незначно. Тим не менш, той факт, що практично у всіх випадках залісеність водозборів зменшилась за останні 70 років, необхідно враховувати при оцінці регулюючої здатності лісових масивів в періоди проходження паводків різного походження на річках досліджуваної території;
4. Аналіз багаторічного ходу температури повітря та опадів показує значну їх залежність від географічного розташування метеорологічних станцій, а саме від висотного положення;
5. На метеорологічних станціях басейну р. Вісла в межах України спостерігається збільшення середньомісячних температур повітря за період спостережень з 1991 по 2020 рр. у порівнянні з періодом з 1961 по 1990 рр. Найбільше зростання середньомісячної температури приземного шару повітря спостерігається в січні і складає від 1,6 до 2,2 °С, найменше – вересні-жовтні від 0,3 до 0,6 °С;

6. Динаміка місячних сум опадів на території досліджуваного басейну за різні періоди не показує значного збільшення чи зменшення значень. Водночас, графіки місячних сум опадів для всіх метеорологічних станцій за період з 1991 по 2020 рр. мають більш розпластаний вигляд у порівнянні з першим періодом спостережень, декількома піками, тобто, опади за цей період характеризуються більшою рівномірністю випадання впродовж року;
7. За прогностичними сценаріями RCP 8.5 та RCP 2.6 приземна температура повітря буде зростати до 2050 р., кількість опадів також має тенденцію до зростання, але не значного;
8. Особливостями гідрологічного режиму річок досліджуваного басейну є виражені весняні водопілля та дощові паводки теплого періоду, що формуються внаслідок випадіння зливових опадів;
9. На досліджуваній території паводки теплого періоду можуть перевищувати весняні водопілля, які в окремі роки можуть бути не вираженими;
10. Таким чином можна сказати, що проведений аналіз показав, що в межах досліджуваної території слід очікувати у найближчий час підвищення на 1.5-2.0⁰С середньорічної температури повітря та практичну незмінність річної кількості опадів. Таке співвідношення основних кліматичних факторів може викликати зменшення водності річок в цілому та її перерозподіл по сезонах; як наслідок можливе підвищення ймовірності виникнення локальних високих паводків у теплу частину року.

Перелік використаних джерел до розділу 1

1. Ресурсы поверхностных вод СССР. / под ред. М.С. Каганера. Т. 6. Украина и Молдавия. Вып. 1. Западная Украина и Молдавия. Ленинград : Гидрометеиздат, 1969. 884 с.
2. Основные гидрологические характеристики. Т.6. Вып. 1-3. Ленинград : Гидрометеиздат, 1963-1970, 1971 – 1975, 1976 – 1980 pp.
3. Державний водник кадастр. Багаторічні дані про режим та ресурси поверхневих вод суші (за 1981 – 2000 pp. та весь період спостережень), Вип.1, ч.1. Річки. Басейни Західного Бугу, Дунаю, Дністра, Південного Бугу. Київ : центральна геофізична обсерваторія, 2008. 765 с.
4. Державний водник кадастр. Щорічні дані про режим та ресурси поверхневих вод суші. Ч.1. Річки і канали. Витрати води Т.ІІ, Вип. 1 Басейн Західного Бугу, Дунаю, Дністра, Південного Бугу. Київ : центральна геофізична обсерваторія.
5. Руденко Ф.А. Гидрогеология Украинской ССР. Київ : Вища школа, 1972. 176 с.
6. Дублянская Г.Н., Дублянский В.Н. Теоретические основы изучения парагенезиса карстподтопление. Пермь : Перм. ун-та, 1998. 204 с.
7. Дублянский В.Н., Ломаев А.А. Карстовые пещеры Украины. Киев : Наук, думка, 1980. 180 с.
8. Шнюков В.Ф., Шестоппов В.М. Экологическая геология Украины. Киев : Наук. думка, 2009. 407 с.
9. Мартинюк М.О., Овчарук В.А. Використання ГІС-технологій для визначення залісеності басейнів річок Малого та Волинського Полісся. *Геологічне, гідрологічне та біологічне різноманіття Полісся* : збірник наукових праць Міжнародної науково-практичної конференції до 130-річчя від дня народження видатного польського дослідника Полісся Станіслава Малковського та у рамках проведення Водного форуму до

- 105-річчя Національного університету водного господарства та природокористування. Рівне : НУВГП, 2021. С. 287-291.
10. Martyniuk M.O., Ovcharuk V.A. Application the space techniques to measure the area forestation and wetlands at the basin of the Vistula within Ukraine. *4th Hydrospace-GEOGloWS 2021 (7-11 June 2021, Virtual event)*. 2021.
 11. Пушкин А.А., Ильючик М.А. Ресурсная оценка поврежденных лесных насаждений на основе использования материалов космической съемки и ГИС-технологий. *Вестник МГУЛ. Лесной вестник*. 2014. No 1(100). С. 58-64.
 12. Черниховский Д.М., Алексеев А.С. Метод определения характеристик лесов на основе материалов дистанционного зондирования Земли, данных лесоустройства и алгоритма k-NN (на примере Лодейнопольского лесничества Ленинградской области). *Известия ВУЗов. Лесной журнал*. 2019. No 4(370). С. 45-65.
 13. USGS EarthExplorer corporate website : [сайт]. URL: <https://earthexplorer.usgs.gov> (дата звернення: 24 May 2023).
 14. Клімат України / за ред. Липінський В. М., Дячук В. А., Бабіченко В. М. Київ : Вид-во Раєвського, 2003. 343 с.
 15. Забокрицька М.Р., Хільчевський В.К., Манченко А.П. Гідроекологічний стан басейну Західного Бугу на території України. Київ : Ніка Центр, 2006. 184 с.
 16. Малицька Л.В., Балабух В.О. Ймовірні зміни кліматичних умов України до середини ХХІ ст. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*. 2020. №1(56). С. 94-100.
 17. Україна та глобальний парниковий ефект: вразливість і адаптація екологічних та економічних систем до зміни клімату / Букша І.Ф. та ін. Київ : Видавництво Агентства з раціонального використання енергії та екології, 1998. 210 с.

- 18.Сніжко С.І. та ін. Оцінка можливих змін водних ресурсів місцевого стоку в Україні в XXI столітті. *Водне господарство України*. 2012. № 6(102). С. 8-16.
- 19.Лобода Н.С., Козлов М.О. Оцінка водних ресурсів річок України за середніми статистичними моделями траєкторій змін клімату RCP4.5 та RCP8.5 у період 2021–2050 роки. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2020. №25. С. 93-104.
- 20.Pluntke T. et al. Hydrologic effects of climate change in the Western Bug basin. *Proceedings of the International Conference “Global and regional climate changes”*, Kiev, Ukraine, 16–19 November 2010.
- 21.Гребінь В.В.Сучасний водний режим річок України (ландшафтно-гідрологічний аналіз). Київ :Ніка-Центр, 2010. 316 с.
- 22.Сніжко С.І., Шевченко О.Г., Дідовець Ю.С. Аналіз впливу кліматичних змін на водні ресурси України : повний звіт за результатами проекту. Київ : Центр екологічних ініціатив «Екодія», 2021. 68 с.
- 23.KNMI Climate Explorer (2022) : [сайт]. URL : <https://climexp.knmi.nl/> (дата звернення 14.05.2022).
- 24.Walawender A. Kronika klsk elementarnych w Polsce i w krajach ssiednich w latach 1450–1586. I. Zjawiska meteorologiczne i pomory (z wykresami) (Chronicle of elemental disasters in Poland and in neighbouring countries in the years 1450–1586. I. Meteorological phenomena and blights (with graphs), in Polish). *Badania z Dziejów Spoecznych i Gospodarczych*, No 10. Lwów, 1932.
- 25.Szewczuk I. Kronika klsk elementarnych w Galicji w latach 1772–1848 (Chronicle of elemental disasters in Galicia in 1772–1848, in Polish). *Badania z Dziejów Spoecznych i Gospodarczych*, No 3. Lwów, 1938.
- 26.Bielaski A.K. Materiay do historii powodzi w dorzeczu górnej Wisy (Materials on the history of floods in the Upper Vistula Basin, in Polish). Monografia Politechniki Krakowskiej im. T. Kociuszki, No 217. Kraków, 1997.

27. Cyberski J. et al. History of floods on the River Vistula. *Hydrological Sciences Journal*, 51:5. 2006. P. 799-817.
28. О.В. Гринь, О.М. Мельник, А.А. Бучнев, І.М. Котляр. Анализ затоплений в бассейне Вислы на территории Украины в 1987-2010 гг. *Водные ресурсы*. 2012. № 5(39). С. 495-504.
29. Природа Волинської області / за ред. Геренчук К.І. Львів : Вид-во Львів. Ун-ту, 1975. 147 с.
30. Физико-географическое районирование Украинской ССР. / под ред. В.П. Попова, А.М. Маринича, А.И. Ланько. Киев : Изд-во Киевского ун-та. 1968. 683 с.
31. Тутковский П.А. Геологический очерк Ковельского и Владимир-Волынского уездов Волынской губернии. *Предварительный отчет Волынского земского собрания*. Житомир, 1916. 54 с.
32. Маринич А.М. Українське Полісся. Київ : Радянська школа. 1962. 163 с.
33. Ільїн Л.В., Мольчак Я.О. Озера Волині. Лімно-географічна характеристика. Луцьк : Вид-во «Надстир'я», 2000. 149 с.
34. Мольчак Я.О., Ільїн Л.В. Озерні ресурси Волині. *Український географічний журнал*. 1994. №4. С. 45-50.
35. Вишне夫斯基 П.Ф. Влияние хозяйственной деятельности в бассейне р. Западный Буг на изменение поверхностного стока. *Труды УкрНИГМИ*. 1972. Вып.116. С.57-64.
36. Дрозд Н.И., Лысенко К.А. Особенности формирования меженного стока рек междуречья Западного Буга, Припяти и Днестра. *Труды УкрНИГМИ*. 1972. Вып. 116. С.110-118.
37. Фоменко Я.А., Волошин И.И. Максимальный сток весеннего половодья в бассейне Западного Буга. *Труды УкрНИГМИ*. 1976. Вып.149. С.58-77.
38. Дутко В.О., Соседко М.М. Из досвіду ідентифікації параметрів математичної моделі дощового стоку в залежності від орографії місцевості. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*. 2011. №3. С. 73-80.

- 39.Павленко Г.В., Шендрик С.П. О прогнозировании объема и максимального расхода воды весеннего половодья р.Буг у г.Каменки-Бугской. *Труды УкрНИГМИ*. 1972. Вып.215. С.119-125.
- 40.Ковальчук І.П., Хільчевський В.К. Гідроекологічні проблеми Поліського регіону. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*. 2003. №5. С.179-194.
- 41.Вишневський В.І., Косоць О.О. Гідрологічні характеристики річок України. Київ : Ніка-Центр, 2003. 324 с.
- 42.Басейнове управління водних ресурсів річок Західного Бугу та Сяну. *Державне агентство водних ресурсів України* : [сайт] URL : <https://buvrzbt.davr.gov.ua/> (дата звернення: 10.03.2022)
- 43.Водна Рамкова Директива ЄС 2000/60/ЄС. Основні терміни та їх визначення. Київ : Твій формат, 2006. 240 с.

РОЗДІЛ 2

АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД МЕТОДІВ РОЗРАХУНКУ ХАРАКТЕРИСТИК МАКСИМАЛЬНОГО СТОКУ ВЕСНЯНИХ ВОДОПІЛЬ ТА ДОЦОВИХ ПАВОДКІВ

Розрахунки максимального стоку річок на території України здійснюються за нормативним документом СНіП 2.01.14-83 [1]. У 2014 році за участю вчених ОДЕКУ підготовлений новий нормативний документ ДБН В.2.4-8:201X Визначення розрахункових гідрологічних характеристик, у якому зокрема запропоновано використання операторної моделі, розробленої Є.Д. Гопченко. Документ затверджений Наказом Мінрегіону України від 02.07.2014 № 185, але станом на 2023 рік не вступив у дію.

Формули, за якими пропонується проводити розрахунки максимального стоку Є.Д. Гопченко поділяє на такі типи [2] :

- редуційні, засновані на явищі зменшення модулів максимального стоку зі збільшенням площі водозборів, редуції;
- об'ємними формулами максимальна витрата води розглядається як функція об'єму водопілля з врахуванням геометричної форми та тривалості водопілля [3];
- формули, що засновані на теорії руслових ізохрон;
- формули граничної інтенсивності;
- деякі проміжні формули максимального стоку.

2.1 Формули редуційного типу

У дослідженні Д.І. Кочеріна, що присвячене узагальненню та систематизації даних по максимальному стоку Європейської частини СРСР, була виявлена залежність максимального модуля стоку від площі водозбору. Запропонована Д.І. Кочеріним редуційна формула має вигляд [4]:

$$q_m = \frac{A_m}{F^{n_1}}; \quad (2.1)$$

де A_m – максимальна інтенсивність водовіддачі при $F=0$ км²;

F – площа водозбору, км²;

q_m – модуль максимального стоку, л/скм²;

n_1 – показник степені редукції максимального стоку.

Аналіз залежності максимальних модулів стоку від площі водозборів показав нелінійність такої зі значним зростанням значень максимальних модулів стоку на початку кривої (при $F \gg 1$ км²), отже степеневий показник n_1 було запропоновано приймати в залежності від площі водозборів:

при $F \leq 1,0$ км² – $n_1 = 0,30$;

при $1,0 < F \leq 1000$ км² – $n_1 = 0,33$;

при $F > 1000$ км² – $n_1 = 0,50$.

Удосконалений варіант розрахункової формули запропонованої Д.Л. Соколовським, що широко застосовувалась при розрахунках максимального стоку має вигляд [5]:

$$q_m = \frac{A_m}{(F+1)^{n_1}} \delta; \quad (2.2)$$

де δ – коефіцієнт, що враховує вплив озерності, заболоченості, лісистості, карсту та водопроникних ґрунтів на максимальний стік.

У роботі Д.Л. Соколовського по удосконаленню редукційної структури враховано форму гідрографів руслового стоку та водовіддачі, що прийняті як одномодальні трикутники, а також тривалість паводку, що розраховується за формулою [6]:

$$T_{II} = T_0 + t_p; \quad (2.3)$$

де T_0 – тривалість схилового припливу;

t_p – час руслового добігання.

Враховуючи одноmodalні гідрографи схилового і руслового припливу як вихідну модель, запропоноване рівняння виду:

$$q_m = \frac{q'_m}{1 + \frac{t_p}{T_0}}. \quad (2.4)$$

Відповідно, засновуючись на виразах (2.2) і (2.4):

$$\frac{1}{(F+1)^{n_1}} = \frac{1}{1 + \frac{t_p}{T_0}}. \quad (2.5)$$

Така розрахункова модель отримала широке розповсюдження і запропонована для розрахунків максимального стоку у нормативному документі СНіП 2.01.14-83.

У роботах Є.Д. Гопченка [4,7] наведена уточнена розрахункова формула, що також заснована на геометричній схематизації гідрографів схилового та руслового стоку, яка враховує русло-заплавне регулювання а також часову нерівномірність схилового та руслового стоку:

$$q_m = \frac{k_0 y_m}{1 + \frac{t_p}{T_0}} k_m k_n; \quad (2.6)$$

де k_0 – коефіцієнт схилової трансформації, що розраховується за виразом:

$$k_0 = \frac{n+1}{n} \cdot \frac{1}{T_0}; \quad (2.7)$$

k_m і k_n – коефіцієнти, що характеризують русло-заплавне регулювання:

$$k_m = \frac{m+1}{m} / \frac{n+1}{n}; \quad (2.8)$$

а

$$k_n = \frac{T_0}{T_n} = \frac{1}{1 + \frac{t_p + \Delta t}{T_0}}. \quad (2.9)$$

Розрахункова формула (2.6) може бути спрощена за можливості осереднення за територією T_0 :

$$q_m = \frac{k_0 Y_m}{(F+1)^{n_1}}; \quad (2.10)$$

Отримана формула є основою для нормування характеристик максимального стоку весняного водопілля і наведена у СНіП 2.01.14-83.

Підставивши вираз (2.5) отримаємо структуру, що дозволяє описати редуційні коефіцієнти за допомогою площі басейну F :

$$\frac{k_n k_m}{1 + \frac{t_p}{T_0}} = \frac{1}{(F+1)^{n_1}}. \quad (2.11)$$

При осередненні за територією T_0 і Y_m редуційна формула (2.6) спрощується до виразу:

$$q_m = \frac{q'_m}{(F+1)^{n_1}}; \quad (2.12)$$

де q'_m - модуль схилового припливу, який визначається як:

$$q'_m = k_0 Y_m; \quad (2.13)$$

де k_0 – коефіцієнт дружності весняного водопілля.

Підставивши (2.13) у (2.12) отримаємо розрахункову структуру:

$$q_m = \frac{k_0 Y_m}{(F+1)^{n_1}} \delta \delta_1 \delta_2; \quad (2.14)$$

де δ – коефіцієнт озерності, що включає також вплив водосховищ і ставків проточного типу на річковий стік;

δ_1 – редуційний коефіцієнт впливу залісеності на максимальний стік річок;

δ_2 – редуційний коефіцієнт впливу заболоченості на максимальний стік річок.

Отримана формула використовується при нормуванні характеристик максимального стоку річок України.

2.2 Формули об'ємного типу

Одним з перших досліджень, присвячених обґрунтуванню об'ємної структури розрахункової формули максимального стоку була робота Д.Л. Соколовського. Як зазначалось вище, основними параметрами тут є об'єм та тривалість паводку [5]:

$$q_m = \frac{m+1}{m} \cdot \frac{Y_m}{T_n}; \quad (2.15)$$

Рівняння, що описують гідрограф, різні для фази підйому та фази спаду, таким чином:

- для фази підйому:

$$Q_t = Q_m \left(\frac{t}{t_n} \right)^{m'}; \quad (2.16)$$

- для фази спаду:

$$Q_t = Q_m \left(\frac{t_{cn}-t}{t_{cn}} \right)^{n'}; \quad (2.17)$$

де Q_t – витрати води за одиницю часу від початку підйому і за одиницю часу від максимуму відповідно;

Q_m – максимальна витрата води;

t_n – тривалість підйому;

$t_{сп}$ – тривалість спаду;

m' і n' - показники степеню фаз підйому та спаду.

При інтегруванні (2.16) і (2.17) отримаємо розрахункові формули об'ємного типу для фаз підйому та спаду паводку:

$$(q_m)_n = \frac{Y_m}{t_n} \cdot f ; \quad (2.18)$$

та

$$(q_m)_{сп} = \frac{Y_m}{T_n} \cdot f(1 + \gamma) ; \quad (2.19)$$

де f – коефіцієнт форми руслових гідрографів, що розраховується за формулою:

$$f = \frac{(m'+1)(n'+1)}{(n'+1)+\gamma(m'+1)} ; \quad (2.20)$$

де m' і n' - показники степеня в рівняннях гідрографу у фазах підйому та спаду;
 $\gamma = t_{сп}/t_n$ – відношення між тривалістю фаз підйому та спаду паводків.

У роботах В.І. Мокляка [8] також наведена об'ємна формула розрахунку максимальних модулів стоку весняного водопілля, що враховує процес сніготанення:

$$q_m = \frac{Y_m}{m_c T_0 + t_p + t_\phi} ; \quad (2.21)$$

де t_ϕ – тривалість руху фронту сніготанення;

m_c – емпіричний коефіцієнт, який визначається за формулою:

$$m_c = 1 + \alpha_L \frac{f_L}{F} + \frac{f_B}{F}; \quad (2.22)$$

Є.Д. Гопченко запропонував формулу об'ємного типу, за основу якої обраний одномодальний гідрограф руслового стоку, що описується рівнянням:

$$q_t = q_m \left[1 - \left(\frac{t}{T_n} \right)^{m_1} \right]; \quad (2.23)$$

При інтегруванні рівняння (2.23) по T_n , отримана структура виду:

$$q_m = \frac{m_1+1}{m_1} \frac{Y_m}{T_n}; \quad (2.24)$$

де $\frac{m_1+1}{m_1}$ – коефіцієнт часової нерівномірності руслового стоку.

В роботі [9] Є.Д. Гопченко наводить модифіковану структуру, яка враховує вплив залісеності, заболоченості водозбору, а також редукцію, що зумовлена русло-заплавним регулюванням:

$$q_m = \frac{m+1}{m} \frac{Y_m}{T_0(f_L f_B) + t_p} k_F; \quad (2.25)$$

де f_B – заболоченість водозборів, %;

f_L – залісеність водозборів, %;

k_F – редукційний коефіцієнт, що визначається як:

$$k_F = \frac{T_0 + t_p}{T_n}; \quad (2.26)$$

Складність визначення параметрів об'ємних формул, зокрема T_n , не дозволяє широко застосовувати їх на практиці.

2.3 Метод руслових ізохрон

Для математичних моделей, що спираються на теорію руслових ізохрон, характерне представлення формування паводків з рівномірною інтенсивністю сніготанення або випадіння опадів на річковий басейн з рівномірною шириною [6].

Форма гідрографів паводку в такому випадку приймається не трикутна, а трапецієподібна, причому, при $t_p < T_0$, верхня основа описує повний стік, а при $t_p \geq T_0$ – неповний [10].

Формули стоку, засновані на теорії руслових ізохрон, відрізняються в залежності від співвідношення t_p і T_0 і представляють собою суму витрат води за одиницю часу з одиниці площі [11] :

- при $T_0 < t < t_p$

$$Q_t = \sum_{k=1}^{k=T_0} q'_k \cdot f_{i-k+1} = \sum_{k=t-T_0+1}^{k=t} f_k \cdot q'_{t-k+1} ; \quad (2.27)$$

- при $t_p < t < T_0$

$$Q_t = \sum_{k=1}^{k=t_p} q'_{t-k+1} \cdot f_k = \sum_{k=t-t_p+1}^{k=t} f_k \cdot q'_{t-k+1} ; \quad (2.28)$$

- при $t > t_p$ і T_0

$$Q_t = \sum_{k=t-t_p+1}^{k=T_0} q'_{t-k+1} \cdot f_k = \sum_{k=t-T_0+1}^{k=t} f_k \cdot q'_{t-k+1} = 0 ; \quad (2.29)$$

де f_i - площі водозбору, що розташовані між ізохронами.

В основу методу руслових ізохрон покладене рівняння руслового стоку, запропоноване Г.А. Алексєєвим [12,13]:

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + V_d \frac{\partial \omega}{\partial x} = P(t) ; \quad (2.30)$$

де V_d – швидкість руху хвилі потоку;

ω – площа поперечного перерізу русла у межах ізохроні;

$P(t)$ – боковий приплив на одиницю довжини русла.

У роботі А.М. Бефані [14] пропонується модель формування максимального стоку, що враховує стік води з приток:

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + V_d \frac{\partial \omega}{\partial x} = n_x Q'_t ; \quad (2.31)$$

де Q'_t - ординати гідрографів схилового припливу;

n_x – кількість приток, русла яких перетинаються ізохронами у замикаючому створі x , що визначається як:

$$n_x = \frac{B_x}{2l} = \alpha B_x ; \quad (2.32)$$

Відповідно до (2.29), рівняння (2.28) можна представити у вигляді:

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + V_d \frac{\partial \omega}{\partial x} = \alpha B_x Q'_t ; \quad (2.33)$$

За відповідних перетворень (2.30) розрахункова формула модуля стоку має вид [15]:

$$q_m = \frac{Y_m}{t_p} \varphi k_r ; \quad (2.34)$$

де $\varphi = \frac{Y_{tp}}{Y_m}$ – коефіцієнт діючого шару стоку;

k_r – гідрографічний коефіцієнт.

Вдосконалена модель формування максимального стоку А.М. Бефані враховує русло-заплавне регулювання [15, 16]:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\omega + \omega_z + \omega_a) + V_d \frac{\partial \omega}{\partial x} = \alpha B_x Q'_t ; \quad (2.35)$$

ω – площа поперечного перерізу русла;

ω_3 – площа поперечного перерізу заплави;

ω_a – площа поперечного перерізу алювію.

Відповідно до (2.32) розрахункова формула модуля стоку приймає вид:

$$q_m = \frac{Y_m}{t_p} \varphi k_\Gamma \varepsilon_F ; \quad (2.36)$$

Використання такої розрахункової формули (2.33) ускладнене через відсутність спостережень та складністю визначення необхідних характеристик.

Є.Д. Гопченко обґрунтована розрахункова модель «схилувий приплив-русловий стік», що базується на моделі руслових ізохрон [17-18]:

$$q_m = q'_m \psi\left(\frac{t_p}{T_0}\right) \varepsilon_F ; \quad (2.37)$$

де $\psi\left(\frac{t_p}{T_0}\right)$ – коефіцієнт трансформації максимального стоку під впливом руслового добігання.

Й.А. Железняком запропонована розрахункова формула розрахунку максимального стоку, що включає метеоролого-гідраліко-морфометричний параметр [19,20]:

$$\tilde{Q}_m = 0,0116 k_{\text{м.г.м.}} Y_m F ; \quad (2.38)$$

де $k_{\text{м.г.м.}}$ - метеоролого-гідраліко-морфометричний коефіцієнт, що визначається за формулою:

$$k_{\text{м.г.м.}} = (t_p \sum q'_i P_i)_m / T_0 \sum q'_i ; \quad (2.39)$$

У діючому нормативному документі СНіП 2.01.14-83 для розрахунків максимального стоку також наведена формула, запропонована представниками Київської наукової школи - В.І. Мокляком та П.Ф. Вишневським, заснована на теорії руслових ізохрон [21, 22]:

$$q_m = h_m \varphi' ; \quad (2.40)$$

де h_m – максимальна інтенсивність водовіддачі;

φ' - редуційний коефіцієнт, що визначається як:

$$\varphi' = a_1 b_n + a_2 b_{n-1} + \dots + a_n b_1 ; \quad (2.41)$$

де $a_1 = \frac{h_1}{h_m}$, $b_1 = \frac{f_1}{F}$

Редуційний коефіцієнт за П.Ф. Вишневським розраховується як [22]:

- при $\frac{t_p}{T_0} < 1,0$

$$\varphi' = \frac{2,6}{1+6,3\frac{t_p}{T_0}} ; \quad (2.42)$$

- при $\frac{t_p}{T_0} \geq 1,0$

$$\varphi' = \frac{0,626}{1+1,02\frac{t_p}{T_0}} ; \quad (2.43)$$

За В.І. Мокляком:

- при $\frac{t_p}{T_0} > 1,0$

$$\varphi' = \frac{0,28+0,07\frac{t_p}{T_0}}{1+2\frac{t_p}{T_0}} ; \quad (2.44)$$

- при $\frac{t_p}{T_0} < 1,0$, $t_p > 1$ доби

$$\varphi' = \frac{0,35}{1+2\frac{t_p}{T_0}} ; \quad (2.45)$$

- при $\frac{t_p}{T_0} < 1,0$, $t_p < 1$ доби

$$\varphi' = \frac{T_0}{0,92T_0 - 0,24 + (1,94T_0 + 5,95)t_p}; \quad (2.46)$$

Для малих водотоків ($t_p \leq 0,04$ доби)

$$\varphi' = 1. \quad (2.47)$$

2.4 Методи розрахунку максимального стоку, що застосовуються у світовій гідрологічній практиці

У закордонній гідрологічній практиці при розрахунках максимального стоку річок найчастіше користуються емпіричними методами, та методами, що засновані на розрахунку одиничного гідрографу.

При використанні емпіричного методу застосовуються формули, що діляться на три типи:

1. Формули, що враховують площу водозбору (по суті редуційні формули) при розрахунках (формули Дікенса, Рівза, Інглеза) [23] які мають вигляд:

$$Q = CA^n; \quad (2.48)$$

де n – показник ступеня, менший за 1;

C – коефіцієнт, що залежить від параметрів водозбору;

A – площа водозбору, км².

2. Формули, що крім площі враховують інші параметри, такі як швидкість течії, шар опадів (формула Рідінза) [23]:

$$Q = 0,098CSR(0,386A)^n; \quad (2.49)$$

де S – середньозважений ухил водозбору, м/км;

R – середній шар опадів, мм.

3. Формули, що враховують забезпеченість шару опадів (формула Петтіза) [23] – за класифікацією Є.Д. Гопченка «формули граничної інтенсивності»:

$$Q = C(PB)^{1,25} ; \quad (2.50)$$

де P – шар опадів за добу з забезпеченістю 1 раз на 100 років, мм;

B – ширина водозбору, км.

Вибір конкретної методики залежить від мети дослідження та доступних вихідних даних.

Для розрахунку максимального стоку найчастіше використовуються два метода, що засновані на рівняннях типу опади-стік:

1. Раціональний метод, який використовується для малих басейнів;
2. SCS-CN, що використовують для середніх басейнів;
3. Комп'ютерне моделювання.

Раціональний метод найчастіше використовується при розрахунках зливового стоку на малих урбанізованих водозборах з площею менше 2 км².

Такий метод заснований на співвідношенні між максимальною витратою паводку та кількістю опадів, дозволяє оцінити лише максимальні витрати, а коефіцієнти стоку та інтенсивність опадів приймає постійними у часі [24].

За раціональним методом максимальна витрата води дорівнює:

$$Q = k_i CIA ; \quad (2.51)$$

де C – коефіцієнт стоку, що обирається в залежності від типу землекористування;

I – інтенсивність опадів, мм/год;

A – площа водоща водозбору, км²;

k_i – коефіцієнт, що обирається в залежності від забезпеченості зливи.

Такий метод дає задовільні результати для розрахунку максимальних витрат на малих водозборах, але не дає інформації для побудови гідрографів.

Також, при дослідженні складних великих водозборів їх необхідно розбивати на окремі.

Метод служби охорони ґрунтів США (SCS) розроблений для визначення одиничних гідрографів, що використовується при розрахунках стоку у басейнах річок зі складним характером стоку. Рекомендується до застосування при площі басейну до 5000 км². Метод аналогічний раціональному в тому, що стік напряму пов'язаний з кількістю опадів але за рахунок числових кривих стоку (CN) [25].

За методом SCS розрахунок проводиться за наступною формулою:

$$Q = \frac{(P-I_a)^2}{(P-I_a)+S}; \quad (2.52)$$

де Q – глибина поверхневого стоку, мм;

P – шар опадів, мм;

S – потенційний запас вологи в ґрунті, мм;

I_a – початкові втрати на випаровування, транспірацію та інфільтрацію, мм, що в за даними емпіричних досліджень дорівнює:

$$I_a = 0,2S . \quad (2.53)$$

Враховуючи рівняння (2.53), глибина поверхневого стоку буде визначатись як:

$$Q = \frac{(P-0,2S)^2}{(P+0,8S)} . \quad (2.54)$$

Потенційний запас вологи в ґрунті залежить від характеристики ґрунту та визначається через функції типу ґрунтів, землекористування, гідрологічних умов водозбору та індексу попереднього зволоження, що описуються кривою CN за рівнянням:

$$S = \frac{100}{CN} - 10 . \quad (2.55)$$

Номер кривої CN визначається за таблицями гідрологічної класифікації ґрунтів, та типів землекористування.

Розрахунки одиничного гідрографу також проводяться різними способами. Так, [26] взяли за основу трикутну форму гідрографа тривалістю опадів D , часом до піку T_R , часом випадіння B та максимальною витратою Q_p . Запропонована формула розрахунку максимальної витрати має вигляд:

$$Q_p = \frac{0,208FQ_R}{T_R} ; \quad (2.56)$$

де Q_R – шар стоку для розрахункового гідрографу, мм.

Час до піку T_R в такому випадку визначається як:

$$T_R = \frac{D}{2} + t_p . \quad (2.57)$$

Службою охорони ґрунтів США для розрахунку t_p запропонована емпірична формула:

$$t_p = \frac{l^{0,8}(S+1)^{0,7}}{1900y^{0,5}} ; \quad (2.58)$$

де l – відстань до границі водозбору, м;

y – середній ухил водозбору, м/км;

У роботі Снайдера [27] запропонований наступний розрахунок часу добігання t_p :

$$t_p = C_1(ll_c)^n ; \quad (2.59)$$

де C_1 – емпіричний коефіцієнт;

l – довжина головного водотоку, м;

l_c – відстань від центру тяжіння водозбору до замикаючого стовору, м;

n – степеневий показник, що визначається емпіричним шляхом.

Такий метод розрахунку одиничного гідрографу широко застосовується у США через доступність інформації та простоту [28, 29].

Для врахування різної тривалості випадіння опадів проводиться співставлення гідрографів з різною тривалістю.

Результуючий гідрограф по водозбору пропонується будувати за методом ізохрон.

Якщо на території басейну виявлено декілька гідрологічних груп ґрунтів чи типів землекористування, що значно відрізняються, такий басейн необхідно розділити на окремі райони.

До недоліків використання методу SCS відносяться:

- неможливість використання методики при значних змінах CN для окремих районів річкового басейну;
- вибір CN описує осереднену тривалість дощу і рівняння не містить інформації про тривалість та інтенсивність опадів;
- початкове співвідношення (2) отримано за даними Служби охорони ґрунтів США і може відрізнятися в залежності від характеристик водозбору;
- методика описує тільки паводковий стік, що формується зливами і не придатна для оцінки стоку при проходженні водопілля;
- метод не враховує підземний стік.

Методами комп'ютерного моделювання вирішуються задачі по розрахунку максимального стоку на великих водозборах, які потребують значної кількості обчислень.

Гідрологічним інженерним центром (HEC) інженерного корпусу армії США (USACE) розроблені програми, за допомогою яких проводиться моделювання річкового стоку. Однією з таких програм є HEC-HMS. Система гідрологічного моделювання (HEC-HMS) використовується при моделювання

гідрологічних процесів та враховує вплив інфільтрації, випаровування, сніготанення та накопиченої вологи ґрунту [30].

Програмне забезпечення TR-20 и TR-55 (Natural Resources Conservation Service) також використовуються при розрахунках зливого стоку, максимальних витрат води та при побудові розрахункових гідрографів.

Як НЕС-HMS, так і TR-20 (TR-55) у своїй основі використовують SCS метод при моделюванні стоку [31].

При розрахунках гідрографа максимального стоку використовується суміщений метод числової кривої, розроблений Службою збереження ґрунтів США з використанням моделі НЕС-1 (Система моделювання водозбору WMS) [32]. Моделювання виконується наступним чином:

1. Створення цифрової моделі рельєфу з роздільною здатністю не менше 30x30 м;
2. ЦМР як вихідні дані завантажується у програмне забезпечення Watershed Modeling System (WMS) для аналізу, обробки характеристик річкових басейнів. Отримується комплексна інформація про межі басейну, геоморфологічна та гідрологічна інформація у формі карт і таблиць;
3. Для розрахунку гідрографів використовується модель Hydrologic Engineering Center (НЕС-1). У якості вихідних даних необхідні такі параметри:
 - значення CN , що залежить від структури, класифікації та використання ґрунтів;
 - сумарний шар опадів;
 - площа басейну;
 - тривалість дощу.

На основі вхідних даних у програмі виконується симуляція стоку з побудовою гідрографів.

У роботі [33] проведений порівняльний аналіз результатів, отриманих за двома методами для водозбору р. Хазір, який показав, що розраховані за

допомогою Системи моделювання водозбору (WMS) максимальні витрати води були ближчими за значеннями до спостережених максимальних витрат. Також автори зазначають, що час настання піку паводку точніше визначений за методом WMS, так як він враховує характеристики рельєфу водозбору [33].

У дослідженні [34] проведене порівняння результатів розрахунків максимального стоку за методами SCS-CN та раціональним методом з даними вимірювань. Встановлено, що метод SCS-CN дав кращі результати для паводкового стоку.

Розрахунки максимального стоку за методом SCS-CN використовуються при проведенні моделювання зон затоплень та побудовані карти загроз і ризиків затоплень [35].

Таким чином, можна відзначити окремі переваги вище перелічених методів, але є й суттєві обмеження. Основним недоліком представлених методів є велика кількість ретельної інформації про досліджений водозбір, яка доволі часто відсутня, а також доволі вузька регіональна обумовленість окремих параметрів моделей.

2.5 Регіональна методика розрахунку характеристик максимального стоку весняних водопіль і дощових паводків річок басейну р. Вісла в межах України

На основі представленого вище аналітичного огляду існуючих методів та моделей для визначення максимальних витрат води, а також враховуючи позитивний досвід апробації на річках різних природних зон [36-39], при розрахунках максимального стоку річок басейну р. Вісла в межах України рекомендується використовувати операторну розрахункову структуру максимального стоку, запропоновану Є.Д. Гопченко та в подальшому удосконалена В.А. Овчарук [40-44] :

$$q_m = q_{1\%}' \psi(t_p / T_0) \varepsilon_F r \lambda_p ; \quad (2.60)$$

де q_m – максимальний модуль руслового стоку забезпеченістю $P\%$, $\text{м}^3/\text{с км}^2$;
 $\psi(t_p / T_0)$ – трансформаційна функція, яка обумовлена часом руслового добігання t_p ;

ε_F – коефіцієнт русло-заплавного регулювання;

r – коефіцієнт зарегулювання максимального стоку озерами і водосховищами проточного типу;

λ_p – коефіцієнт забезпеченості.

Модуль схилового припливу, як одна з головних складових максимального стоку, у свою чергу, визначається за формулою:

$$q'_{1\%} = 0,28 \frac{n+1}{n} \frac{1}{T_0} Y_{1\%}; \quad (2.61)$$

де $q'_{1\%}$ – максимальний модуль схилового припливу забезпеченістю $P=1\%$, $\text{м}^3/\text{с км}^2$;

$\frac{n+1}{n}$ – коефіцієнт часової нерівномірності схилового припливу;

T_0 – тривалість схилового припливу, год;

$Y_{1\%}$ – шар стоку дощових паводків і весняних водопіль забезпеченістю $P=1\%$, мм.

Для визначення трансформаційної функції використовуються розрахункові рівняння, в залежності від співвідношення $\frac{t_p}{T_0}$:

- при $0 < \frac{t_p}{T_0} < 1,0$

$$\psi\left(\frac{t_p}{T_0}\right) = 1 - \frac{m_1 + 1}{(n+1)(m_1 + n + 1)} \left(\frac{t_p}{T_0}\right)^n; \quad (2.62)$$

- при $\frac{t_p}{T_0} \geq 1,0$

$$\psi\left(\frac{t_p}{T_0}\right) = \frac{n}{n+1} \frac{T_0}{t_p} \left[\frac{m_1+1}{m_1} - \frac{n+1}{m_1(m_1+n+1)} \left(\frac{T_0}{t_p}\right)^{m_1} \right]; \quad (2.63)$$

де n і m_1 – показники степені в рівнянні кривих схилового припливу та ізохрон;

t_p – час руслового добігання, год.

Коефіцієнт русло-заплавного регулювання ε_F визначається оберненим способом з базової розрахункової структури (2.60), а коефіцієнти врахування зарегулювання максимального стоку озерами і водосховищами проточного типу r , а також для переходу від 1% забезпеченості до інших забезпеченості (λ_p) розраховуються згідно рекомендацій нормативного документу СНіП 2.01.14-83 [1].

Пропонована розрахункова структура заснована на моделі руслових ізохрон, а однією з важливих її переваг є можливість використання при розрахунках максимального стоку як весняних водопіль, так і дощових паводків без обмеження щодо величин площ водозборів.

Висновки до розділу 2

1. Аналіз останніх досліджень показав, що сучасні методи розрахунку максимального стоку проводяться за допомогою гідрологічного моделювання, в той час як моделі засновані на розрахунку одиничного гідрографу дозволяють врахувати вплив різних факторів, таких як

- інфільтрація, випаровування, запас води в ґрунті та швидкість сніготанення;
2. Для басейнів річок України при розрахунках максимального стоку весняних водопіль і дощових паводків рекомендуються формули редуційного типу, згідно з нормативним документом СНіП 2.01.14-83;
 3. Через недостатність спостережень за річковим стоком, а також зважаючи на нерівномірне розподілення гідрологічних постів саме в басейні р. Вісла в межах України, при розрахунках максимального стоку виникає необхідність застосовувати відповідні методи, що розроблені для використання при відсутності гідрологічних даних;
 4. Запропонована Є.Д. Гопченко операторна модель дозволяє проведення розрахунків максимального стоку як весняних водопіль так і дощових паводків, використовуючи єдину наукову-методичну базу, що значно спрощує обґрунтування регіональних розрахункових параметрів;
 5. Для обґрунтування регіональної методики визначення характеристик максимального стоку весняних водопіль і дощових паводків річок басейну р. Вісла в межах України, з подальшим визначення зон потенційного затоплення, рекомендується використання операторної моделі формування максимального стоку.

Перелік використаних джерел до розділу 2

1. Определение расчетных гидрологических характеристик СНИП 2.01.14-83. М.: Госком СССР по делам строительства, 1983. 97 с.
2. Соколовський Д. Л. Речной сток. Ленинград : Гидрометиздат, 1959. 527 с.
3. Гопченко Є. Д. Анализ структуры объемных формул. *Метеорология, климатология и гидрология*. Одеса, 1976. Вып. 12. С. 84-90.
4. Гопченко Е. Д. О редуционных формулах максимального стока. *Труды УкрНИГМИ*. 1980. Вып. 175. С. 85-93.
5. Огиевский А.В. Гидрология суши. Москва : Сельхозиздат, 1952. 515 с.
6. Гопченко Є. Д., Романчук М. Є., Траскова А. В., Грушковська І.О. Про особливості редуції максимальних модулів дощових паводків і весняних водопіль в залежності від розміру річкових водозборів. *Вісник Одеського державного екологічного університету*. Одеса, 2014. Вып. 17. С.109-115.
7. Мокляк В. І. Максимальні витрати від талих вод УРСР. Київ : АН УРСР, 1957. 163 с.
8. Мокляк В. И. Формирование максимальных расходов от талых вод и их расчеты. Киев, 1965. 118 с.
9. Гопченко Є.Д., Казанкова Т.А., Романчук М.Є. О русло-пойменном регулировании максимального стока. *Метеорологія, кліматологія і гідрологія*. Одеса, 1997. Вып. 34. С. 221-231.
10. Долгов Н. Е. Основные положения теории стока ливневых вод. *Гидрологический вестник*. 1916. С. 3-31.
11. Протодяконов М. М. Теория стока поверхностных вод. Москва : Гострансиздат, 1932. 168 с.
12. Алексеев Г. А. Анализ и расчет максимального стока. *Тр. НИУГМС*. 1946. Сер. IV. Вып. 29. С.33-91.
13. Алексеев Г. А. Паводочный сток рек СССР. Москва : Гидрометеозидат, 1956. 107 с.

- 14.Бєфани А. Н. Основы теории ливневого стока. *Тр. ОГМИ*. 1955, Ч. II, Вып. XIV. 302 с.
- 15.Гопченко Є. Д., Лобода Н. С., Овчарук В. А. Гідрологічні розрахунки : підручник. Одеса : ТЕС, 2014. 484 с.
- 16.Бєфани А. Н., Бєфани Н. Ф., Гопченко Е. Д. Региональные модели формирования паводочного стока на территории СССР. Обнинск, 1981. Вып. 2, 60 с.
- 17.Гопченко Є. Д., Кічук Н. С., Овчарук В. А. Максимальний стік дощових паводків на річках Півдня України : монографія. Одеса : ТЕС, 2016. 212 с.
- 18.Гопченко Е. Д., Овчарук В. А. Формирование максимального стока весеннего половодья в условиях юга Украины. Одесса : ТЭС, 2002. 110 с.
- 19.Железняк И. А. Определение максимального расхода половодья по типовым характеристикам гидрометеорологических условий водосбора. *Тр. УкрНИГМИ*. 1985. Вып. 201. С. 15-27.
- 20.Железняк И. А. Руслевое регулирование и применение генетических формул стока. *Труды УкрНИГМИ*. 1977. Вып. 158. С. 3-11.
- 21.Мокляк В. І. Максимальні витрати від талих вод на річках УРСР : монографія. Київ : Видав. АН УРСР, 1957. 163 с.
- 22.Вишневський П. Ф. Зливи і зливовий стік України. Київ : Наукова думка, 1964. 230 с.
- 23.Chow V. T., Maidment D. R., Mays L. W. Applied Hydrology. McGraw-Hill, Inc., 1988. 572 pp.
- 24.Hydrology National Engineering Handbook / Fripp J. (editor in chief.) USDA Natural Resources Conservation Service, 210-VI-NEH. Part 630, 2004. 42 pp.
- 25.Mockus V. National Engineering Handbook. Washington : Soil Conservation Service, USDA, 1964. 127 pp.
- 26.Bedient P. B., Huber W. C. Hydrology and Floodplain Analysis : 5th edition. Pearson, 2002. 816 pp.

27. Stedinger, J. R., Tasker G. D. Regional Hydrologic Analysis. Ordinary, Weighted, and Generalized Least Squares Compared. *Water Resources Research*. 1985. Vol. 21, No. 9. P. 1421-1432.
28. Byczkowski A. Hydrology. Wydawnictwo SGGW, 1999. 479 pp.
29. Handbook of Hydrology / Maidment, D. R. (editor in chief). New York : McGraw-Hill, Inc., 1993. 1143 pp.
30. Mirza Sarač et. al. Improvement of the operational HEC-HMS hydrological model embedded in the Flood Forecasting and Warning System of the Sava River Basin. *Acta Hydrologica Slovaca*, 2021. Vol. 22, No. 2. P. 264-275.
31. Urban Hydrology for Small Watersheds : Technical Release 55. United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, Conservation Engineering Division, 1986.
32. Edsel B. D., et al. Watershed Modeling and its Applications: A State-of-the-Art Review. *The Open Hydrology Journal*. 2011. Vol. 5 P. 26-50.
33. Younis A, Hasan I., Saeed Y. Comparison Study of Two Methods Used to Estimate Surface Runoff Hydrograph for Small Basins *Journal of Engineering and Development*. 2014. Vol. 18, No.6. P. 218-232.
34. Bantchina B. B., Gündoğdu K. S. Watershed Characteristics and Synthetic Unit Hydrographs Determination using Geographical Information Systems. *Journal of Biological and Environmental Sciences*. 2006. Vol. 15, No. 45. P. 27-34.
35. Beden N., Keskin A. Flood hazard assessment of a flood-prone intensively urbanized area - A case study from Samsun Province, Turkey. *Geofizika*, Vol. 37, No. 1, 2020.
36. Овчарук В. А. Особенности применения формулы операторного типа для расчета максимального стока рек в различных физико-географических условиях. *Метеорологія, кліматологія та гідрологія*. Одеса : Екологія, 2008. Вип. 50, Ч. 2. С.93-101.

- 37.Гопченко Є. Д., Кічук Н. С., Овчарук В. А. Максимальний стік дощових паводків на річках Півдня України : монографія. Одеса : ТЕС, 2016. 211 с.
- 38.Ladjel M., Goptshenko E., Ovcharuk V. Maximum runoff of the flood on wadis of northern part of Algeria. *Jornal of Fundamental and Applied Sciences*, 2014. No 6(1). P. 66-78.
- 39.Овчарук В. А., Гопченко Є. Д., Траскова А. В. Нормування характеристик максимального стоку весняного водопілля в басейні річки Дністер : монографія. Одеськ. держ-ний екол-ний ун-т : Одеса, 2017. 252 с.
- 40.Гопченко Е. Д., Романчук М. Е. Нормирование характеристик максимального стока весеннего половодья на реках Причерноморской низменности. Киев : КНТ, 2005. 148 с.
- 41.Овчарук В. А., Гопченко Є. Д. Сучасна методика нормування характеристик максимального стоку весняного водопілля рівнинних річок України. *Український географічний журнал*. 2018. No 2 (102). С. 26-33
- 42.Овчарук В. А. Максимальний стік весняного водопілля рівнинних річок України : монографія. Одеса : Видавничий дім «Гельветика», 2020. 300 с.
- 43.Гопченко Е. Д. Научно-методические основы нормирования характеристик максимального стока рек. *Вісник ОДЕКУ*. 2006. Вип. 3. С. 140-150.
- 44.Гопченко Є. Д., Бурлуцька М. Е., Романчук М. Є., Мартинюк М. О. Максимальний стік дощових паводків і весняних водопіль. *Таврійський науковий вісник*. 2019. № 106. С. 255-261.

РОЗДІЛ 3

СТАТИСТИЧНИЙ ТА ГІДРОЛОГО-ГЕНЕТИЧНИЙ АНАЛІЗ
ХАРАКТЕРИСТИК МАКСИМАЛЬНОГО СТОКУ ВЕСНЯНИХ ВОДОПІЛЬ
ТА ДОЩОВИХ ПАВОДКІВ В БАСЕЙНІ ВІСЛИ В МЕЖАХ УКРАЇНИ

Одним з перших етапів дослідження максимального стоку є створення бази даних багаторічної вихідної гідрометеорологічної інформації.

Створення бази характеристик максимального стоку річок басейну Вісли, а саме максимальних витрат води та шарів стоку весняних водопіль і дощових паводків виконане за матеріалами режимних видань за багаторічний період спостережень станом на 2015 рік по 17 гідрологічним постам [1-5].

Після створення бази вихідної інформації виникає питання вибору методів статистичної обробки та гідролого-генетичного аналізу. Статистична обробка характеристик стоку, виконується, зазвичай, з використанням стандартних методів, які рекомендовані в нормативних документах - моментів і найбільшої правдоподібності [6-10].

Важливою передумовою статистичного аналізу є перевірка їх на однорідність. На пострадянському просторі широко використовуються параметричні критерії однорідності - середніх Ст'юдента та дисперсії Фішера, а також непараметричний критерій Вілкоксона-Манна-Уїтні [6,11]. В останні роки, крім вище згаданих, також рекомендується використовувати критерії однорідності екстремальних значень гідрологічних характеристик Смірнова-Грбса і Діксона [11,12]. У зарубіжній практиці більшість дослідників користуються рекомендаціями з гідрологічної практики ВМО, де, зокрема, рекомендується використовувати непараметричні критерії, такі як тести Mann-Kendall, Spearman, Terry, Wald-Wolfowitz, та ін. Однак там же зазначається, що використання одного з критеріїв не завжди може дати достовірний результат, тому одночасно рекомендується використовувати декілька [9].

Серед українських вчених слід відмітити роботи Л.О. Горбачової [13], яка запропонувала порядок оцінки однорідності і стаціонарності рядів спостережень за гідролого-генетичними методами:

«1. Обов'язковими до застосування є наступні положення:

- у часових рядах необхідно відновлювати пропуски в спостереженнях та приводити їх до багаторічного періоду, що дозволяє простежити динаміку гідрологічної характеристики за більш тривалий часовий інтервал;

- за сумарною кривою дослідити однорідність гідрологічної характеристики з часом;

- за різницево-інтегральною кривою визначити репрезентативний період.

2. Для уточнення отриманих результатів (при необхідності) можна залучити до дослідження наступне:

- оцінку достовірності екстремальних (максимальних або мінімальних) значень необхідно перевіряти за даними суміжних постів спостережень, аналізом метеорологічних чинників їхнього формування;

- дослідити за п.1 гідрологічну характеристику на суміжних гідрологічних постах та побудувати і проаналізувати суміщені графіки (хронологічні, різницево-інтегральні криві і т.п.);

- проаналізувати графіки зв'язку гідрологічної характеристики для пунктів-аналогів;

- дослідити за п. 1 динаміку кліматичних чинників (опадів, температури повітря и т.п.);

- проаналізувати за п. 1 елементи водного балансу;

- застосувати інші гідролого-генетичні методи».

З більшістю запропонованих підходів дійсно можна погодитися, зокрема, аналіз циклічності у рядах максимальних шарів стоку і витрат води та побудова відповідних хронологічних графіків, які дають можливість виявити характер і тенденції у багаторічних коливаннях максимального стоку паводків і водопіль, є досить важливим етапом при обґрунтуванні

розрахункових параметрів. Що стосується відновлення пропусків в спостереженнях з метою приведення їх до багаторічного періоду, то для максимального стоку річок, особливо дощових паводків, вибір річки-аналога є досить проблематичним. Так, наприклад, окрема визначна злива може спричинити паводок на малій річці, але на сусідніх водозборах це явище може не спостерігатися. На нашу думку, достатнім є перевірка на однорідність рядів, які мають тривалість спостережень понад 20 років і більше.

3.1 Оцінка однорідності та стаціонарності часових рядів максимального стоку весняного водопілля та дощових паводків річок басейну р. Вісла

Відомо, що у багатьох випадках впродовж всього періоду спостережень, який рідко складає більше 100 років, можлива зміна умов формування стоку внаслідок водогосподарських перетворень, кліматичних змін та інших факторів. В таких випадках, як було показано вище, доцільно виконати аналіз статистичної однорідності вихідних стокових рядів [14].

Статистично однорідними рядами називають ряди випадкових величин, які належать до однієї генеральної сукупності. Відповідно, стаціонарними називають випадкові процеси, які протікають аналогічно у часі.

Для перевірки гіпотези про статистичну однорідність двох рядів даних, які підлягають нормальному закону розподілу, використовуються параметричні критерії Ст'юдента та Фішера-Снедекора [10, 14].

Для характеристики особливостей такого розподілу необхідно мати два статистичні параметри: середнє арифметичне значення та дисперсію. В такому випадку перевірка гіпотези про однорідність зводиться до перевірки двох гіпотез: статистичної гіпотези про незначущість різниці в дисперсіях двох рядів і статистичної гіпотези про незначущість середніх арифметичних значень двох рядів. У тому випадку, якщо одна з цих гіпотез не приймається – відкидається гіпотеза про однорідність досліджуваних рядів [14].

Оцінка однорідності рядів даних з використанням критерію Ст'юдента передбачає досить близькі значеннями дисперсії досліджуваних рядів даних [14].

$$t = \frac{\bar{y} - \bar{x}}{\sqrt{n_x \sigma_x^2 + n_y \sigma_y^2}} \sqrt{\frac{n_x n_y (n_x + n_y - 2)}{n_x + n_y}}; \quad (3.1)$$

де \bar{y} , \bar{x} – середнє значення рядів даних;

σ_x^2 , σ_y^2 – дисперсії рядів даних;

n_x , n_y – довжина рядів даних.

Нульова гіпотеза приймається така, що дорівнює $\bar{y} = \bar{x}$, число ступенів вільності $k = n_x + n_y - 2$.

Критерій Фішера застосовується для перевірки гіпотези однорідності дисперсій [10]:

$$F = \frac{\sigma_x^2}{\sigma_y^2}. \quad (3.2)$$

Для розрахунку необхідно підставити більше значення дисперсії до чисельника. Число ступенів вільності у даному випадку визначається як $k_1 = n_x - 1$, $k_2 = n_y - 1$.

Зазвичай, при дослідженні однорідності гідрологічних рядів даних обираються частини одного ряду даних.

Ряди даних річкового стоку не часто підлягають нормальному закону розподілу, тому для перевірки гіпотези про статистичну однорідність рядів стоку застосовуються також й непараметричні критерії, які засновані на порівнянні емпіричних кривих розподілу, наприклад критерій Вілкоксона-Манна-Уїтні [9].

Оцінка однорідності проводилась для 13 з 17 гідрологічних постів. Через недостатню тривалість рядів спостережень (менше 20 років) для постів р. Шкло – м. Яворів (17 років спостережень), р. Золочевка – м. Золочевка (6 років спостережень), р. Кам'янка – м. Кам'янка Бузька (15 років спостережень)

оцінка однорідності не виконувалася, так як виявляється неможливим оцінити наявність і швидкість змін характеристик стоку [15,16].

Результати оцінки однорідності часових рядів максимального стоку (весняного водопілля та дощових паводків) річок басейну р. Вісла за критеріями Фішера, Ст'юдента і Вілкоксона на рівні значущості $\alpha=5\%$ наведені у додатку Б. За вище переліченими критеріями визначена однорідність багаторічних рядів максимальних витрат води весняного водопілля (додаток Б.1), з якого видно, що з тринадцяти рядів п'ять є неоднорідними - це р. Західний Буг - м. Сокаль, р. Полтва - м. Буськ, р. Рата - с. Волиця, р. Рата - с. Межиріччя, р. Свиня - м. Жовква (м.Нестерів) [5].

Однією з причин такої неоднорідності можуть бути часові тренди, для їх виявлення побудовані хронологічні графіки $k_{iQm} = f(T)$ (рис. 3.1 – 3.5). Представлені графіки показали статистично значущі тренди зменшення максимального стоку весняного водопілля. Коефіцієнт кореляції лінійних трендів коливається в межах від 0,39 до 0,51.

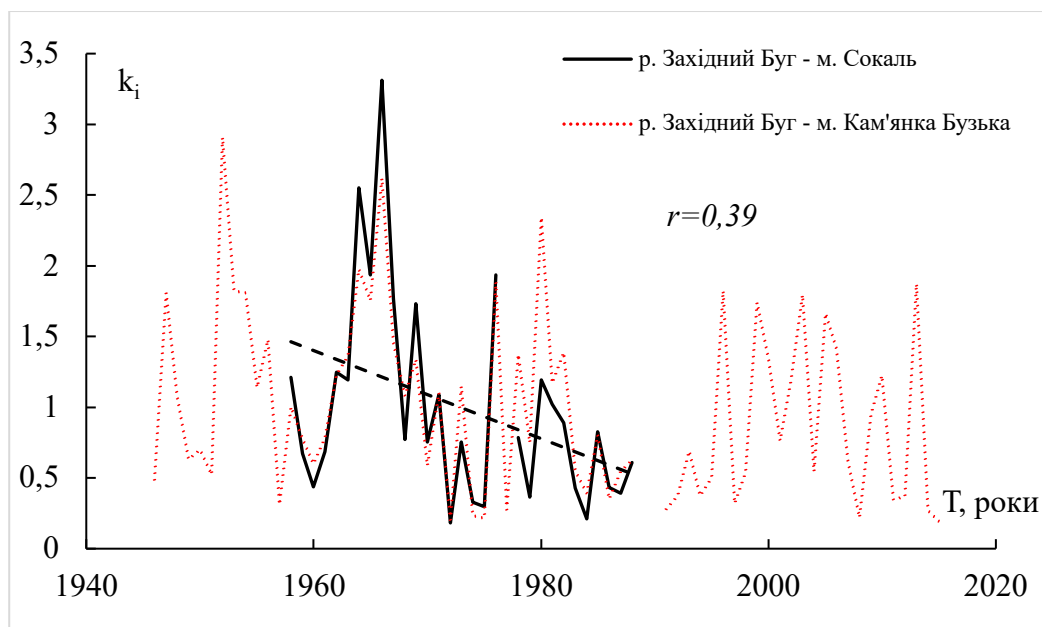


Рисунок. 3.1 – Суміщені хронологічні графіки витрат води весняного водопілля р. Західний Буг – м. Сокаль 1958 – 1988 рр.

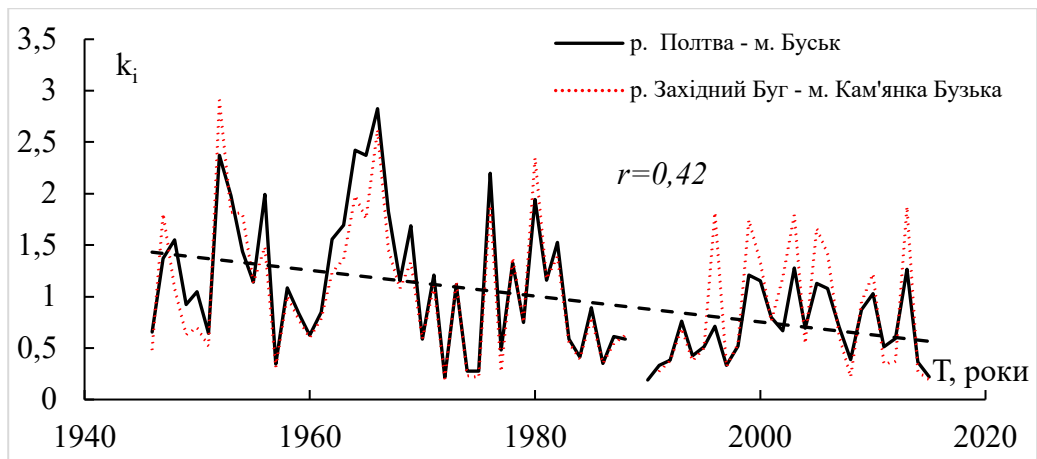


Рисунок 3.2 - Суміщені хронологічні графіки витрат води весняного водопілля р. Полтва – м. Буськ 1946–2015 рр.

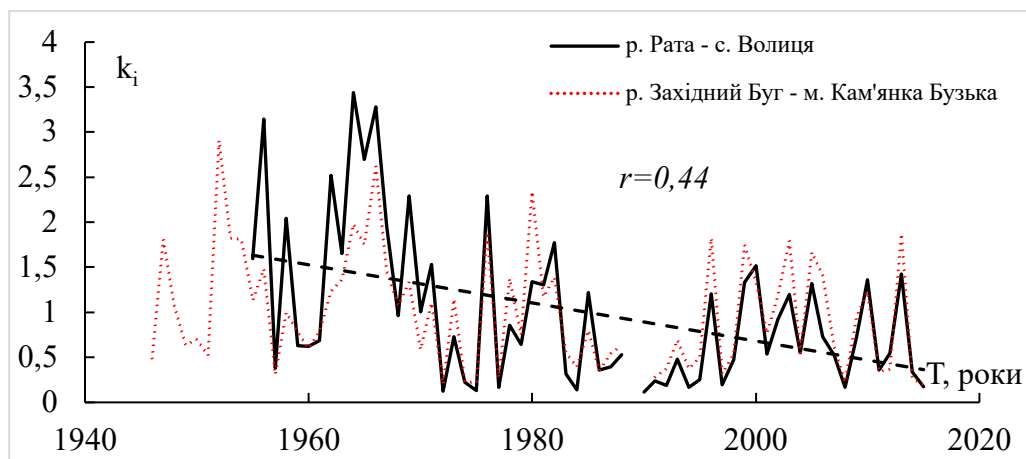


Рисунок 3.3 - Суміщені хронологічні графіки витрат води весняного водопілля р. Рата – с. Волиця 1955–2015 рр.

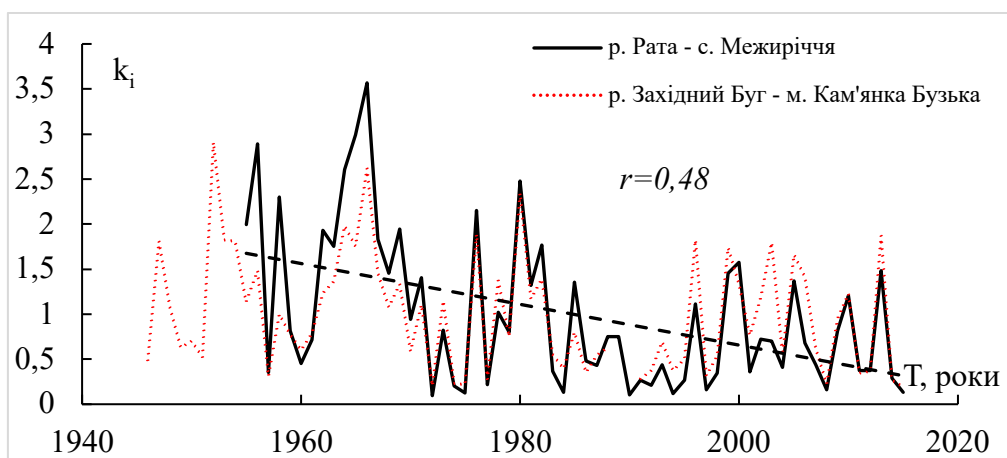


Рисунок 3.4 - Суміщені хронологічні графіки витрат води весняного водопілля р. Рата – с. Межиріччя 1955–2015 рр.

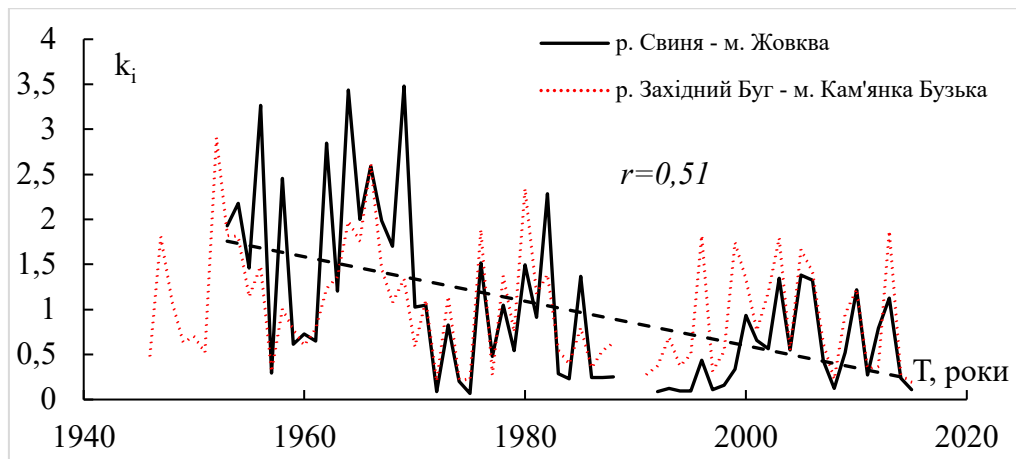


Рисунок 3.5 - Суміщені хронологічні графіки витрат води весняного водопілля р. Свиня – м. Жовква 1953–2015 рр.

Аналіз можливих причин неоднорідності виявив, що ряд р. Західний Буг - м. Сокаль містить дані лише за 30 років спостережень; на гідрологічних постах р. Рата - с. Волиця, р. Рата - с. Межиріччя у 70х-80х рр. ХХ сторіччя проводилося обваловування берегів та випрямлення деяких ділянок русла, що могло спричинити неоднорідність; на прилеглий території р. Свиня - м. Жовква (м. Нестерів) також відбувалися антропогенні зміни, зокрема, до 1990х років тривало осушення боліт, що вплинуло на формування стоку.

Також як і для максимальних витрат води, оцінена однорідність багаторічних рядів шарів стоку весняного водопілля (додаток Б.2). Як показано в додатку, з тринадцяти рядів три є неоднорідними – це р. Західний Буг - м. Сокаль, р. Західний Буг - с. Литовеж, р. Желдець - с. Лугове. Отже, тільки гідрологічний пост р. Західний Буг - м. Сокаль зустрічається в обох випадках, інші відрізняються по витратах та шарах стоку весняного водопілля [5].

Аналогічно з витратами води, неоднорідні ряди містять дані за 30-35 років спостережень, й така коротка тривалість рядів спостережень могла спричинити їх неоднорідність. На побудованих хронологічних графіках $k_{iym} = f(T)$ (рис. 3.6 – 3.8), також як й для максимальних витрат води, простежуються тренди в часових рядах шарів стоку.

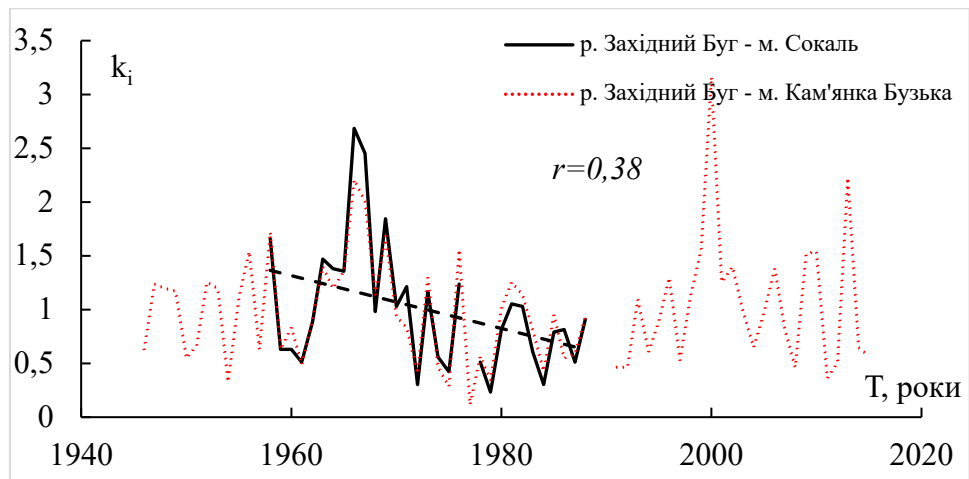


Рисунок 3.6 - Суміщені хронологічні графіки шарів стоку весняного водопілля р. Західний Буг – м. Сокаль 1958 – 1988 рр.

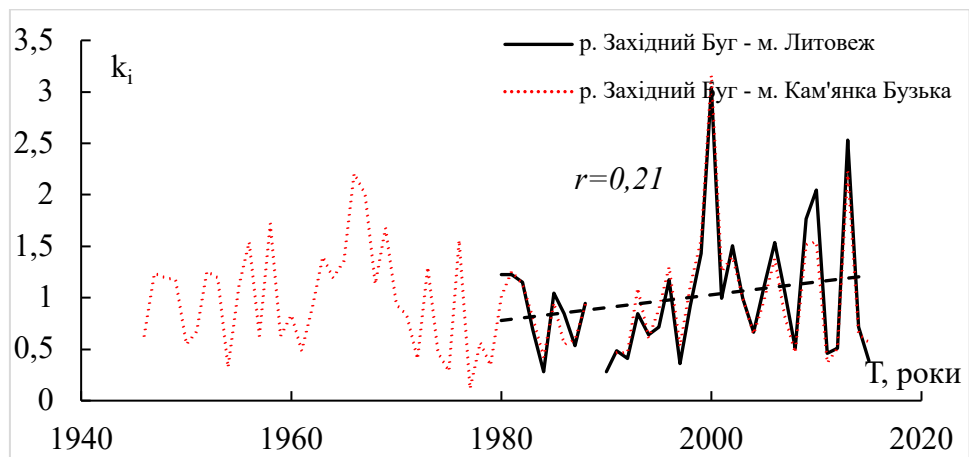


Рисунок 3.7 - Суміщені хронологічні графіки шарів стоку весняного водопілля р. Західний Буг – с. Литовеж 1980–2015 рр.

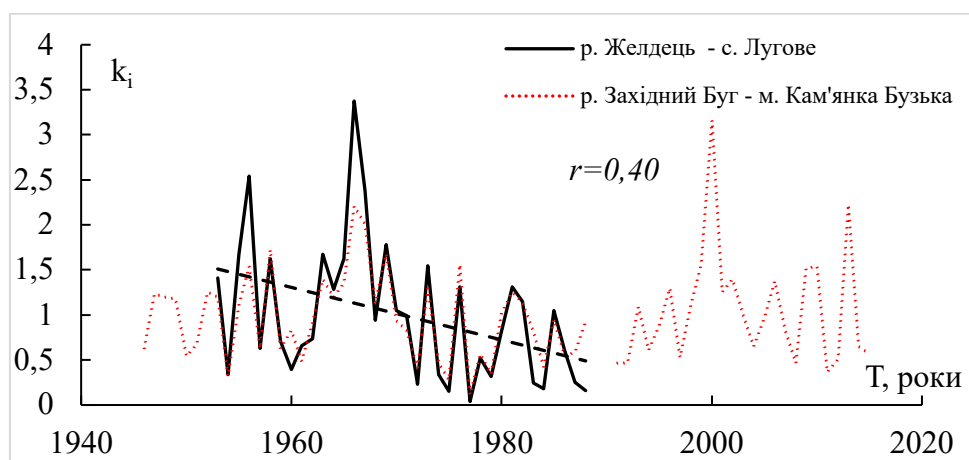


Рисунок 3.8 - Суміщені хронологічні графіки шарів стоку весняного водопілля р. Желдець – с. Лугове 1950 – 1988 рр.

Як видно з рис. 3.6 – 3.8, хронологічні графіки для кожного поста з визначеною неоднорідністю рядів даних переважно збігаються з хронологічним графіком ряду з достатньою довжиною ряду спостережень (р. Західний Буг – м. Кам'янка Бузька). Отже неоднорідність є наслідком неповного циклу коливань водності і пояснюється недостатньою тривалістю рядів даних.

Для часових рядів максимального стоку дощових паводків за аналогічними критеріями також оцінена однорідність багаторічних рядів максимальних витрат води та шарів стоку дощових паводків (додаток Б.3-Б.4).

Як показано в додатку Б.3, для випадку максимальних витрат води з тринадцяти рядів даних лише два є неоднорідними - це р. Свиня - м. Жовква (м. Нестерів) та р. Полтва – с. Пельтев [5].

З побудованих хронологічних графіків (рис. 3.9 – 3.10) видно тренд на зменшення стоку. Як зазначено вище на водозборі р. Свиня - м. Жовква (м. Нестерів) проявляється в значній мірі антропогенний вплив, а ряд спостережень на посту р. Полтва – с. Пельтев короткий (23 роки).

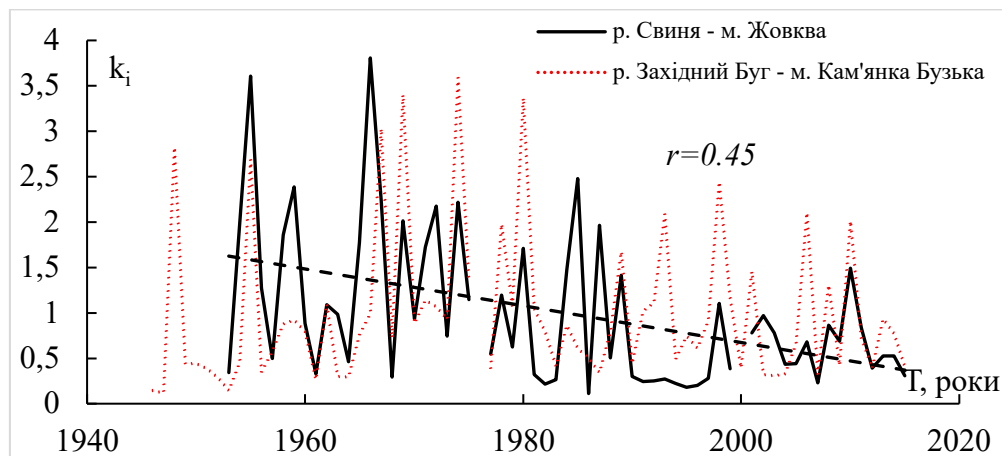


Рисунок 3.9 - Суміщені хронологічні графіки коливань витрат води дощових паводків р. Свиня - м. Жовква (м.Нестерів) 1953 – 2015 рр.

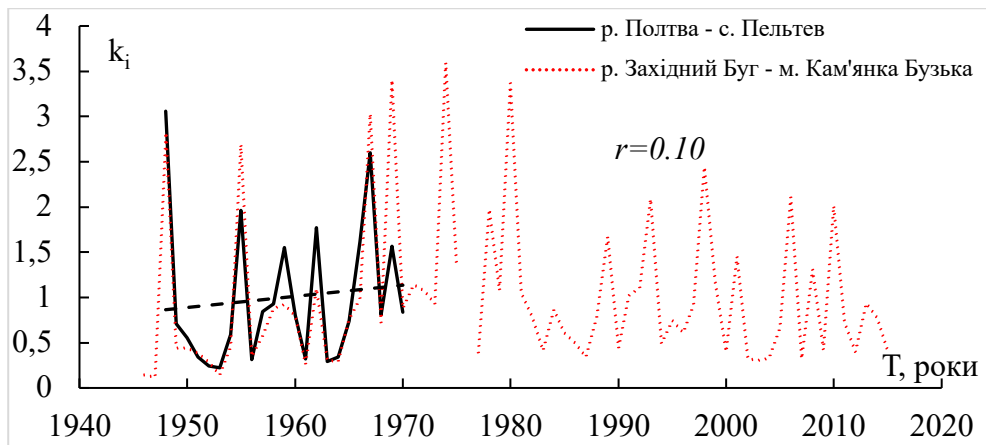


Рисунок 3.10 - Суміщені хронологічні графіки коливань витрат води дощових паводків р. Полтва - м. Пельтев 1948 – 1970 рр.

Результати відносно шарів стоку дощових паводків (додаток Б.4), відрізняються, тут з тринадцяти рядів даних два є неоднорідними - це р. Вишня - с. Твіржа, р. Солокія - м. Червоноград [5]. При чому, тренди на хронологічних графіках шарів стоку зростаючі і є статистично значущими (рис. 3.11 – 3.12).

Неоднорідність рядів можна пояснити значними водогосподарськими перетвореннями, так, річки активно використовували для меліорації, технічного водопостачання і наповнення штучних водойм. Слід зазначити, що Червоноград – важливий центр гірничодобувної промисловості Львівсько-Волинського вугільного басейну і водопостачання та водовідведення тут значно змінювалось в залежності від активності гірничодобувних підприємств, більшість з яких закрились на початку 90х [17].

Для наглядної ілюстрації за результатами аналізу однорідності часових рядів побудовані відповідні діаграми (рис. 3.13). З рис. 3.13 видно, що з 52 рядів даних лише 12 є неоднорідними, тобто однорідні 72%. Для періоду дощових паводків це 84%, а для періоду весняного водопілля - 69%. Такий результат може свідчити, що окрім місцевих та антропогенних факторів відчувається також вплив змін клімату, який перш за все проявляється на величинах максимального стоку весняного водопілля, що зменшуються за рахунок теплих зим та незначних запасів воді у снігу на початок водопілля.

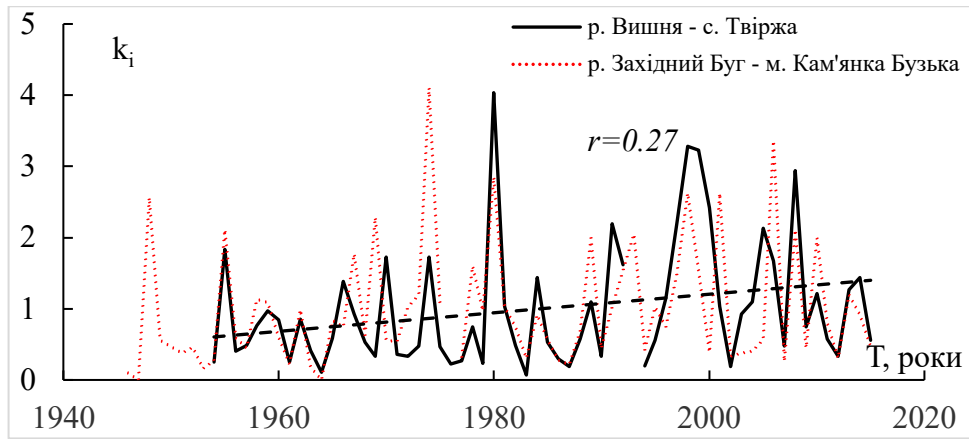


Рисунок 3.11 - Суміщені хронологічні графіки коливань шарів стоку дощових паводків р. Вишня – с. Твіржа 1954 – 2015 рр.

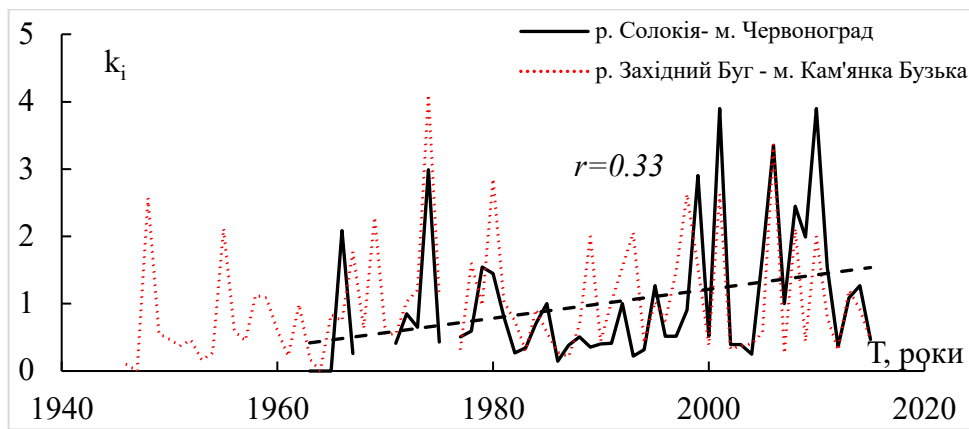


Рисунок 3.12 - Суміщені хронологічні графіки коливань шарів стоку дощових паводків р. Солокія – м. Червоноград 1971 – 2015 рр.

а)



б)



Рисунок 3.13 – Розподіл однорідних і неоднорідних рядів даних витрат води та шарів стоку за період весняного водопілля (а) та дощових паводків (б) басейну р. Вісла у межах України [18]

Територіальний розподіл гідрологічних постів, на яких відмічені неоднорідні ряди даних, наведений на рис. 3.14 – 3.15.

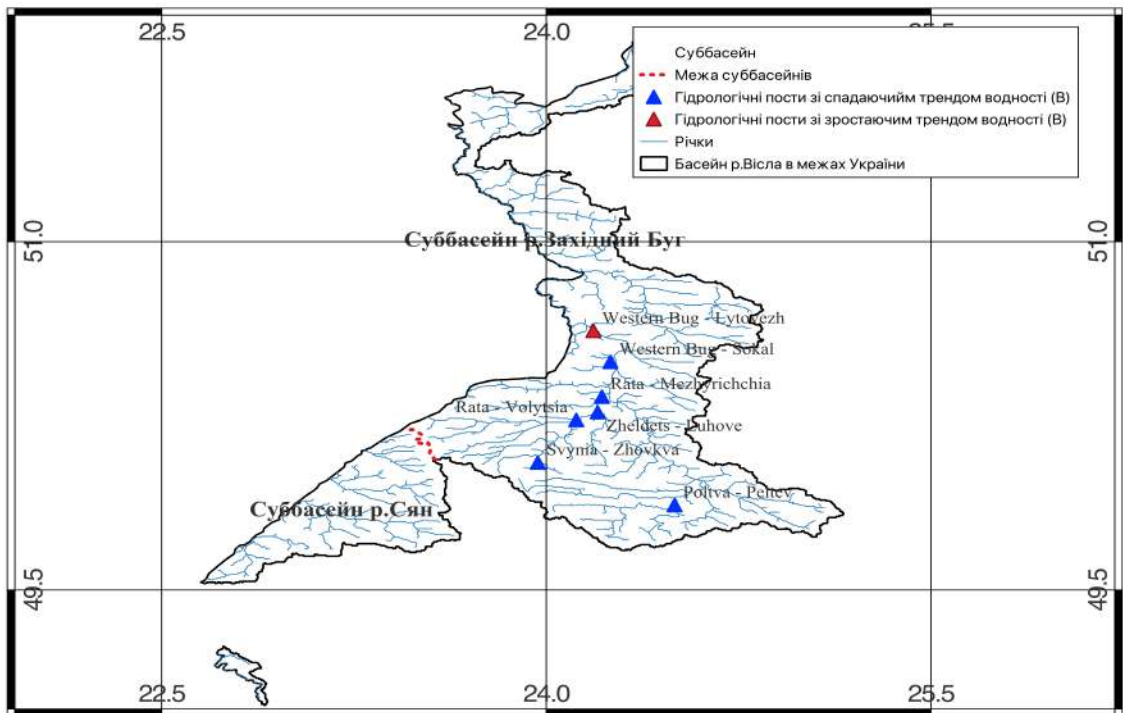


Рисунок 3.14 – Розташування гідрологічних постів зі зростаючими та спадаючими трендами водності під час весняного водопілля

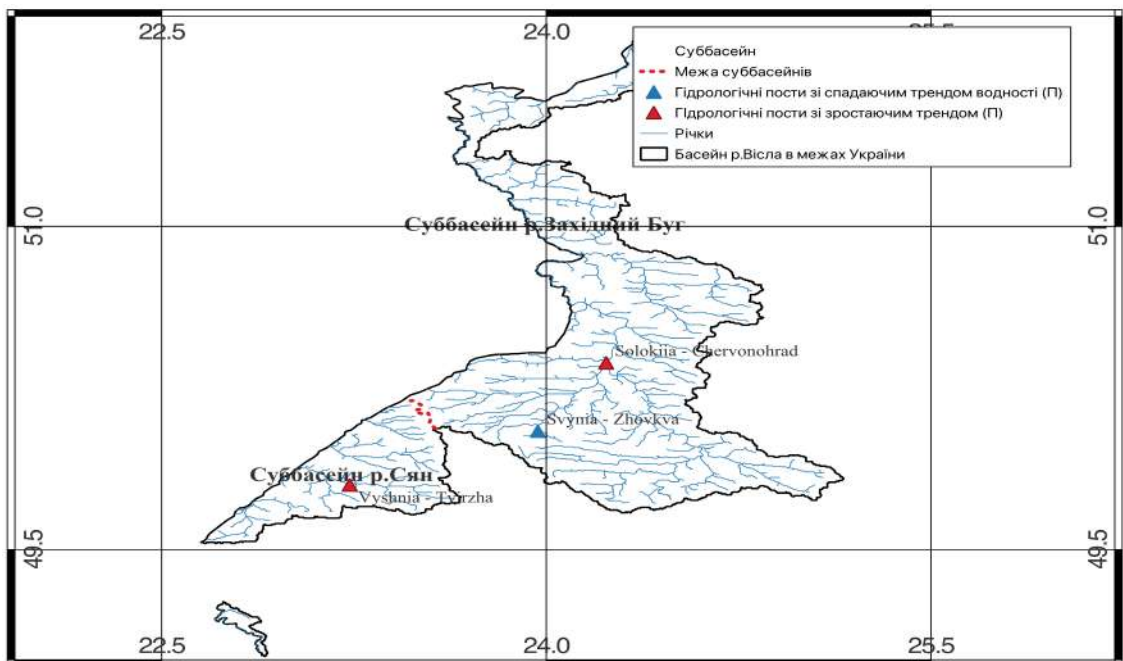


Рисунок 3.15 – Розташування гідрологічних постів зі зростаючими та спадаючими трендами водності під час дощових паводків

На представлених картах видно, що гідрологічні пости, на яких спостерігається спадаючий тренд водності розташовані у південно-східній частині басейну. Поодинокі пости зі зростаючим трендом водності відмічені у центральній та південно-західній частині (суббасейн Сяну) [18].

3.2 Дослідження циклічності максимального стоку весняного водопілля та дощових паводків річок басейну р. Вісла

Дослідження циклічності стоку недоцільно проводити, використовуючи тільки хронологічні графіки коливання стоку. Так, окремі роки високої або низької водності можуть сильно заважати визначенню закономірностей коливань річного стоку. Для того, щоб цьому запобігти, використовуються методи фільтрації або згладжування.

Існує велика кількість методів математичних фільтрів, за допомогою яких виявляють періодичні складові в коливальних рядах. Серед них є не тільки лінійні, але й нелінійні фільтри. Досить часто в практиці розрахунків використовуються різницево-інтегральні криві [5, 10].

Отже, для побудови різницево-інтегральних кривих відхилень спочатку розраховуються модульні коефіцієнти, відносні величини. Далі відхилення модульних коефіцієнтів від їх середнього багаторічного значення, яке дорівнює одиниці, послідовно складаються з урахуванням знаку.

Для кожного пункту спостереження було розраховано ординати, а потім були побудовані різницево-інтегральні криві.

В ході аналізу різницево-інтегральних кривих максимальних витрат води весняного водопілля річок басейну р. Вісла було визначено, що цикли водності у більшості співпадають між собою, що говорить про те, що обрані пункти спостереження мають синхронні коливання максимального стоку, тому можна використовувати для подальших розрахунків та співставляти між собою [5]. Також можна сказати про те, що для пунктів спостереження можна чітко виділити фази водності (рис. 3.16а-3.16в).

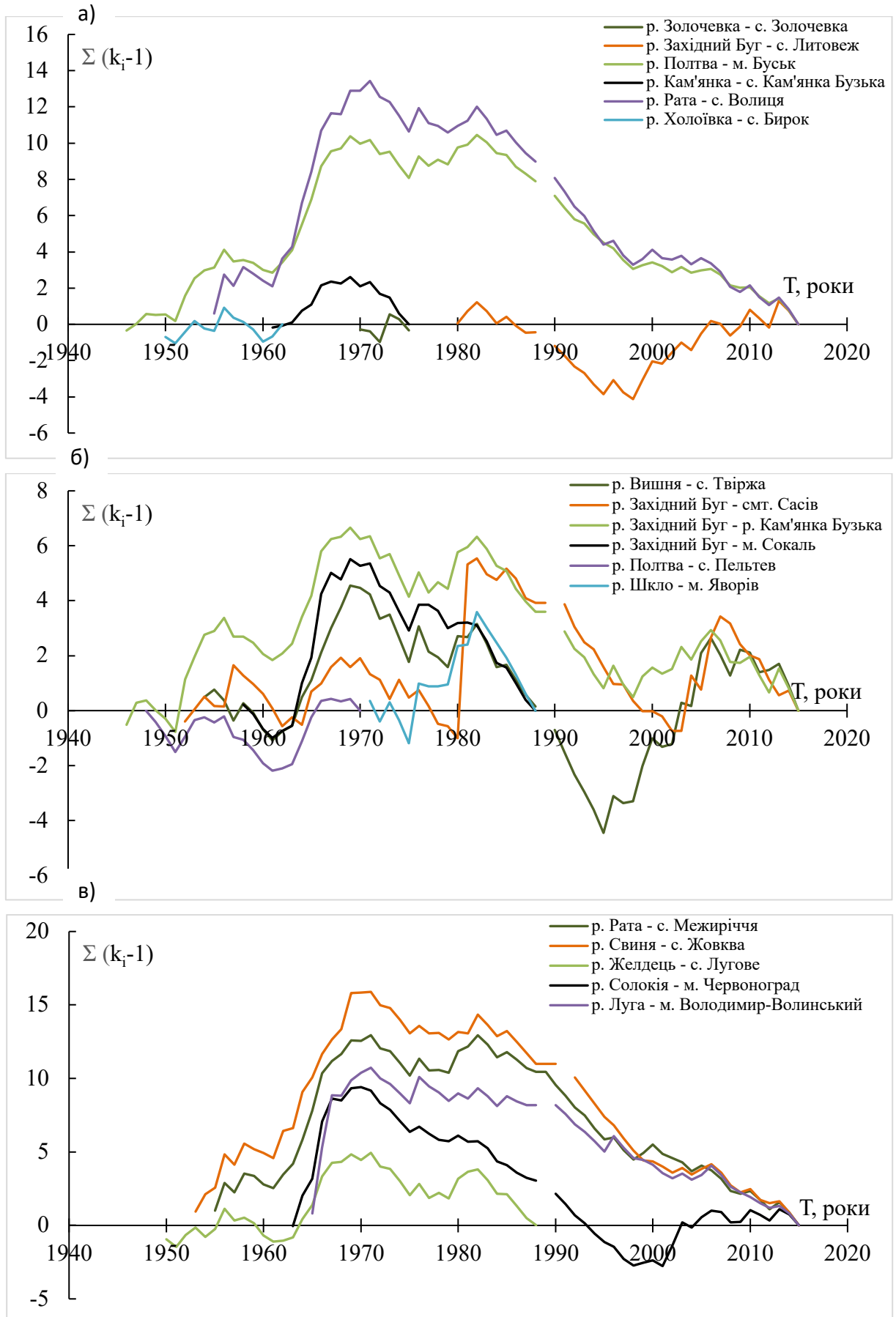
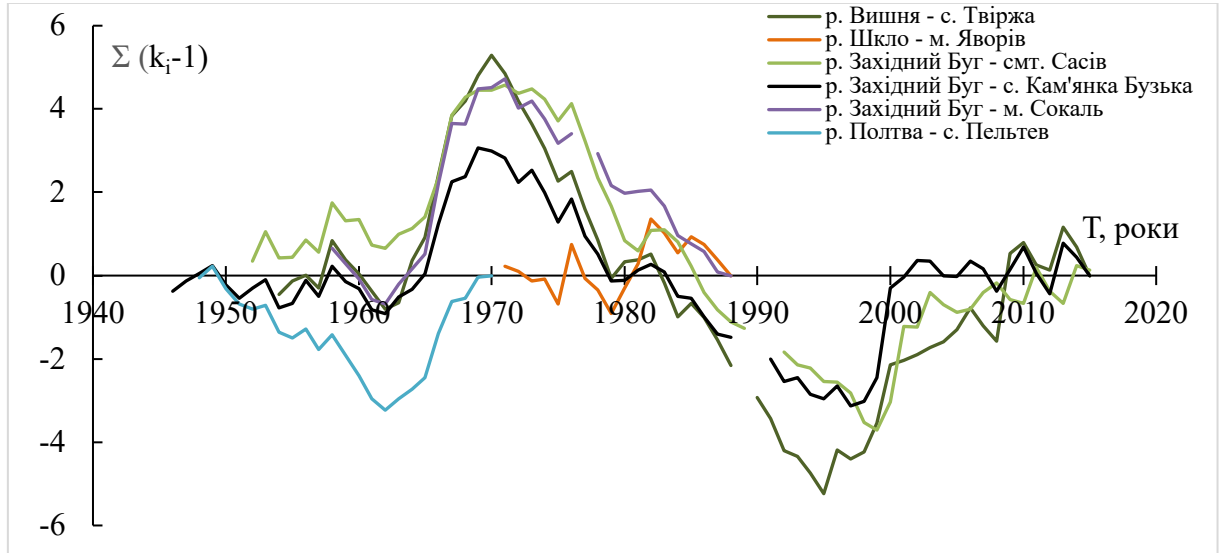


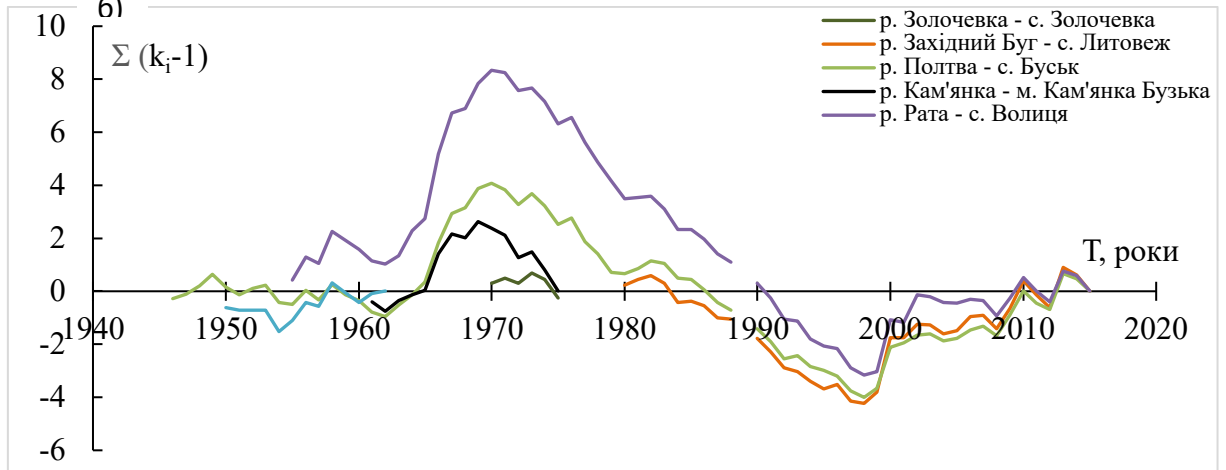
Рисунок 3.16 – Різницево-інтегральні криві максимальних витрат води весняного водопілля річок басейну р. Вісла

Аналізуючи різницево-інтегральні криві шарів стоку весняного водопілля річок басейну р. Вісла визначено, що фази водності співпадають між собою (рис. 3.17).

а)



б)



в)

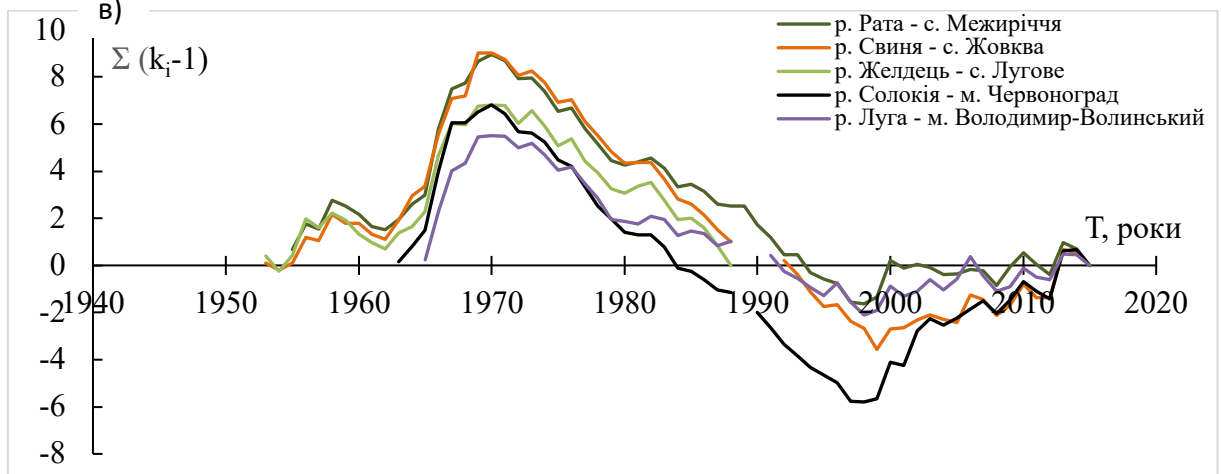


Рисунок 3.17 – Різницево-інтегральні криві шарів стоку весняного водопілля річок басейну р. Вісла

Різницево-інтегральні криві максимальних витрат води дощових паводків річок басейну р. Вісла характеризуються більшою амплітудою коливань у порівнянні з відповідними побудованими кривими максимальних витрат води весняного водопілля [5]. Для більшості пунктів спостереження цикли водності також співпадають між собою (рис. 3.18).

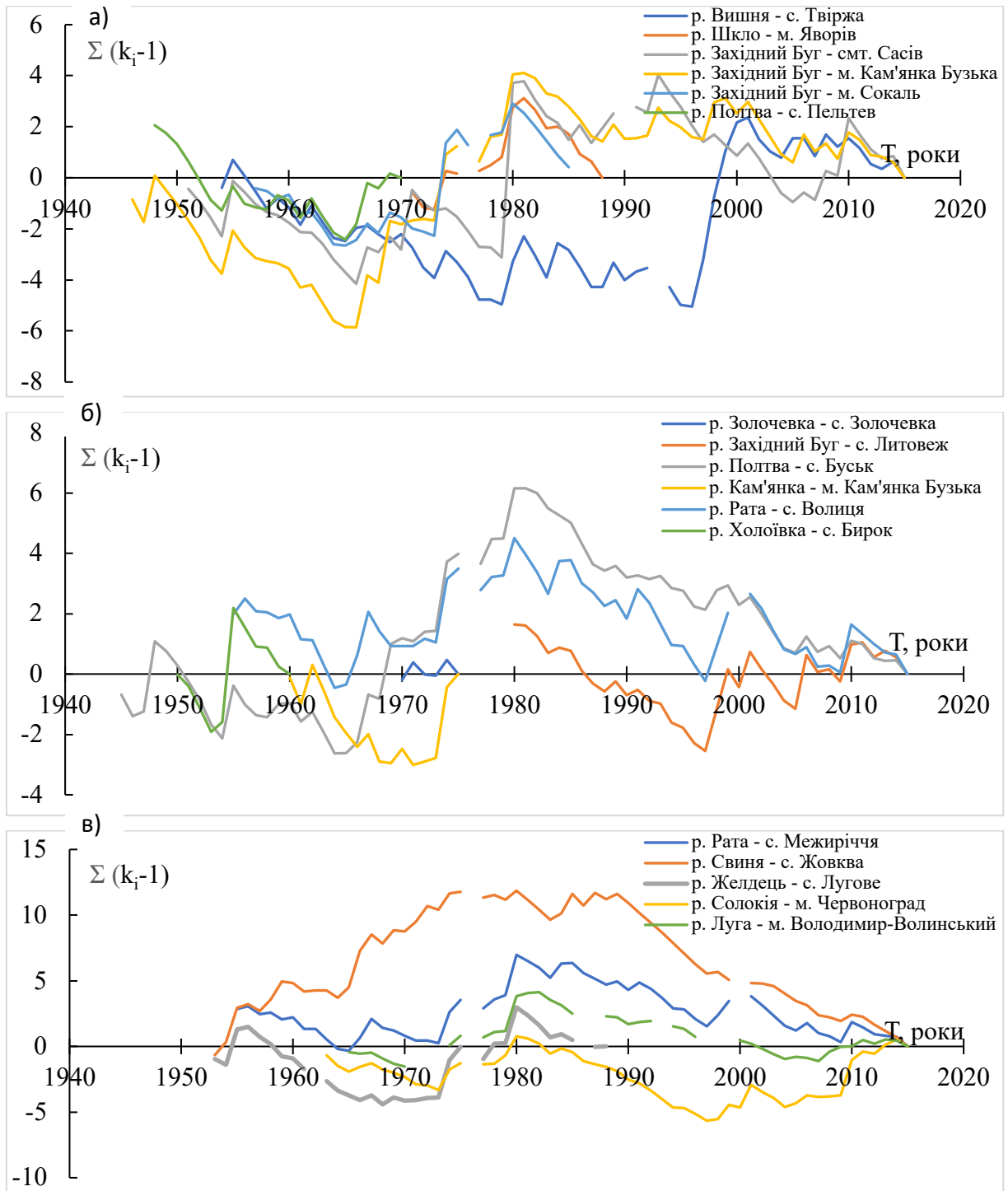


Рисунок 3.18 – Різницево-інтегральні криві максимальних витрат води дощових паводків річок басейну р. Вісла

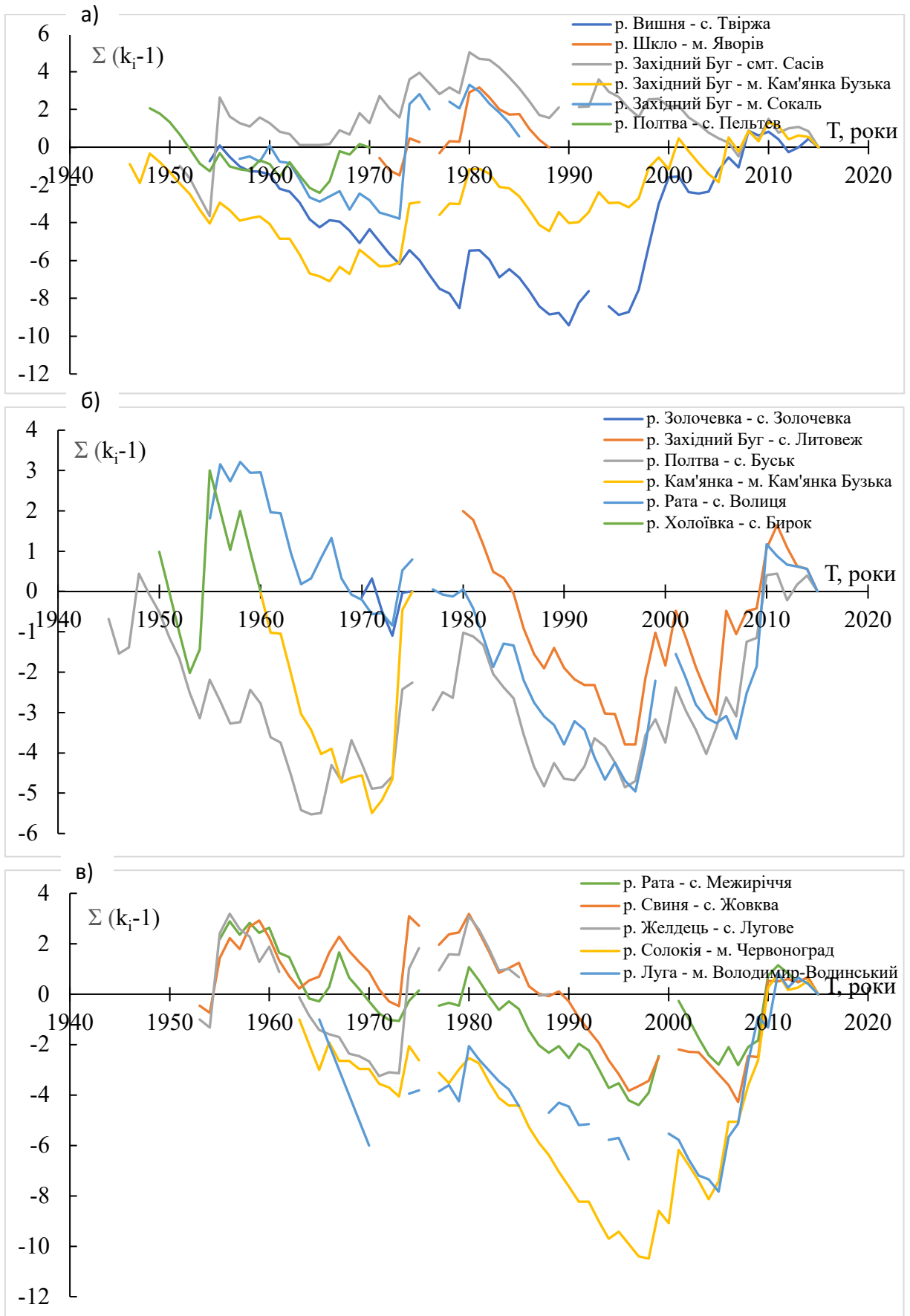


Рисунок 3.19 – Різницево-інтегральні криві шарів стоку дощових паводків річок басейну р. Вісла

Різницево-інтегральна крива витрат води дощових паводків, розрахована для посту р. Вишня – с. Твіржа характеризується асинфазністю відносно інших різницево-інтегральних кривих, цей факт можливо пов'язаний з тим, що ця річка відноситься до суббасейну Сяну, де синхронність коливань дещо відрізняється.

Подальший аналіз різницево-інтегральних кривих шарів стоку дощових паводків річок басейну р. Вісла показав, що для них також в цілому фази водності співпадають між собою (рис. 3.19а-3.19в), але в окремі роки після 1990 р. спостерігається асинфазність між коливанням стоку [5].

Для визначення синхронності коливань характеристик максимального стоку, таких як максимальні витрати води і шари стоку, в цілому по басейну р. Вісли в межах України побудовані осереднені різницево-інтегральні криві окремо для весняного водопілля та дощових паводків (рис. 3.20, 3.21) [18].

Їх аналіз показує, що для весняного водопілля до 1976 року максимальні витрати та шари стоку мали синхронні коливання, після чого для витрат води спостерігається коротка багатоводна фаза з 1977 до 1982 року, а потім настала тривала маловодна фаза до 1998 року; шари стоку тим часом продовжували перебувати у тривалій маловодній фазі з 1969 до 1998 року.

Після 1998 року обидві криві починають знову зростати, але після 2006 року для максимальних витрат багатоводна фаза змінюється на маловодну, а для шарів стоку триває й далі багатоводна фаза включно до 2015 року.

Для коливань водності дощових паводків спостерігається подібна картина (рис. 3.21) – до 1965 року максимальні витрати та шари стоку мали практично однакові відхилення від норми і їх коливання співпадали.

Після 1965 року для витрат води спостерігалася тривала багатоводна фаза, яка продовжувалась до 1980 року, а шари стоку в той час продовжували перебувати у маловодній фазі, що тривала до 1973 року, але потім, також як

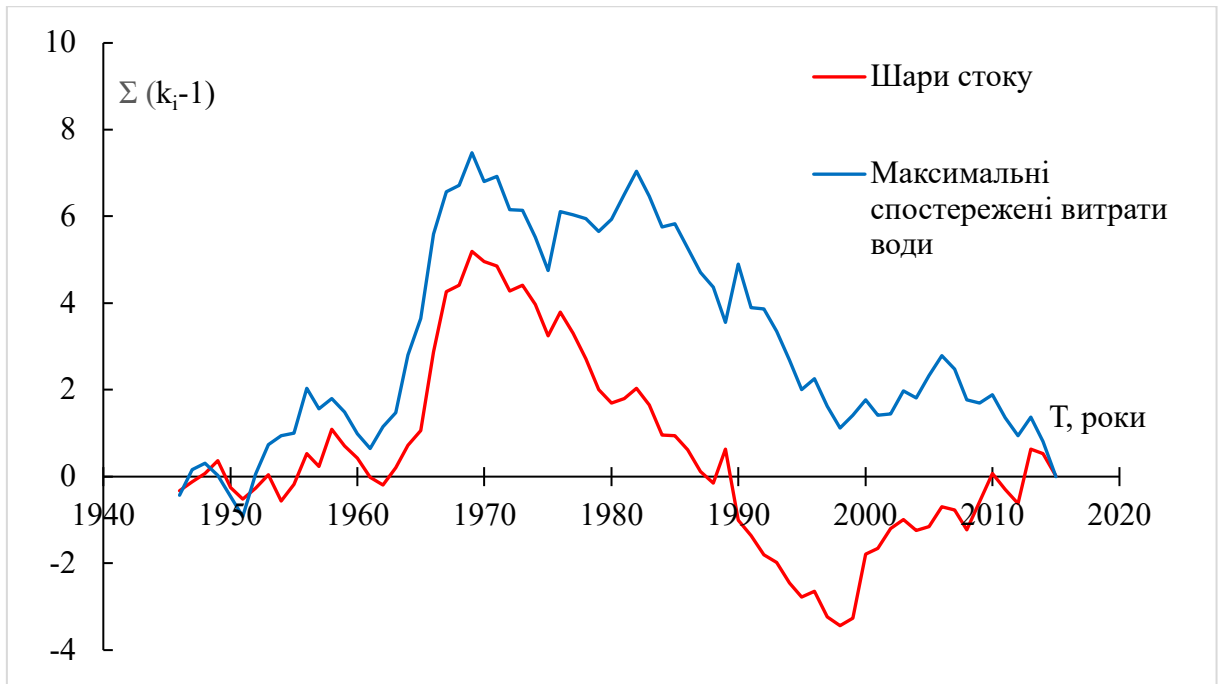


Рисунок 3.20 – Осереднені різницево-інтегральні криві витрат води та шарів стоку весняного водопілля річок басейну р. Вісла

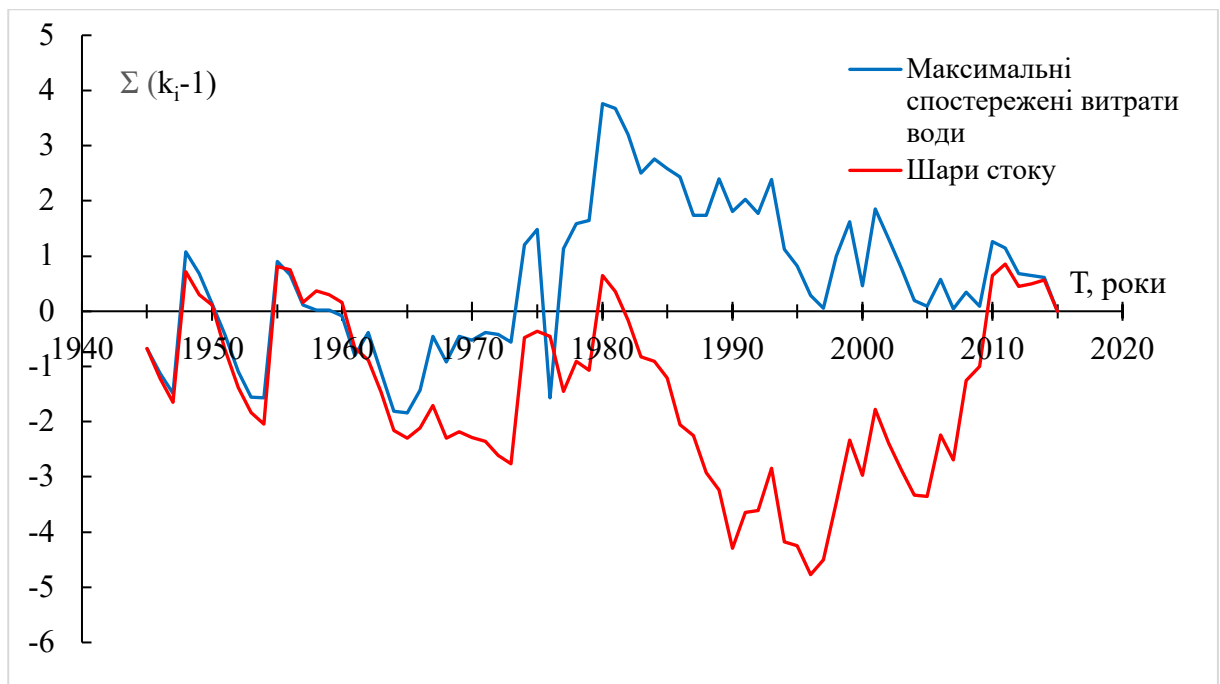


Рисунок 3.21 – Осереднені різницево-інтегральні криві витрат води та шарів стоку дощових паводків річок басейну р. Вісла

і витрати води, перейшли у багатоводну фазу до 1980 року. Після 1980 року обидві криві починають спадати й отже спостерігається маловодна фаза до 1996-1997 рр., надалі шари стоку переходять у багатоводну фазу до 2015 р. включно, а максимальні витрати після 2006 року й до 2015 включно перебувають у маловодній фазі.

Необхідно також відмітити той факт, що 1976 року паводки не були виражені на 11 гідрологічних постах з 14, на яких проводилися спостереження. До 1976 року коливання водності стоку весняного водопілля та дощових паводків були протифазні – максимальний стік весняного водопілля був у багатоводній фазі до 1969 р., а дощових паводків – у маловодній практично у той же період; потім фази змінились на протилежні, а починаючи з 1976 року коливання як максимальних витрат так й шарів стоку водопілля та паводків стали майже синхронні.

Більш детально всі фази водності, які біли визначені за осередненими різницево-інтегральними кривими витрат води та шарів стоку для весняного водопілля та дощових паводків представлені в табл. 3.1. Як добре ілюструє таблиця, часові ряди максимального стоку на досліджуваній території включають у всіх випадках щонайменше дві повні фази водності (багатоводні та маловодну фази) й отже є репрезентативними для подальшого визначення статистичних параметрів.

Отримані результати добре узгоджуються з попередніми дослідженнями Н.С. Лободи [19] щодо районування характеристик річного стоку, та В.А. Овчарук [20] щодо районування характеристик максимального стоку весняного водопілля. Обидва автори відносять досліджуваний басейн Вісли до одного підрайону, разом з верхів'ями Дністра та Прип'яті, в межах Західного району за синхронністю коливань стокових величин. Відмінністю даного дослідження є одночасний розгляд максимального стоку весняного водопілля та дощових паводків, що раніше не виконувалось.

Таблиця 3.1 – Фази водності весняного водопілля і дощових паводків в басейні р. Вісла в межах України

Фаза водності	Весняне водопілля		Дощові паводки	
	Витрати води	Шари стоку	Витрати води	Шари стоку
Багатоводна	1945 - 1969	1945 - 1969	1945 - 1948	1945 - 1948
Маловодна	1970 - 1979	1970 - 1988	1949 - 1953	1949 - 1953
Багатоводна	1980 - 1982	1989 - 2013	1954 - 1955	1954 - 1955
Маловодна	1983 - 1998	2014 - 2015	1955 - 1965	1955 - 1973
Багатоводна	1999 - 2006	-	1966 - 1980	1974 - 1980
Маловодна	2007 - 2015	-	1981 - 1997	1981 - 1996
Багатоводна	-	-	1998 - 2001	1997 - 2001
Маловодна	-	-	2002 - 2008	2002 - 2005
Багатоводна	-	-	2009 - 2010	2006 - 2010
Маловодна	-	-	2011 - 2015	2011 – 2015

3.3 Статистична обробка та узагальнення статистичних параметрів часових рядів по максимальному стоку весняного водопілля та дощових паводків річок басейну р. Вісла

Визначення числових характеристик випадкових величин є важливим етапом статистичного аналізу, а отже і подальшого дослідження.

В ході роботи виконана статистична обробка часових рядів даних максимального стоку дощових паводків і весняних водопіль по 17 гідрологічним постам за період від початку спостережень до 2015 р. Розраховані статистичні параметри характеристик максимального стоку дощових паводків і весняних водопіль для басейну р. Вісла в межах України, а саме: кількість років спостережень (n), середні багаторічні значення шарів стоку (\bar{Y}_m , мм) та витрат води (\bar{Q}_m , м³/с), коефіцієнти варіації (C_v), коефіцієнти

асиметрії (C_s), співвідношення C_v/C_s та коефіцієнти автокореляції (R_1), що характеризують ступінь залежності величин у ряді даних.

Відповідно з рекомендаціями СНіП 2.01.14-83 [7], статистична обробка рядів максимальних витрат води була виконана з використанням кривих біноміального й три-параметричного гама-розподілу. Статистичні параметри характеристик максимального стоку дощових паводків і весняних водопіль розраховані двома методами: методом моментів та найбільшої правдоподібності, результати представлені в додатку Б5-Б8.

Статистична обробка часових рядів максимальних витрат води весняного водопілля річок басейну р. Вісла (додаток Б.5) показала, що коефіцієнти варіації C_v , розраховані за методом моментів змінюються від 0,46 (р. Полтва - с. Пельтев) до 1,03 (р. Західний Буг – смт Сасів, р. Луга - м. Володимир-Волинський), коефіцієнти асиметрії C_s змінюються від 0,40 (р. Полтва - с. Пельтев) до 4,36 (р. Західний Буг - смт Сасів). Коефіцієнти варіації C_v , розраховані за методом найбільшої правдоподібності змінюються від 0,46 (р. Полтва - с. Пельтев) до 1,13 (р. Західний Буг – смт Сасів), відношення коефіцієнта асиметрії до коефіцієнта варіації C_s/C_v змінюються від 0,9 (р. Желдець - с. Лугове) до 7,0 (р. Золочевка - с. Золочевка). В середньому для досліджуваних постів відношення коефіцієнта асиметрії до коефіцієнта варіації C_s/C_v становить 2,5 (додаток Б.5) [5].

Аналогічно, результати статистичної обробки часових рядів шарів стоку весняного водопілля річок басейну р. Вісла (додаток Б.6) показали, що коефіцієнти варіації C_v , розраховані за методом моментів змінюються від 0,45 (р. Полтва - с. Пельтев) до 0,78 (р. Солокія - м. Червоноград), коефіцієнти асиметрії C_s змінюються від 0,20 (р. Холоївка - х. Бирок) до 2,17 (р. Західний Буг - м. Сокаль). Коефіцієнти варіації C_v , розраховані за методом найбільшої правдоподібності змінюються від 0,44 (р. Золочевка - с. Золочевка) до 0,81 (р. Західний Буг - м. Сокаль), відношення коефіцієнта асиметрії до коефіцієнта варіації C_s/C_v змінюються від 0,60 (р. Холоївка - х. Бирок) до 3,9

(р. Західний Буг - м. Сокаль). В середньому для досліджуваних постів відношення коефіцієнта асиметрії до коефіцієнта варіації C_s/C_v складає 2,0 [5].

В додатку Б.7 представлені результати визначення статистичних характеристик часових рядів максимальних витрат води дощових паводків річок басейну р. Вісла показали, що коефіцієнти варіації C_v , розраховані за методом моментів змінюються від 0,50 (р. Золочевка - с. Золочевка) до 1,16 (р. Західний Буг - смт Сасів), коефіцієнти асиметрії C_s змінюються від 0,21 (р. Золочевка - с. Золочевка) до 4,10 (р. Західний Буг - смт Сасів). Коефіцієнти варіації C_v , розраховані за методом найбільшої правдоподібності змінюються від 0,52 (р. Золочевка - с. Золочевка) до 1,31 (р. Західний Буг - смт Сасів), відношення коефіцієнта асиметрії до коефіцієнта варіації C_s/C_v змінюються від 0,8 (р. Золочевка - с. Золочевка) до 5,8 (р. Луга - м. Володимир-Волинський). В середньому для досліджуваних постів відношення коефіцієнта асиметрії до коефіцієнта варіації C_s/C_v складає 3,0 [5].

З додатку Б.8, де наведені результати статистичної обробки часових рядів шарів стоку дощових паводків річок басейну р. Вісла видно, що коефіцієнти варіації C_v , розраховані за методом моментів змінюються від 0,69 (р. Золочевка - с. Золочевка) до 1,41 (р. Західний Буг - м. Сокаль), коефіцієнти асиметрії C_s змінюються від 0,51 (р. Золочевка - с. Золочевка) до 3,83 (р. Західний Буг - м. Сокаль). Коефіцієнти варіації C_v , розраховані за методом найбільшої правдоподібності змінюються від 0,74 (р. Золочевка - с. Золочевка) до 1,74 (р. Західний Буг - м. Сокаль), відношення коефіцієнта асиметрії до коефіцієнта варіації C_s/C_v змінюються від 1,0 (р. Золочевка - с. Золочевка) до 4,7 (р. Західний Буг - м. Сокаль). В середньому для досліджуваних постів відношення коефіцієнта асиметрії до коефіцієнта варіації C_s/C_v складає 2,5 [5].

З метою порівняння розрахованих за двома методами значень коефіцієнту варіації побудовані графіки (рис. 3.22 – 3.23). З отриманих графіків видно, що результати розрахунку коефіцієнта варіації витрат води та шарів стоку весняного водопілля практично не відрізняються (рис. 3.22). В середньому, значення коефіцієнтів варіації витрат води за методом найбільшої

правдоподібності вищі на 4%, а для шарів стоку на 1%. Подібні результати спостерігаються при порівнянні відповідних коефіцієнтів варіації витрат води та шарів стоку дощових паводків, але при значеннях вище

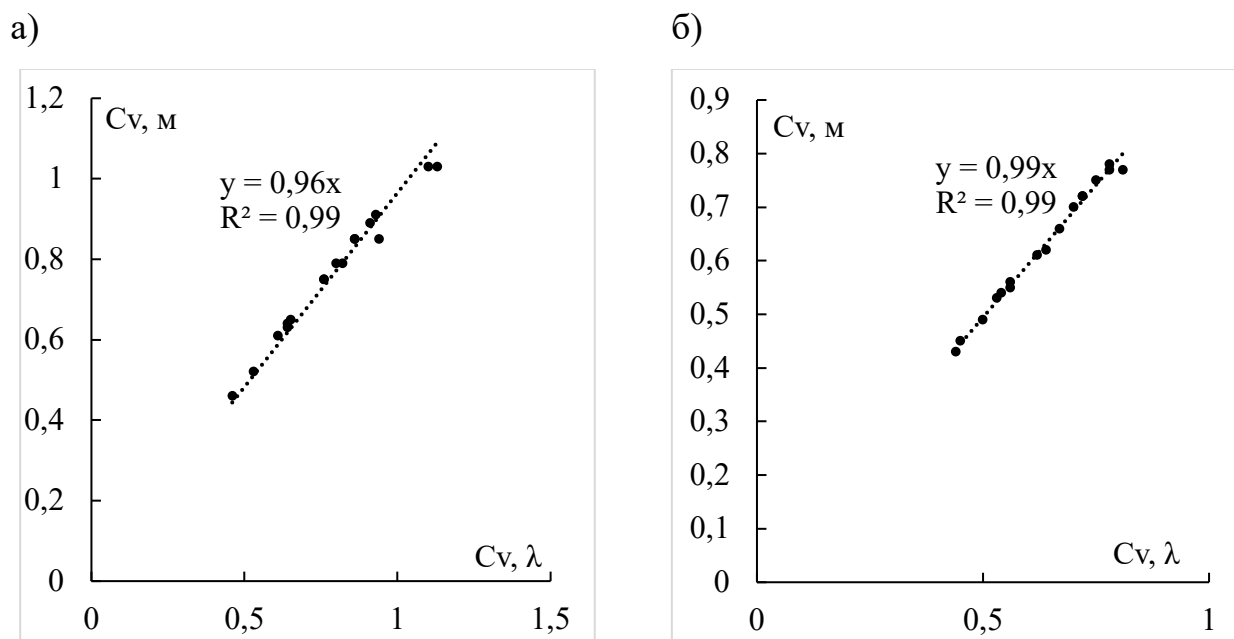


Рисунок 3.22 – Порівняння коефіцієнтів варіації максимальних витрат води (а) та шарів стоку (б) весняного водопілля, розрахованих за методами моментів і найбільшої правдоподібності

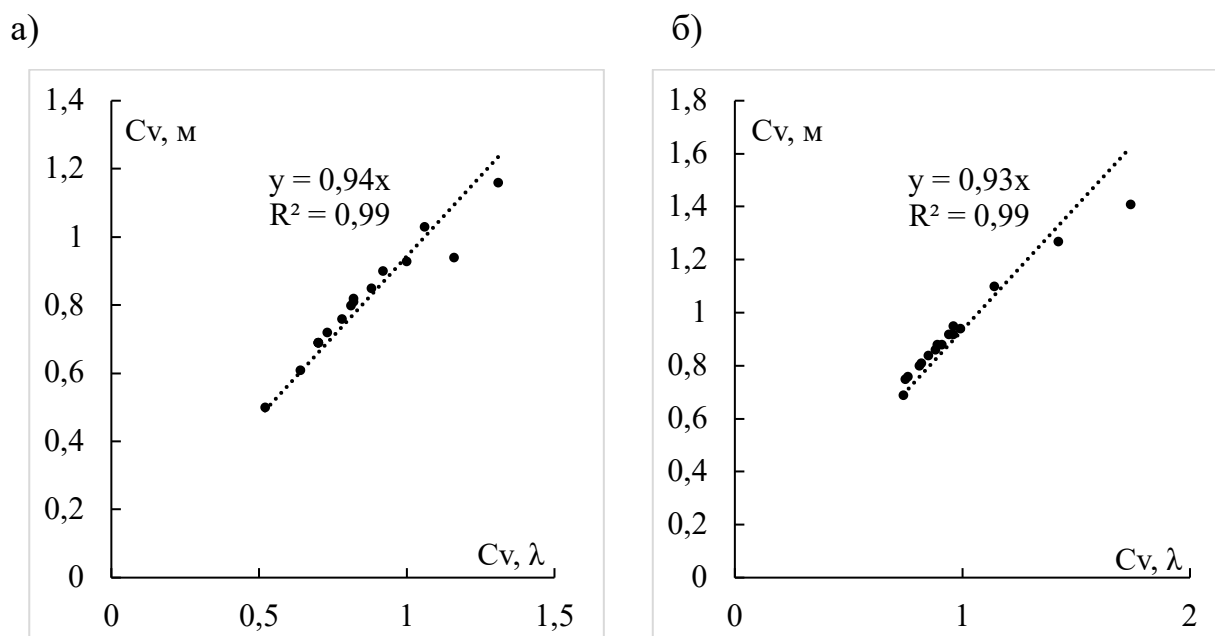


Рисунок 3.23 – Порівняння коефіцієнтів варіації максимальних витрат води (а) та шарів стоку (б) дощових паводків, розрахованих за методами моментів і найбільшої правдоподібності

$C_v > 1.0$ розбіжності збільшуються. Так, розраховані за методом найбільшої правдоподібності значення коефіцієнтів варіації дають результати більші на 6% (для витрат води) і на 7% (для шарів стоку) у порівнянні з такими, що розраховані за методом моментів.

Для порівняння отриманих коефіцієнтів варіації характеристик стоку весняного водопілля та дощових паводків були побудовані відповідні графіки (рис. 3.24).

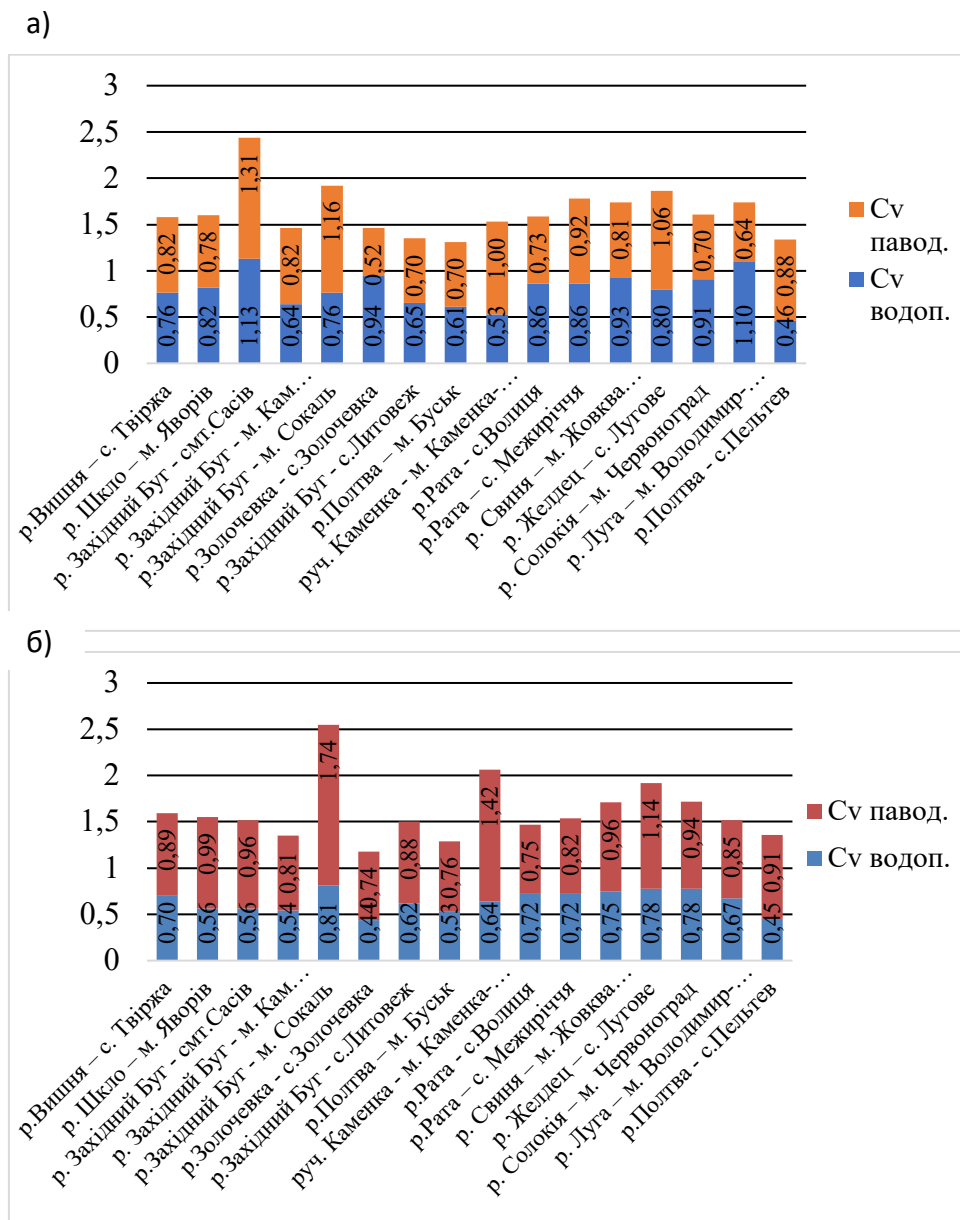


Рисунок 3.24 – Порівняння коефіцієнтів варіації максимальних витрат води (а) та шарів стоку (б) дощових паводків та весняних водопілля, розрахованих за методом найбільшої правдоподібності

З рис. 3.24 видно, що коефіцієнти варіації часових рядів дощових паводків та весняного водопілля практично не пов'язані між собою, але все ж можна відмітити, що для витрат води паводків вони дещо менші коефіцієнтів варіації витрат води весняного водопілля. Протилежна ситуація спостерігається для коефіцієнтів варіації шарів стоку - для періоду дощових паводків вони більші за коефіцієнти шарів стоку весняного водопілля.

Оскільки при значеннях $C_v > 0.5$ рекомендується користуватися методом найбільшої правдоподібності, то для подальших розрахунків використані значення C_v та C_s/C_v , розраховані за цим методом [6].

Наступним етапом в роботі здійснені розрахунки шарів стоку та витрат води 1%-ї забезпеченості весняного водопілля та дощових паводків басейну річки Вісла за допомогою трьохпараметричного гама-розподілу [14].

За результатами розрахунків, максимальні витрати води дощових паводків рідкісної імовірності перевищення змінюються від 14,8 м³/с (р. Свиня - м. Жовква (м. Нестерів), до 488 м³/с (р. Західний Буг - м. Сокаль) (табл. 3.2), а відповідні шари стоку коливаються від 38,0 мм (р. Луга - м. Володимир-Волинський), до 130 мм (р. Західний Буг - м. Сокаль) (табл. 3.3) [5].

Аналогічні розрахунки, проведені для максимальних витрат води весняного водопілля рідкісної імовірності перевищення змінюються від 9,60 м³/с (р. Золочевка - с. Золочевка), до 540 м³/с (р. Західний Буг - м. Сокаль) (табл.3.4), відповідні шари стоку збільшуються від 72,8 мм (р. Шкло - м. Яворів), до 168 мм (р. Західний Буг – смт Сасів) (табл. 3.5) [5].

Виконане порівняння розрахованих витрат води та шарів стоку весняного водопілля (рис. 3.25) та дощових паводків (рис. 3.26) з відповідними максимальними спостереженими характеристиками, а також максимальних витрат весняного водопілля та дощових паводків 1% ймовірності перевищення (рис.3.27).

Таблиця 3.2 – Розрахунок максимальних витрат дощових паводків забезпеченості ($P = 1\%$) при $C_s = 3,0 C_v$

Річка-пост	F , км ²	\bar{Q}_m , м ³ /с	C_v	$K_{1\%}$	$Q_{1\%}$, м ³ /с
Вишня - с. Твіржа	562	28,4	0,82	4,05	115
Шкло - м. Яворів	236	9,15	0,78	3,87	35,4
Західний Буг - смт Сасів	107	5,92	1,31	6,31	37,4
Західний Буг - м. Кам'янка-Бузька	2350	50,5	0,82	4,05	205
Західний Буг - м. Сокаль	6250	86,9	1,16	5,61	488
Золочевка - с. Золочевка	90,0	7,00	0,52	2,74	19,2
Західний Буг - с. Литовеж	6740	81,8	0,70	3,50	286
Полтва - м. Буськ	1440	29,2	0,69	3,46	101
стр. Кам'янка - м. Кам'янка-Бузька	141	5,62	1,00	4,87	27,3
Рата - с. Волиця	1140	26,2	0,73	3,64	95,5
Рата - с. Межиріччя	1740	37,0	0,92	4,50	167
Свиня - м. Жовква (м.Нестерів)	98,6	3,71	0,81	4,00	14,8
Желдець - с. Лугове	246	9,32	1,06	5,15	48,0
Солокія - м. Червоноград	931	12,6	0,70	3,50	44,0
Луга - м. Володимир-Волинський	1270	9,08	0,64	3,24	29,4
Полтва - с. Пельтев	725	19,0	0,88	4,32	81,9

Таблиця 3.3 – Розрахунок шарів стоку дощових паводків забезпеченості ($P = 1\%$) при $C_s = 2,5 C_v$

Річка-пост	F , км ²	\bar{Y}_m , мм	C_v	$K_{1\%}$	$Y_{1\%}$, мм
Вишня - с. Твіржа	562	17,3	0,89	4,28	74,0
Шкло - м. Яворів	236	13,5	0,99	4,73	64,0
Західний Буг – смт Сасів	107	25,7	0,96	4,60	118
Західний Буг - м. Кам'янка-Бузька	2350	18,6	0,81	3,91	73,0
Західний Буг - м. Сокаль	6250	15,5	1,74	8,40	130
Золочевка - с. Золочевка	90,0	11,6	0,74	3,60	42,0
Західний Буг - с. Литовеж	6740	14,0	0,88	4,23	59,0
Полтва - м. Буськ	1440	15,8	0,76	3,69	58,0
стр. Кам'янка - м. Кам'янка-Бузька	141	17,4	1,42	6,81	119
Рата - с. Волиця	1140	12,8	0,75	3,64	46,0

Кінець таблиці 3.3

Рата - с. Межиріччя	1740	13,3	0,82	3,96	53,0
Свиня - м. Жовква (м.Нестерів)	98,6	9,12	0,96	4,60	42,0
Желдець - с. Лугове	246	14,1	1,14	5,45	77,0
Солокія - м. Червоноград	931	11,8	0,94	4,50	53,0
Луга - м. Володимир-Волинський	1270	9,22	0,85	4,09	38,0
Полтва - с. Пельтев	725	12,3	0,91	4,37	54,0

Таблиця 3.4 – Розрахунок максимальних витрат весняного водопілля забезпеченості ($P = 1\%$) при $C_s = 2,0 C_v$

Річка-пост	$F, \text{км}^2$	$\bar{Q}_m, \text{м}^3/\text{с}$	C_v	$K_{1\%}$	$Q_{1\%}, \text{м}^3/\text{с}$
Вишня - с. Твіржа	562	34,8	0,76	3,54	123
Шкло - м. Яворів	236	9,83	0,82	3,80	37,3
Західний Буг - смт Сасів	107	6,19	1,13	5,19	32,1
Західний Буг - м. Кам'янка-Бузька	2350	75,3	0,64	3,05	230
Західний Буг - м. Сокаль	6250	153	0,76	3,54	540
Золочевка - с. Золочевка	90,0	2,22	0,94	4,33	9,60
Західний Буг - с. Литовеж	6740	115	0,65	3,09	356
Полтва - м. Буськ	1440	41,4	0,61	2,93	121
стр. Кам'янка - м. Кам'янка-Бузька	141	9,08	0,53	2,62	23,8
Рата - с. Волиця	1140	43,5	0,86	3,97	173
Рата - с. Межиріччя	1740	61,0	0,86	3,97	242
Свиня - м. Жовква (м.Нестерів)	98,6	4,56	0,93	4,28	19,5
Желдець - с. Лугове	246	13,7	0,80	3,71	51,0
Солокія - м. Червоноград	931	21,2	0,91	4,20	89,0
Луга - м. Володимир-Волинський	1270	20,6	1,10	5,05	104
Полтва - с. Пельтев	725	31,1	0,46	2,37	73,6
Холоївка - х. Бирок	46,0	2,42	0,64	3,05	7,39

Таблиця 3.5 – Розрахунок шарів стоку весняного водопілля забезпеченості ($P = 1\%$) при $C_s = 1,5 C_v$

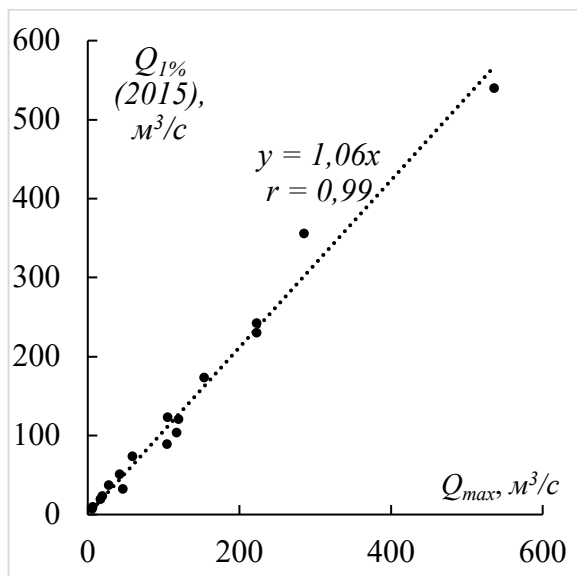
Річка-пост	F , км ²	\bar{Y}_m , мм	C_v	$K_{1\%}$	$Y_{1\%}$, мм
Вишня - с. Твіржа	562	49,0	0,70	3,11	152
Шкло - м. Яворів	236	27,8	0,56	2,62	72,8
Західний Буг - смт Сасів	107	64,3	0,56	2,62	168
Західний Буг - м. Кам'янка-Бузька	2350	49,0	0,54	2,56	125
Західний Буг - м. Сокаль	6250	44,5	0,81	3,53	157
Золочевка - с. Золочевка	90	43,5	0,44	2,22	96,6
Західний Буг - с. Литовеж	6740	39,1	0,62	2,83	111
Полтва - м. Буськ	1440	44,9	0,53	2,52	113
стр. Кам'янка - м. Кам'янка-Бузька	141	48,2	0,64	2,90	140
Рата - с. Волиця	1140	43,2	0,72	3,19	138
Рата - с. Межиріччя	1740	41,5	0,72	3,19	132
Свиня - м. Жовква (м.Нестерів)	98,6	31,6	0,75	3,30	104
Желдець - с. Лугове	246	37,9	0,78	3,41	129
Солокія - м. Червоноград	931	37,7	0,78	3,41	128
Луга - м. Володимир-Волинський	1270	26,9	0,67	3,01	80,8
Полтва - с. Пельтев	725	54,0	0,45	2,26	122
Холоївка - х. Бирок	46	49,2	0,50	2,42	119

Як видно з рис. 3.25 – 3.26, розраховані 1%-і характеристики стоку відповідають спостереженим максимальним, що підтверджується високими коефіцієнтами кореляції ($r = 0,98-0,99$).

За період весняного водопілля розраховані витрати води рідкісної імовірності перевищення вищі на 6% (для дощових паводків – на 15%) за спостережених, і відповідні шари стоку також більші на 6% (для дощових паводків – на 16%).

Якщо ж порівнювати між собою максимальні витрати води весняних водопіль та дощових паводків ймовірністю настання 1 раз на 100 років (рис. 3.27), то можна відмітити, що в середньому такі витрати будуть для весняних водопіль більше на 17.5%.

а)



б)

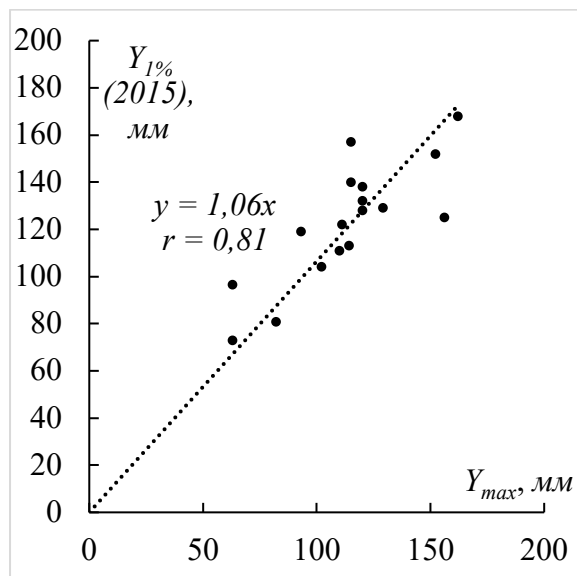
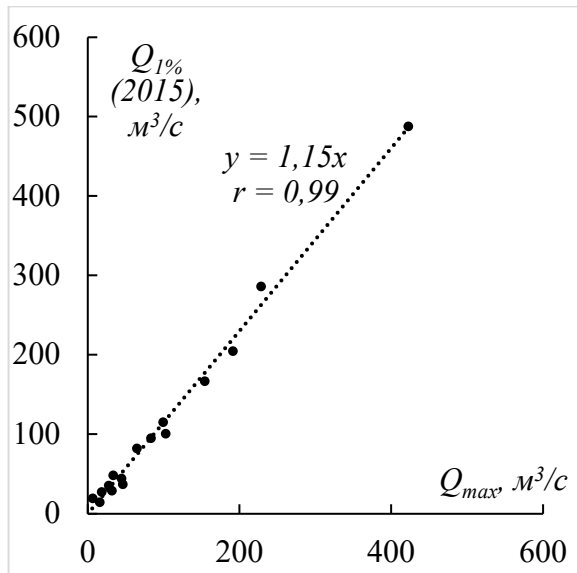


Рисунок 3.25 – Порівняння розрахованих витрат води (а) та шарів стоку (б) 1%-ї забезпеченості весняного водопілля з максимальними спостереженими на річках басейну Вісли в межах України

а)



б)

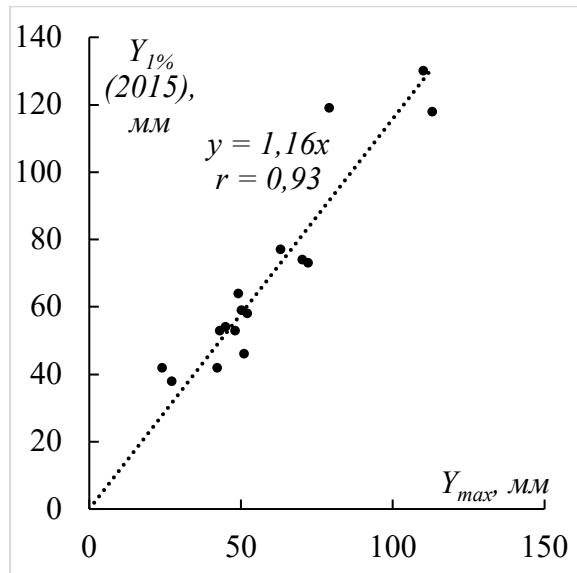


Рисунок 3.26 – Порівняння розрахованих витрат води (а) та шарів стоку (б) 1%-ї забезпеченості дощових паводків з максимальними спостереженими на річках басейну Вісли в межах України

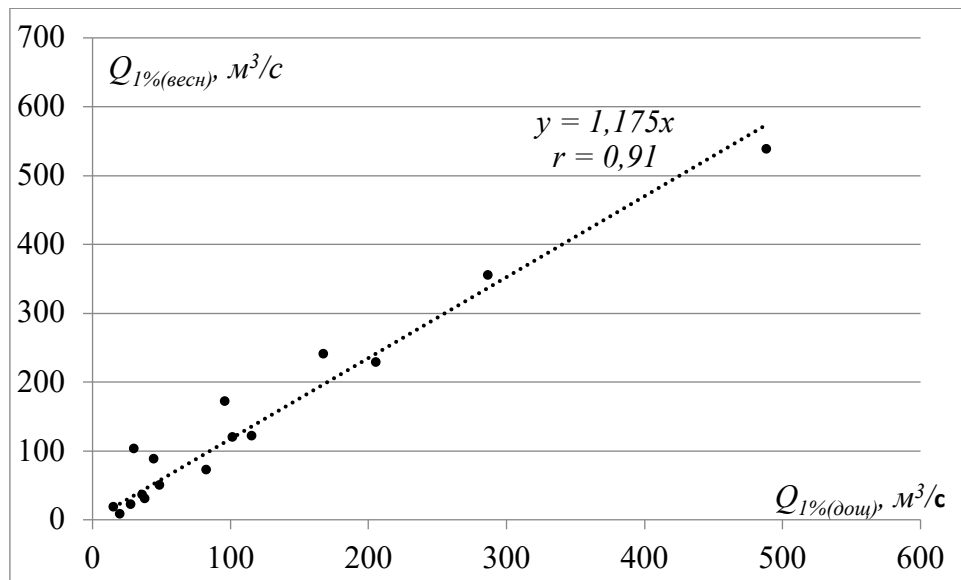


Рисунок 3.27 – Порівняння розрахованих витрат води 1%-ї забезпеченості весняного водопілля (вісь ординат) та дощових паводків (вісь абсцис) для річок басейну Вісли в межах України

3.4 Оцінка точності вихідної інформації по максимальному стоку весняного водопілля та дощових паводків басейну р. Вісла

При обґрунтуванні розрахункових параметрів моделей формування максимального стоку необхідно знати, які похибки, перш за все, закладені у вихідній інформації. Одним з рекомендованих варіантів визначення точності обчислення максимальних витрат рідкої ймовірності перевищення ($Q_{1\%}$, m^3/s) є визначення їх середньої квадратичної похибки. Так, наприклад, середня квадратична похибка квантилів, розрахованих за допомогою трипараметричного гамма-розподілу, визначається по номограмах, які розробили С.Н. Крицький та М.Ф. Менкель [21].

Для 1%-х квантилів максимальних витрат вод та шарів стоку весняного водопілля і дощових паводків на річках басейну Вісли результати наводяться у табл. 3.6 – 3.9.

Таблиця 3.6 – Розрахунки середньоквадратичних похибок максимальних витрат води весняного водопілля річок в басейні р.Вісла в межах України забезпеченістю $P=1\%$ ($C_s / C_v = 2,5$)

№ за/п	Річка – пост	$Q_{1\%}$ м ³ /с	n , років	C_v	$E\sigma$	$\sigma Q_{1\%}$
1	Вишня - с. Твіржа	123	61	0,76	1,02	13,1
2	Шкло - м. Яворів	37,3	17	0,82	1,04	25,2
3	Західний Буг - смт Сасів	32,1	62	1,13	1,23	15,6
4	Західний Буг – м. Кам’янка-Бузька	230	67	0,64	0,95	11,6
5	Західний Буг – м. Сокаль	540	30	0,76	1,02	18,6
6	Золочевка - с. Золочевка	9,60	6	0,94	1,20	49,0
7	Західний Буг - с. Литовеж	356	36	0,65	0,95	15,8
8	Полтва - м. Буськ	121	68	0,61	0,90	10,9
9	стр. Кам’янка - м. Кам’янка-Бузька	23,8	15	0,53	0,82	21,2
10	Рата - с. Волиця	173	59	0,86	1,07	13,9
11	Рата - с. Межиріччя	242	59	0,86	1,07	13,9
12	Свиня - м. Жовква (м.Нестерів)	19,5	59	0,93	1,20	15,6
13	Желдець - с. Лугове	51,0	38	0,80	1,05	17,0
14	Солокія - м. Червоноград	89,0	51	0,91	1,10	15,4
15	Луга - м. Володимир-Волинський	104	48	1,10	1,30	18,8
16	Полтва - с. Пельтев	73,6	23	0,46	0,70	14,6
17	Холоївка - х. Бирок	7,39	13	0,64	0,95	26,3
						$\sigma Q_{1\%} \pm 18,6\%$

Таблиця 3.7 – Розрахунки середньоквадратичних похибок шарів стоку весняного водопілля річок в басейні р.Вісла в межах України забезпеченістю $P=1\%$ ($C_s / C_v = 2,0$)

№ за/п	Річка – пост	$Y_{1\%}$ мм	n , років	C_v	$E\sigma$	$\sigma Y_{1\%}$
1	Вишня - с. Твіржа	152	61	0,70	0,99	12,7
2	Шкло - м. Яворів	72,8	17	0,56	0,85	20,6
3	Західний Буг - смт Сасів	168	62	0,56	0,85	10,8
4	Західний Буг - м. Кам’янка-Бузька	125	67	0,54	0,84	10,3
5	Західний Буг - м. Сокаль	157	30	0,81	1,04	19,0
6	Золочевка - с. Золочевка	96,6	6	0,44	0,73	29,8
7	Західний Буг - с. Литовеж	111	36	0,62	0,93	15,5
8	Полтва - м. Буськ	113	68	0,53	0,84	10,2
9	стр. Кам’янка - м. Кам’янка-Бузька	140	15	0,64	0,95	24,5
10	Рата - с. Волиця	138	59	0,72	1,00	13,0

Кінець таблиці 3.7

№ за/п	Річка – пост	$Y_{1\%}$, мм	n , років	C_v	$E\sigma$	$\sigma Y_{1\%}$
11	Рата - с. Межиріччя	132	59	0,72	1,00	13,0
12	Свиня - м. Жовква (м.Нестерів)	104	59	0,75	1,02	13,3
13	Желдець - с. Лугове	129	38	0,78	1,06	17,2
14	Солокія - м. Червоноград	128	51	0,78	1,06	14,8
15	Луга - м. Володимир-Волинський	80,8	48	0,67	0,96	13,9
16	Полтва - с. Пельтев	122	23	0,45	0,73	15,2
17	Холоївка - х. Бирок	119	13	0,50	0,80	22,2
						$\overline{\sigma Y_{1\%}} \pm 16,2\%$

Таблиця 3.8 – Розрахунки середньоквадратичних похибок максимальних витрат води дощових паводків річок в басейні р.Вісла в межах України забезпеченістю $P=1\%$ ($C_s / C_v = 3,0$)

№ за/п	Річка – пост	$Q_{1\%}$, м ³ /с	n , років	C_v	$E\sigma$	$\sigma Q_{1\%}$
1	Вишня - с. Твіржа	115	56	0,82	1,13	15,1
2	Шкло - м. Яворів	35,4	17	0,78	1,10	26,7
3	Західний Буг - смт Сасів	37,4	57	1,31	1,67	22,1
4	Західний Буг - м. Кам'янка-Бузька	205	63	0,82	1,19	15,0
5	Західний Буг - м. Сокаль	488	24	1,16	1,55	31,6
6	Золочевка - с. Золочевка	19,2	6	0,52	0,83	33,9
7	Західний Буг - с. Литовеж	286	36	0,70	1,08	18,0
8	Полтва - м. Буськ	101	64	0,69	1,08	13,5
9	стр. Кам'янка - м. Кам'янка-Бузька	27,3	11	1,00	1,38	41,6
10	Рата - с. Волиця	95,5	54	0,73	1,10	15,0
11	Рата - с. Межиріччя	167	54	0,92	1,28	17,4
12	Свиня - м. Жовква (м.Нестерів)	14,8	56	0,81	1,18	15,8
13	Желдець - с. Лугове	48,0	27	1,06	1,40	26,9
14	Солокія - м. Червоноград	44,0	44	0,70	1,08	16,3
15	Луга - м. Володимир-Волинський	29,4	35	0,64	1,03	17,4
16	Полтва - с. Пельтев	81,9	17	0,88	1,24	30,1
						$\overline{\sigma Q_{1\%}} \pm 22,3\%$

Таблиця 3.9 – Розрахунки середньоквадратичних похибок шарів стоку дощових паводків річок в басейні р.Вісла в межах України забезпеченістю $P=1\%$ ($C_s / C_v = 2,5$)

№ за/п	Річка – пост	$Y_{1\%}$, мм	n , років	C_v	$E\sigma$	$\sigma Y_{1\%}$
1	Вишня - с. Твіржа	74,0	56	0,89	1,24	16,6
2	Шкло - м. Яворів	64,0	17	0,99	1,38	33,5
3	Західний Буг - смт Сасів	118	57	0,96	1,33	17,6
4	Західний Буг - м. Кам'янка-Бузька	73,0	63	0,81	1,15	14,5
5	Західний Буг - м. Сокаль	130	24	1,74	2,00	40,8
6	Золочевка - с. Золочевка	42,0	6	0,74	1,10	44,9
7	Західний Буг - с. Литовеж	59,0	36	0,88	1,24	20,7
8	Полтва - м. Буськ	58,0	64	0,76	1,11	13,9
9	стр. Кам'янка - м. Кам'янка-Бузька	119	11	1,42	1,68	50,7
10	Рата - с. Волиця	46,0	54	0,75	1,11	15,1
11	Рата - с. Межиріччя	53,0	54	0,82	1,19	16,2
12	Свиня - м. Жовква (м.Нестерів)	42,0	56	0,96	1,33	17,8
13	Желдець - с. Лугове	77,0	27	1,14	1,52	29,3
14	Солокія - м. Червоноград	53,0	44	0,94	1,30	19,6
15	Луга - м. Володимир-Волинський	38,0	35	0,85	1,21	20,5
16	Полтва - с. Пельтев	54,0	17	0,91	1,25	30,3
						$\overline{\sigma Y_{1\%}} \pm 25,1\%$

З табл. 3.6-3.9 видно, що середньоквадратичні похибки 1%-их квантилів максимальних витрат води весняного водопілля для річок басейну р. Вісла в межах України складають $\pm 18,6\%$, а середньоквадратичні похибки 1%-их квантилів шарів стоку весняного водопілля, відповідно, $\pm 16,2\%$. Для максимального стоку дощових паводків середньоквадратичні похибки 1%-их квантилів зростають й для максимальних витрат води становлять $\pm 22,3\%$, а для шарів стоку - $\pm 25,1\%$.

Такі результати є достатньо зрозумілими та закономірними, враховуючи недостатню тривалість часових рядів на багатьох постах спостережень, а також більшу мінливість стоку дощових паводків у порівнянні з весняним водопіллям.

Висновки до розділу 3

1. На даних офіційно опублікованих матеріалів стаціонарних спостережень за максимальним стоком весняного водопілля та дощових паводків виконаний статистичний та гідролого-генетичний аналіз часових рядів за весь наявний період;
2. Характерною особливістю розглядуваного басейну є невелика кількість постів гідрологічних спостережень та наявність достатньої кількості рядів з невеликою тривалістю спостережень; середня тривалість спостережень за максимальним стоком річок басейну Віслу в межах України становить лише 40 років;
3. Перевірка статистичної однорідності рядів максимального стоку показала, що з сумарних 52 рядів даних (окремо по максимальних витратах та шарах стоку весняного водопілля і дощових паводків) лише 12 є неоднорідними, тобто однорідні 72%. Для періоду дощових паводків це 84%, а для періоду весняного водопілля - 69%. Такий результат може свідчити, що окрім місцевих та антропогенних факторів відчувається також вплив змін клімату, який перш за все проявляється на величинах максимального стоку весняного водопілля, що зменшуються за рахунок теплих зим та незначних запасів воді у снігу на початок водопілля;
4. Аналіз територіального розподілу водозборів зі трендами різної направленості показує, що гідрологічні пости, на яких спостерігається спадаючий тренд водності розташовані у південно-східній частині басейну, а поодинокі пости зі зростаючим трендом відмічені у центральній та південно-західній частині (суббасейн Сяну);
5. Дослідження циклічності коливань стоку показало, що цикли водності для більшості рядів спостережень співпадають між собою, отже спостерігаються синхронні коливання максимального стоку. Деяка асинхронність коливань стоку проявляється через коротку тривалість

- рядів спостережень. Вперше була проаналізована циклічність коливань максимального стоку одночасно для весняних водопіль та дощових паводків за даними по 2015 рік;
6. Статистична обробка часових рядів максимального стоку в басейні Вісли в межах України виконана стандартними методами – моментів та найбільшої правдоподібності, але вперше з використанням даних до 2015 року включно;
 7. На базі теоретичного трьох-параметричного гама-розподілу С. Н. Крицького та М. Ф. Менкеля отримані величини максимальних витрат води та шарів стоку ймовірністю перевищення 1 раз на 100 років. На відміну від зарубіжної практики, наявність окремих вихідних рядів даних дозволяє генетично розподіляти максимальний стік річок на стік весняного водопілля та дощових паводків та визначати розрахункові характеристики для цих фаз водності окремо;
 8. Порівняння теоретично розрахованих величин максимального стоку і максимальних спостережених на гідрологічних постах за наявний період показало дуже високий ступень їх кореляції ($r = 0,98-0,99$) та добру збіжність. В обох випадках (паводки і водопілля) розраховані величини дещо перевищують спостережені, але це цілком логічно, враховуючи що максимальна тривалість спостережень становить лише 67 років, й отже максимальна витрата ймовірністю перевищення 1 раз на 100 років могла в цей період не спостерігатися, а наявні максимуми відповідають забезпеченості від 3 до 5%;
 9. Оцінка середньоквадратичних похибок визначення 1%-их квантилів максимального стоку річок басейну р. Вісла в межах України показала, що вони коливаються від $\pm 16,2\%$ (шари стоку весняного водопілля) до $\pm 25,1\%$ (шари стоку дощових паводків); середня точність вихідної інформації становить $\pm 20,5\%$, що відповідає точності вимірювання максимальних витрат води на стаціонарній гідрометеорологічній мережі України.

Перелік використаних джерел до розділу 3

1. Ресурсы поверхностных вод СССР . / под ред. М. С. Каганера. Т. 6. Украина и Молдавия. Вып. 1. Западная Украина и Молдавия. Ленинград : Гидрометеиздат, 1969. 884 с.
2. Основные гидрологические характеристики. Т.6. Вып. 1-3. Ленинград : Гидрометеиздат, 1963-1970, 1971 – 1975, 1976 – 1980 pp.
3. Державний водник кадастр. Багаторічні дані про режим та ресурси поверхневих вод суші (за 1981 – 2000 pp. та весь період спостережень), Вип.1, ч.1. Річки. Басейни Західного Бугу, Дунаю, Дністра, Південного Бугу. Київ : центральна геофізична обсерваторія, 2008. 765 с.
4. Державний водник кадастр. Щорічні дані про режим та ресурси поверхневих вод суші. Ч.1. Річки і канали. Витрати води Т.ІІ, Вип. 1 Басейн Західного Бугу, Дунаю, Дністра, Південного Бугу. Київ : центральна геофізична обсерваторія.
5. Регіональні наукові дослідження в області гідрологічних розрахунків і прогнозів водного режиму річок і водойм України. Просторово-часовий аналіз гідрометеорологічної і гідрологічної інформації по окремих регіонах України : Звіт про НДР. ДР № 0118U00121 (проміжний) / Є. Д. Гопченко та ін. Одеса, Одеський державний екологічний університет, 2020. 369 с.
6. Пособие по определению расчетных гидрологических характеристик. Ленинград : Гидрометеиздат, 1984. 447 с.
7. Определение расчетных гидрологических характеристик СНиП 2.01.14-83. Москва : Госком СССР по делам строительства, 1983. 97 с.
8. Determinarea caracteristicilor hidrologice pentru Condițiile republicii Moldova. CPD.01.05-2012. 178 p.
9. Руководство по гидрологической практике. Т. II. Управление водными ресурсами и практика применения гидрологических методов. Женева : ВМО, 2012. № 168.

- 10.Рождественский А. В., Чеботарев А. И. Статистические методы в гидрологии. Ленинград : Гидрометеиздат, 1974. 423 с.
- 11.Школьний Є. П., Лосєва І. Д., Гончарова Л. Д. Обробка та аналіз гідрометеорологічної інформації : навчальний підручник. Київ : Міносвіти України, 1999. 600 с.
- 12.Рождественский А. В., Ежов А. В., Сахарюк А. В. Оценка точности гидрологических расчётов. Ленинград : Гидрометеиздат, 1990. С. 276.
- 13.Горбачова Л. О. Методичні підходи щодо оцінки однорідності та стаціонарності гідрологічних рядів спостережень. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*. 2014. Вип. 1(32). С. 22-31.
- 14.Гопченко Є. Д., Лобода Н. С., Овчарук В. А. Гідрологічні розрахунки : підручник. Одеса : ТЕС, 2014. 484 с.
- 15.Галік О. І., Рокочинський А. М., Олексюк Т. В. Застосування непараметричних статистичних критеріїв оцінки однорідності рядів спостережень за сучасними локальними змінами температури повітря та опадів. *Вісник Дніпропетровського державного аграрного університету*. Дніпропетровськ, 2011. № 1. С. 96-99.
- 16.Ромащенко М. І., Рокочинський А. М., Галік О. І. Сучасні зміни клімату та їх прояви від глобального до регіонального рівнів. *Гідромеліорація та гідротехнічне будівництво*. Рівне, 2007. Вип. 32. С. 65-79.
- 17.Данилюк Ю. З. Червоноград. Енциклопедія історії України : у 10 т. / Інститут історії України НАН України. Київ : Наукова думка, 2013. Т. 10 : Т-Я / редкол.: В. А. Смолій (голова) та ін. 784 с.
- 18.Мартинюк М. О., Овчарук В. А. Просторова і часова мінливість максимального стоку в басейні Вісли в умовах кліматичних змін. *Екологічні науки*. Київ, 2023. № 3(48). С. 148-155.
- 19.Лобода Н. С. Расчеты и обобщения характеристик годового стока рек Украины в условиях антропогенного влияния: монография. Одесса: Экология, 2005. 208 с.

20. Овчарук В. А. Максимальний стік весняного водопілля рівнинних річок України : монографія. Одеса : Видавничий дім «Гельветика», 2020. 300с.
21. Крицкий С. Н., Менкель М. Ф. Гидрологические основы управления речным стоком. Москва : Наука, 1981. 285 с.

РОЗДІЛ 4

РЕГІОНАЛЬНІ ОБГРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ОПЕРАТОРНОЇ
МОДЕЛІ ФОРМУВАННЯ МАКСИМАЛЬНОГО СТОКУ РІЧОК БАСЕЙНУ

Р. ВІСЛА

При розрахунках максимального стоку річок басейну р. Вісла в межах України використана операторна модель формування максимального стоку, основне розрахункове рівняння якої представлено формулою виду (2.60)

Однією з головних складових операторної моделі формування максимального стоку є схиловий приплив, модуль якого визначається за формулою (2.61).

Шари стоку рідкісної імовірності перевищення весняного водопілля або дощових паводків визначаються за результатами стандартної статистичної обробки.

Коефіцієнт часової нерівномірності схилового припливу обґрунтовується через коефіцієнт часової нерівномірності руслового стоку $\left(\frac{m+1}{m}\right)[1]$:

$$\frac{m+1}{m} = \frac{\overline{T_n} \overline{Q_m}}{\overline{Y_m} F} 86,4; \quad (4.1)$$

де $\overline{T_n}$, $\overline{Q_m}$, $\overline{Y_m}$ – середні багаторічні значення тривалості паводку або водопілля, максимальні витрати води за паводок або водопілля, шари стоку;
 F – площа водозбору, км².

Таким чином, коефіцієнти нерівномірності руслового стоку узагальнюються по території з врахуванням площі водозборів і верхнє граничне значення $\frac{m+1}{m}$ при $F \rightarrow 0$ буде дорівнювати коефіцієнту нерівномірності схилового припливу.

В рамках операторної моделі тривалість схилового припливу (T_0) визначається чисельним методом, користуючись генетичною формулою

А.М. Бефані та базовою формулою максимального стоку (2.60). Розрахункові рівняння тривалості схилового припливу (T_0) можна представити у вигляді:

- при $\frac{t_p}{T_0} < 1,0$

$$T_0 = \left\{ \frac{\varepsilon_F Y_m}{n q_m} \left[(n+1) T_0^n - \frac{m_1 + 1}{n + m_1 + 1} t_p^n \right] \right\}^{\frac{1}{n+1}}; \quad (4.2)$$

- при $\frac{t_p}{T_0} \geq 1,0$

$$T_0 = \left[\left(\frac{m_1 + n + 1}{n + 1} - \frac{q_m}{Y_m \varepsilon_F} \right) \frac{m_1 (n + m_1 + 1)}{n + 1} t_p^{m_1} \right]^{\frac{1}{m_1}}; \quad (4.3)$$

Коефіцієнт русло-заплавного регулювання ε_F визначається оберненим способом на одному з етапів розрахунку (T_0). Для спрощення розрахунку (T_0) на кафедрі гідрології суші ОДЕКУ була розроблена програма "Caguar", за допомогою якої можливо проводити наведені вище розрахунки [2].

Для визначення трансформаційної функції використовуються розрахункові рівняння, які будуть відрізнятися залежно від співвідношення $\frac{t_p}{T_0}$:

при $0 < \frac{t_p}{T_0} < 1,0$

$$\psi \left(\frac{t_p}{T_0} \right) = 1 - \frac{m_1 + 1}{(n + 1)(m_1 + n + 1)} \left(\frac{t_p}{T_0} \right)^n; \quad (4.4)$$

при $\frac{t_p}{T_0} \geq 1,0$

$$\psi \left(\frac{t_p}{T_0} \right) = \frac{n}{n + 1} \frac{T_0}{t_p} \left[\frac{m_1 + 1}{m_1} - \frac{n + 1}{m_1 (m_1 + n + 1)} \left(\frac{T_0}{t_p} \right)^{m_1} \right]; \quad (4.5)$$

де n і m_1 – показники степені в рівнянні кривих схилового припливу та ізохрон;

t_p – час руслового добігання, год.

Коефіцієнт зарегулювання максимального стоку озерами і водосховищами проточного типу r , а також коефіцієнт для переходу від 1% забезпеченості до інших забезпеченості (λ_p) розраховуються згідно рекомендацій нормативного документу СНіП 2.01.14-83 [3].

Головною перевагою цієї моделі, як показано в розділі 2, є те, що вона є універсальною, тобто однаково може бути застосована як для весняних водопіль, так й для дощових паводків, при чому без обмежень щодо величин площ водозборів.

4.1 Просторове узагальнення розрахункових шарів стоку весняного водопілля і дощових паводків в басейні р. Вісла в межах України

З метою використання запропонованої методики для визначення максимального стоку невивчених у гідрологічному відношенні річок необхідно виконати просторові узагальнення основних параметрів.

Як було зазначено у розділі 1, гідрологічні пости в басейні р. Вісла в межах України розташовані нерівномірно, і фактично, північна частина водозбору не покрита мережею гідрологічних спостережень.

Для отримання можливості географічного узагальнення параметрів максимального стоку по всьому досліджуваному басейну були обрані додаткові 5 гідрологічних постів в басейні р. Прип'ять, що знаходиться північніше (рис. 4.1).

Порівняльний аналіз осереднених по басейну Вісли різницево-інтегральних кривих та аналогічних кривих для обраних сусідніх водозборів з басейну р. Прип'ять показав, що фази коливання водності співпадають між собою (рис. 4.2 – 4.3), й такий результат дає підставу для використання додаткової інформації у подальших розрахунках.

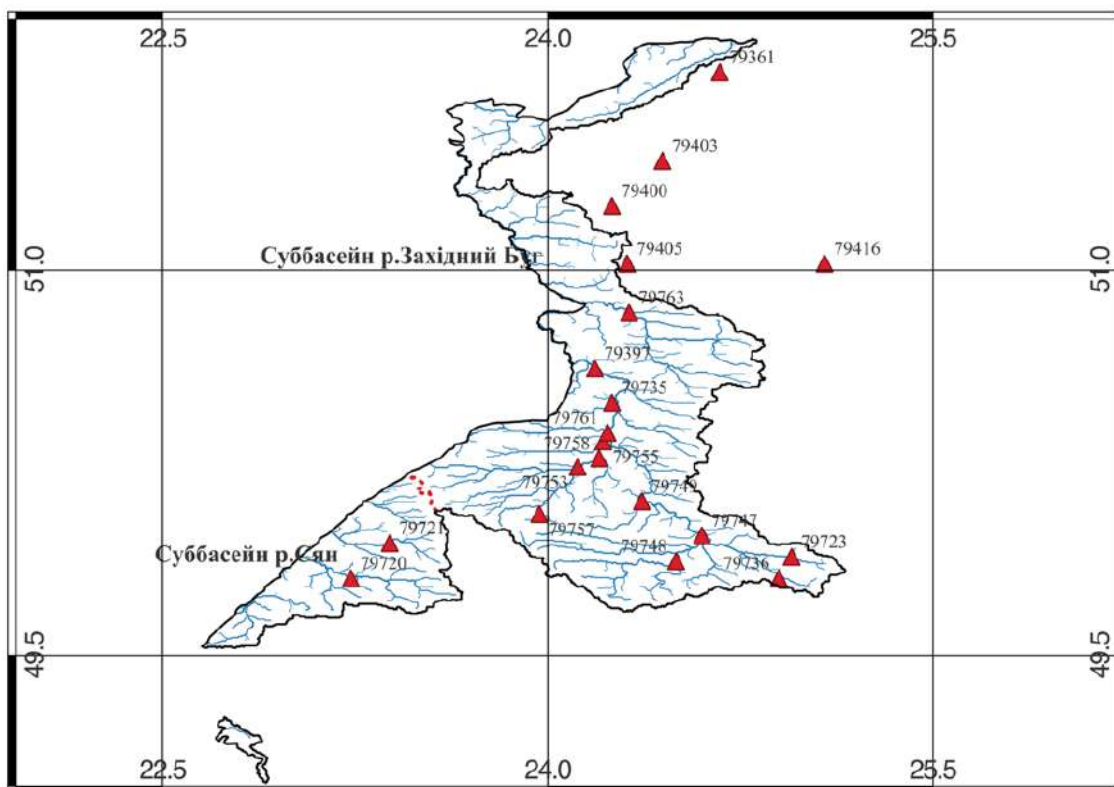


Рисунок 4.1 – Карта-схема гідрологічних постів басейну р. Вісла з додатковими постами басейну р. Прип'ять

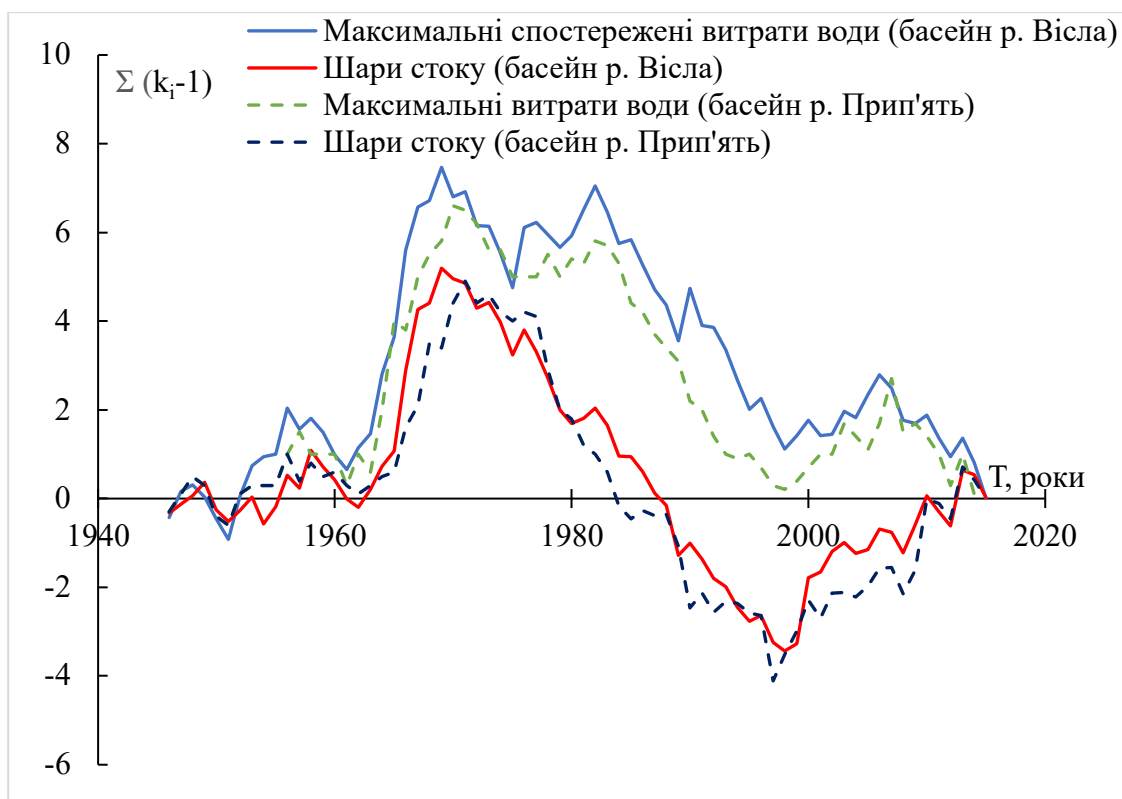


Рисунок 4.2 – Осереднені різницево-інтегральні криві витрат води та шарів стоку весняного водопілля річок басейну р. Вісла та басейну р. Прип'ять

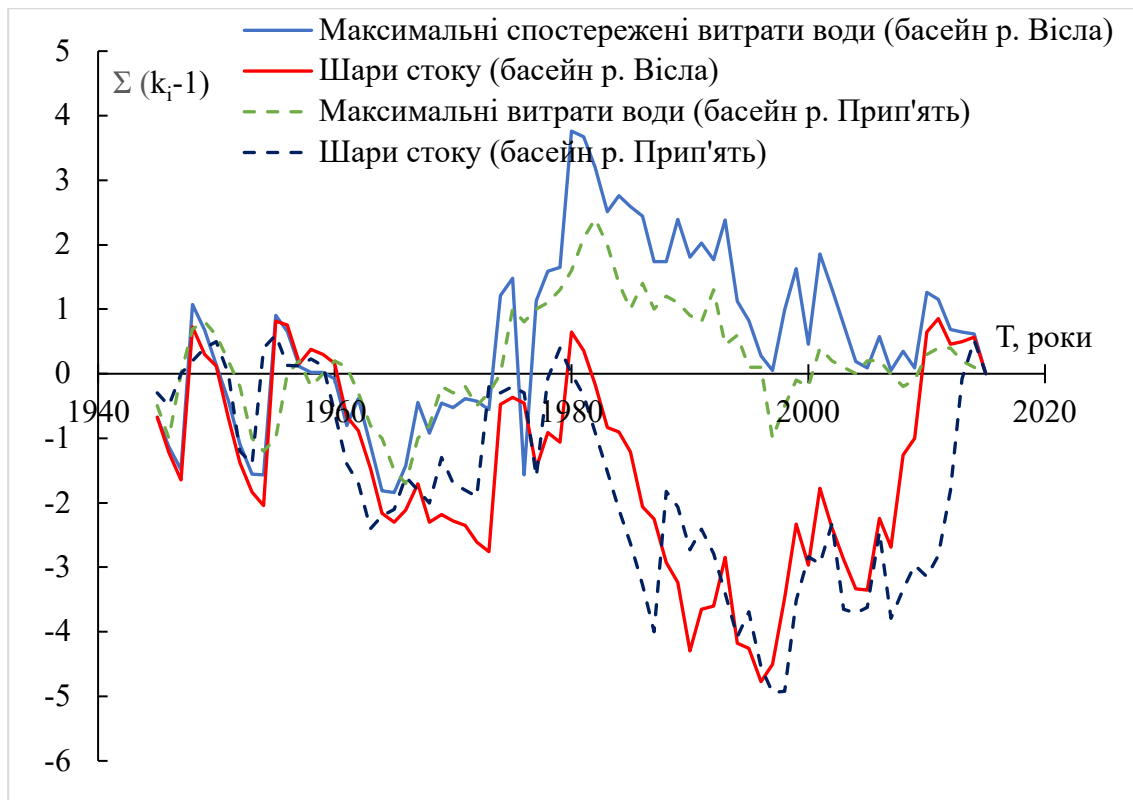


Рисунок 4.3 – Осереднені різницево-інтегральні криві витрат води та шарів стоку дощових паводків річок басейну р. Вісла та басейну р. Прип'ять

Що стосується шарів стоку, то тут, як відомо, існує два підходи щодо їх узагальнення у просторі: картування або районування. Районування більш притаманне при узагальненні характеристик дощових паводків, враховуючи їх часто практично випадковий розподіл у просторі. Однак, розглядувана територія невелика за розмірами, а цей підхід потребує більшої просторової розповсюженості для виявлення однорідних районів формування максимального стоку паводків. З іншого боку, застосування сучасних ГІС-технологій дозволяє отримати карти розподілу величин доволі високої точності.

Таким чином, для досліджуваної території було віддано перевагу картуванню. Як показано в роботах [4-7], приступаючи до картування необхідно виключити можливий вплив інтразональних факторів, таких як залісенність або заболоченість водозборів. З цією метою спочатку досліджується залежність $Y_{1\%}$ дощових паводків та весняного водопілля від

зональних факторів, наприклад широти геометричних центрів тяжіння водозборів φ (пн.ш). Для басейну р. Вісла в межах України такі залежності шарів стоку дощових паводків і весняних водопіль рідкісної імовірності перевищення від географічної широти центрів тяжіння водозборів статистично значущі, але на максимальний стік дощових паводків і весняних водопіль можуть впливати й інші фактори [8].

Для дослідження можливого впливу залісеності та заболоченості водозборів на $Y_{1\%}$ побудовані залежності, рис. 4.4 та рис. 4.5, відповідно.

У обох випадках, як для дощових паводків, так і для весняних водопіль вплив лісистості на максимальний стік є незначним, проте спостерігається статистично значуща обернена залежність шарів стоку дощових паводків ($r=0.32$) і весняних водопіль ($r=0.45$) рідкісної імовірності перевищення від залісеності водозборів (рис. 4.4). Отже наявність лісу на водозборі виконує регулюючу роль, знижуючи максимальні шари стоку за рахунок перерозподілу стоку з поверхневої складової до ґрунтової.

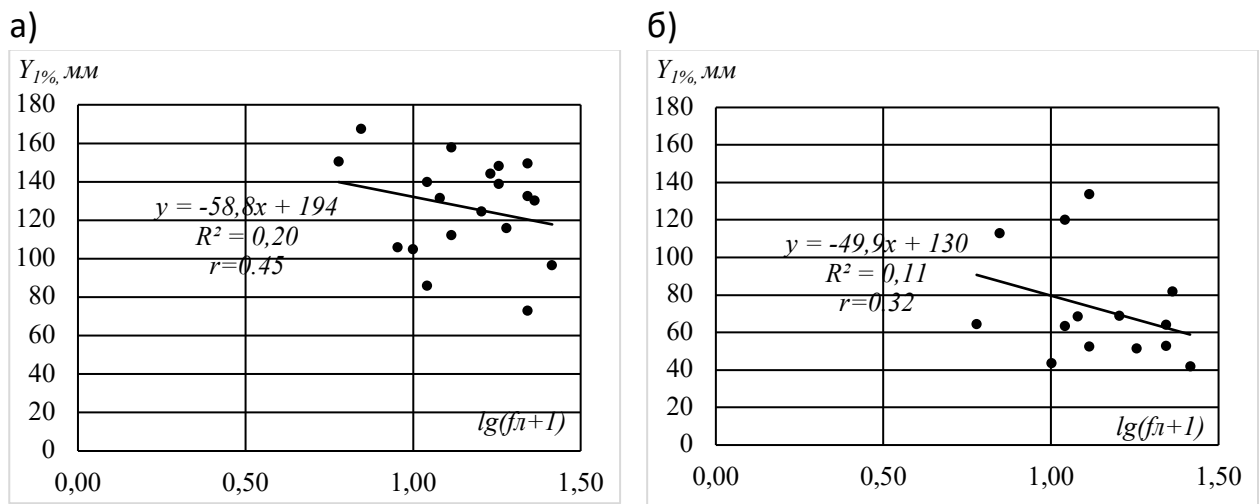


Рисунок 4.4 – Залежність $Y_{1\%}$, мм (а) весняного водопілля та (б) дощових паводків від залісеності водозборів річок досліджуваної території

Інша ситуація спостерігається при дослідженні впливу заболоченості на шари максимального стоку різного генетичного походження (рис. 4.5). Як показано на рис. 4.5а, при проходженні весняного водопілля наявність

заболоченості позитивно впливає на величини шарів стоку, тобто зі збільшенням заболоченості водозборів збільшується й шари стоку в період весняного водопілля ($r=0.46$).

Аналогічний вплив спостерігається щодо шарів стоку дощових паводків (рис. 4.5б), при збільшенні заболоченості водозборів шари стоку в період паводків також збільшуються, але коефіцієнт кореляції цієї залежності значно менший ($r=0.27$). Збільшення шарів стоку під впливом заболоченості можна пояснити додатковим ґрунтовим живленням з болотних масивів, особливо в період весняного водопілля.

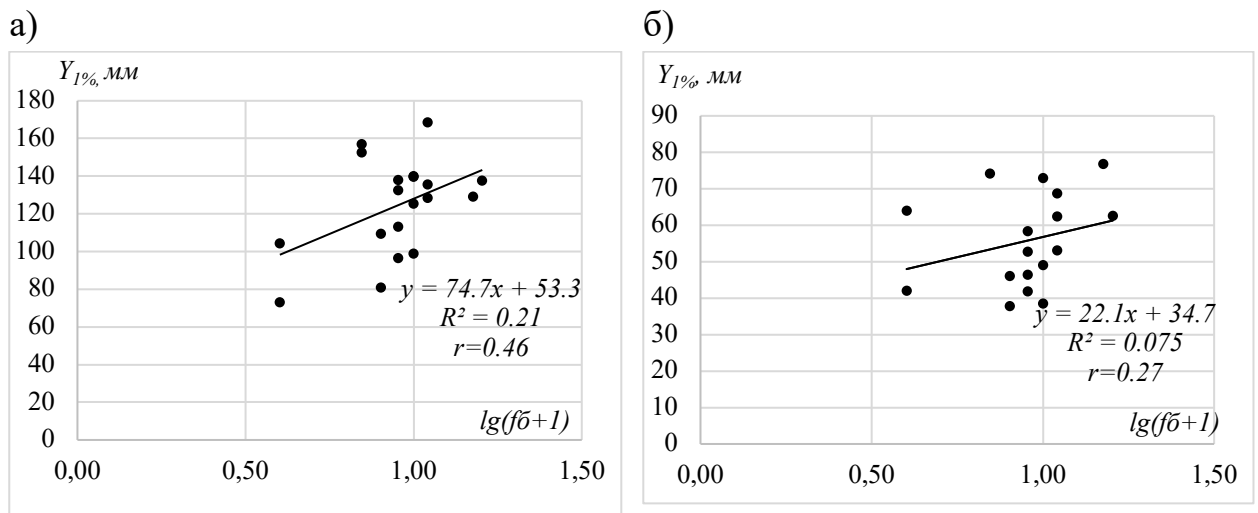


Рисунок 4.5 – Залежність $Y_{1\%, \text{мм}}$ (а) весняного водопілля (б) дощових паводків від заболоченості водозборів річок досліджуваної території

На основі залежностей, представлених на рис. 4.4 та 4.5, отримані коефіцієнти впливу залісеності та заболоченості (додаток В), які дозволили виключити їх вплив на максимальні шари стоку весняного водопілля та дощових паводків та знову побудувати відповідні залежності від географічної широти центрів тяжіння водозборів.

Після виключення впливу заболоченості отримали кращу залежність, яка показана на рис. 4.6. Наявність таких залежностей є підставою для картування представлених величин, отже на розглядуваній території у вигляді

карти можуть бути представлені шари стоку весняних водопіль і дощових паводків 1%-ої ймовірності перевищення, приведені до $f_0=0$ (рис. 4.7) [2,9].

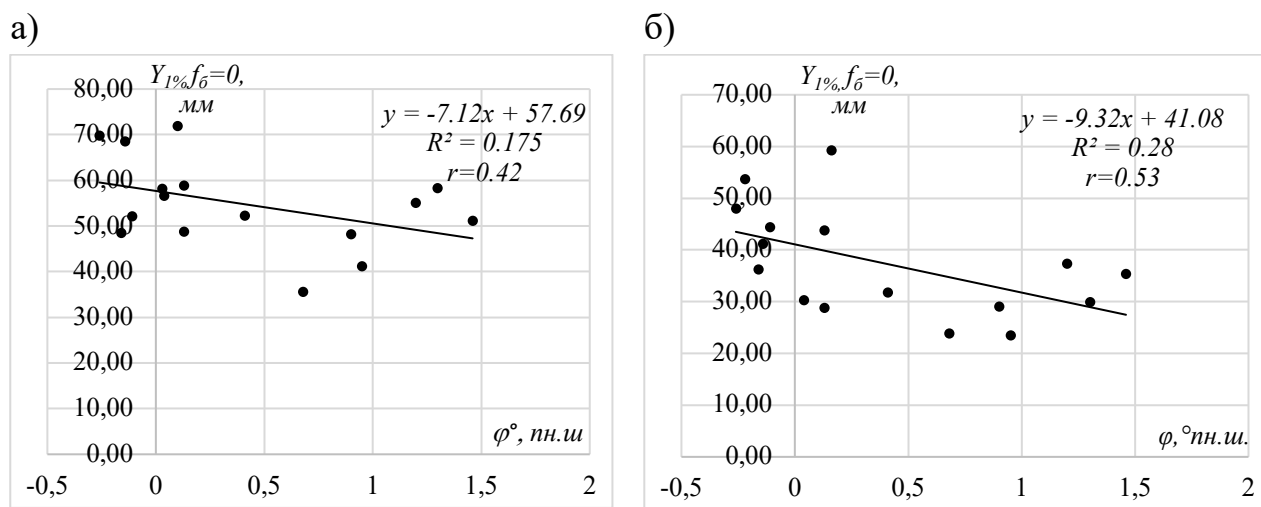


Рисунок 4.6 – Залежність $Y_{1\%, f_0=0}$, мм (а) весняного водопілля (б) дощових паводків від географічної широти центрів тяжіння водозборів досліджуваної території

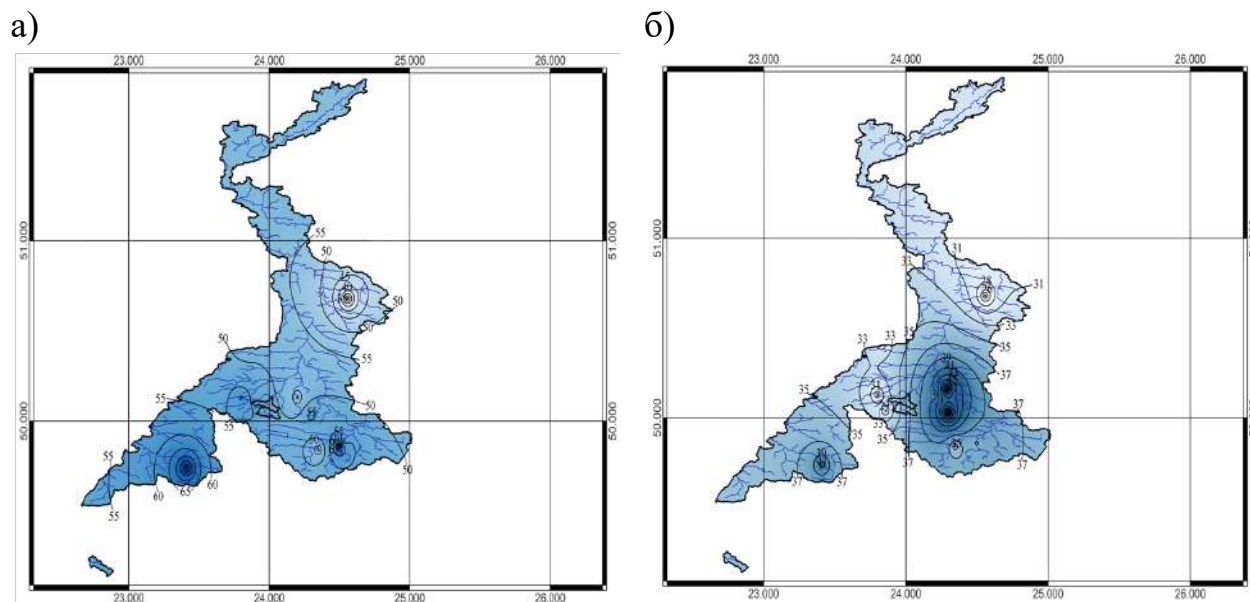


Рисунок 4.7 – Просторовий розподіл шарів стоку (а) весняних водопіль (б) дощових паводків рідкісної імовірності перевищення $Y_{1\%, (f_0=0)}$, мм для річок

басейну р. Вісла в межах України

Для того, щоб скористуватися картами для визначення шарів стоку дощових паводків і весняних водопіль рідкісної імовірності перевищення для будь-якої точки водозбору потрібно зняти значення з карти у потрібній точці за допомогою ізоліній та скористатися формулам (4.6), (4.7) для дощових паводків і (4.6), (4.8) для весняних водопіль [2,7,9].

$$Y_{1\%} = K_{\sigma} Y_{1\%(f_{\sigma}=0)}; \quad (4.6)$$

$$K_{\sigma} = 1 + 0,64(\lg(f_{\sigma} + 1)); \quad (4.7)$$

$$K_{\sigma} = 1 + 1,40(\lg(f_{\sigma} + 1)), \quad (4.8)$$

де $Y_{1\%}$ – шари стоку весняних водопіль чи дощових паводків, мм;

K_{σ} – коефіцієнт заболоченості водозбору;

$Y_{1\%(f_{\sigma}=0)}$ – шари стоку рідкісної імовірності перевищення (весняних водопіль або дощових паводків) з виключенням впливу заболоченості, зняті з карти ізоліній шарів стоку, мм;

f_{σ} – відсоток площі заболоченої території на водозборі, %.

Як видно з рис. 4.7, ізолінії шарів стоку рідкісної імовірності перевищення $Y_{1\%(f_{\sigma}=0)}$ проведені через 2-5 мм і збільшуються з північного сходу на південний захід. Шари стоку весняних водопіль рідкісної імовірності перевищення змінюються від 36 мм до 70 мм, у той час як шари стоку дощових паводків рідкісної імовірності перевищення коливаються в межах від 20 мм до 40 мм [2,9].

4.2 Характеристики схилового припливу підчас максимального стоку весняного водопілля і дощових паводків в басейні р. Вісла в межах України

З метою визначення коефіцієнтів часової нерівномірності схилового

припливу $\frac{n+1}{n}$ попередньо були розраховані коефіцієнти часової

нерівномірності руслового стоку $\frac{m+1}{m}$ (додаток Г) які для весняних водопіль коливаються незначно, від 1,85 до 5,36, а для дощових паводків – від 0,72 до

3,18. Побудована залежність $\frac{m+1}{m} = f(\lg(F+1))$, за допомогою якої

визначено коефіцієнт нерівномірності руслового стоку (рис. 4.8). Для

весняного водопілля $\frac{n+1}{n} = 7,38$, а $n = 0,16$, для дощових паводків відповідно

$\frac{n+1}{n} = 3,94$, а $n = 0,34$ [2,9].

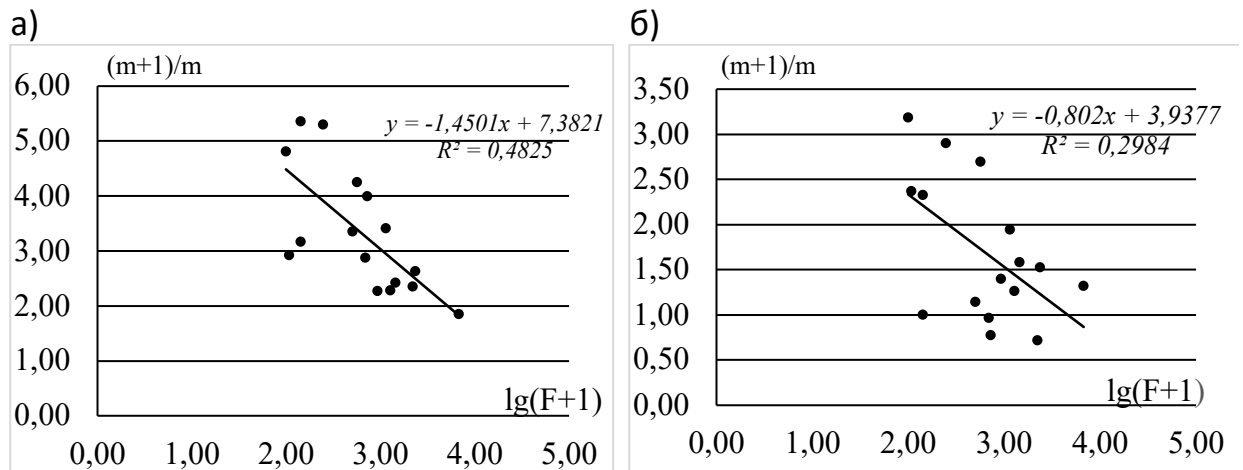
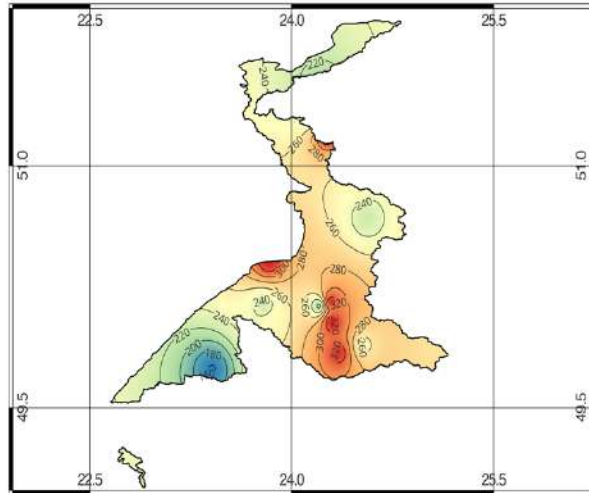


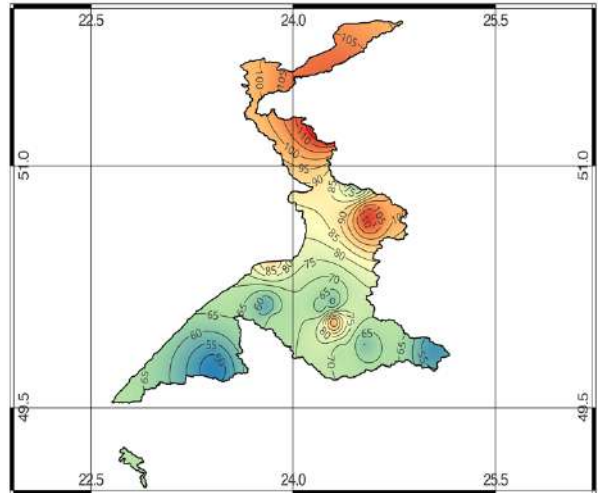
Рисунок 4.8 - Залежність коефіцієнтів нерівномірності руслового припливу підчас весняного водопілля (а) та дощових паводків (б) від площі водозборів річок басейну Вісли в межах України

Тривалість схилового припливу T_0 була визначена за наведеною вище методикою з використанням програми «Сагуа» (додаток Д). Також як й шари стоку весняних водопіль та дощових паводків цей параметр розрахункової методики узагальнений за територією в вигляді карти ізоліній (рис. 4.9). Як добре ілюструє рис. 4.9а, для весняного водопілля значення T_0 змінює від 160 годин до 320 годин, найбільші значення характерні для південно-східної частини басейну, та можуть бути пов'язані з впливом карсту, як це відмчалось авторами [10, 11] для сусідніх басейнів. На рис. 4.9б представлений просторовий

а)



б)



129

Рисунок 4.9 – Просторовий розподіл тривалості схилового припливу під час весняного водопілля (а) та дощових паводків (б) в басейні р. Вісла в межах України

розподіл T_0 під час дощових паводків, тут слід відмітити, що він протилежний за напрямом, й отже величини збільшуються від 50 годин на півдні до 110 год на півночі розглядуваної території. Такі доволі високі величини тривалості схилового припливу під час дощових паводків на межі з басейном Прип'яті, як показано в роботі [10] «...є характерними для областей контактного (за термінологією А.М. Бефані) та підпертого стоку, бо їх гідрографи за рахунок схилового регулювання дуже розтягнуті у часі».

Отже, маючи всі складові формули (4.2), розраховані максимальні модулі схилового припливу весняних водопілля і дощових паводків (додаток Е) [2,12-15], які також можна узагальнити у вигляді карти ізоліній (рис. 4.10).

Аналізуючи отриманий розподіл, слід відмітити, що найбільші величини $q'_{1\%}$ слід очікувати як для весняних водопілля, так й для дощових паводків у суббасейні р. Сян. Високі весняні водопілля також можливі на півночі досліджуваного басейну наряду з окремими локальними дощовими паводками в центральній частині. Представлені карти можна використовувати для спрощеного варіанту розрахунку, наприклад, коли відсутні дані про

заболоченість водозборів, або для попередньої оцінки потенціального максимального стоку весняних водопілля та дощових паводків.

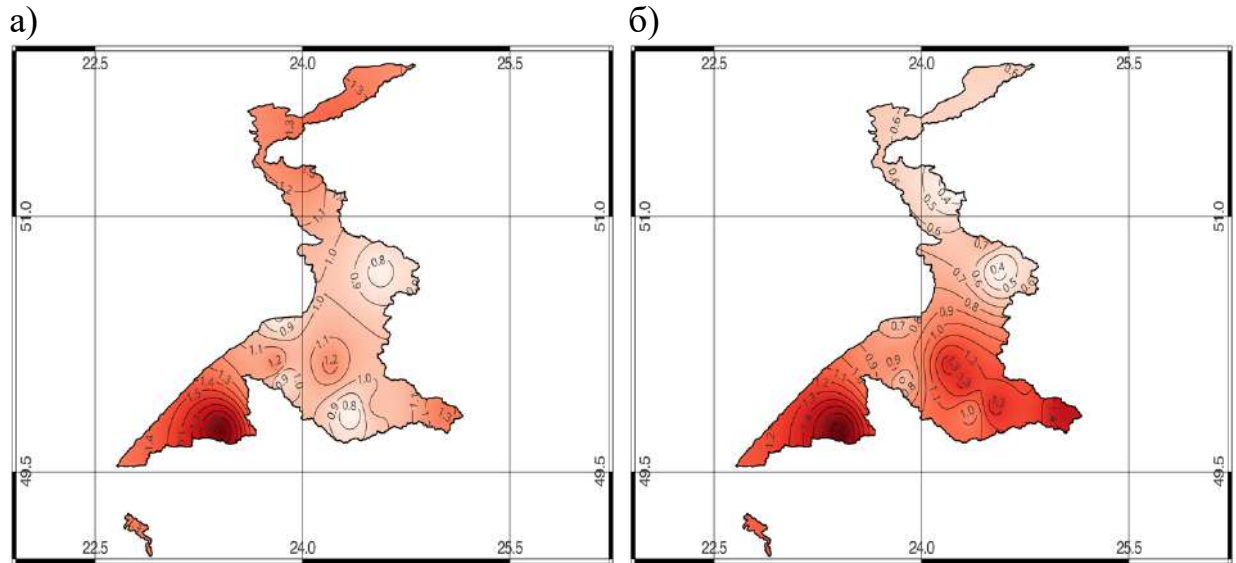


Рисунок 4.10 - Просторовий розподіл максимальних модулів схилового припливу під час весняного водопілля (а) та дощових паводків (б) в басейні р. Вісла в межах України

4.3. Трансформаційні функції максимального стоку

Згідно з операторною моделлю формування максимального стоку, сформовані підчас паводків та водопілля максимальні модулі схилового припливу надалі трансформуються русловою мережею за рахунок руслового добігання та русло-заплавного регулювання [16].

Регіональні розрахункові формули для визначення трансформаційної функції в басейні р. Вісла, при $T_0 > t_p$, після підставлення отриманих розрахункових величин в рівняння (4.4), будуть мати вигляд:

- для весняного водопілля

$$\psi\left(\frac{t_p}{T_0}\right) = 1 - 0.80 \left(\frac{t_p}{T_0}\right)^{0.16}; \quad (4.9)$$

- для дощових паводків

$$\psi\left(\frac{t_p}{T_0}\right) = 1 - 0.64 \left(\frac{t_p}{T_0}\right)^{0.34}; \quad (4.10)$$

Вплив русло-заплавного регулювання на максимальний стік визначається за допомогою коефіцієнта, що являє собою функцію ε_F убутного вигляду (з верхнім граничним значенням $\varepsilon_F = 1,0$, при $F \rightarrow 0$) із зростанням водозбірної площі. Розрахувати її можна зворотним шляхом з формули (4.1), як:

$$\varepsilon_F = \frac{q_m / q'_m}{\psi(t_p / T_0)} ; \quad (4.11)$$

В свою чергу, редукція максимального модуля q_m / q'_m може бути описана рівнянням

$$q_m / q'_m = \frac{1}{(F + 1)^{n_1}} . \quad (4.12)$$

Визначення складових редукції максимального модуля наведено в додатку Ж. Співвідношення нанесені на графік $\left(\frac{q_{1\%}}{q'_m}\right) = f(F)$ (рис. 4.11) [2].

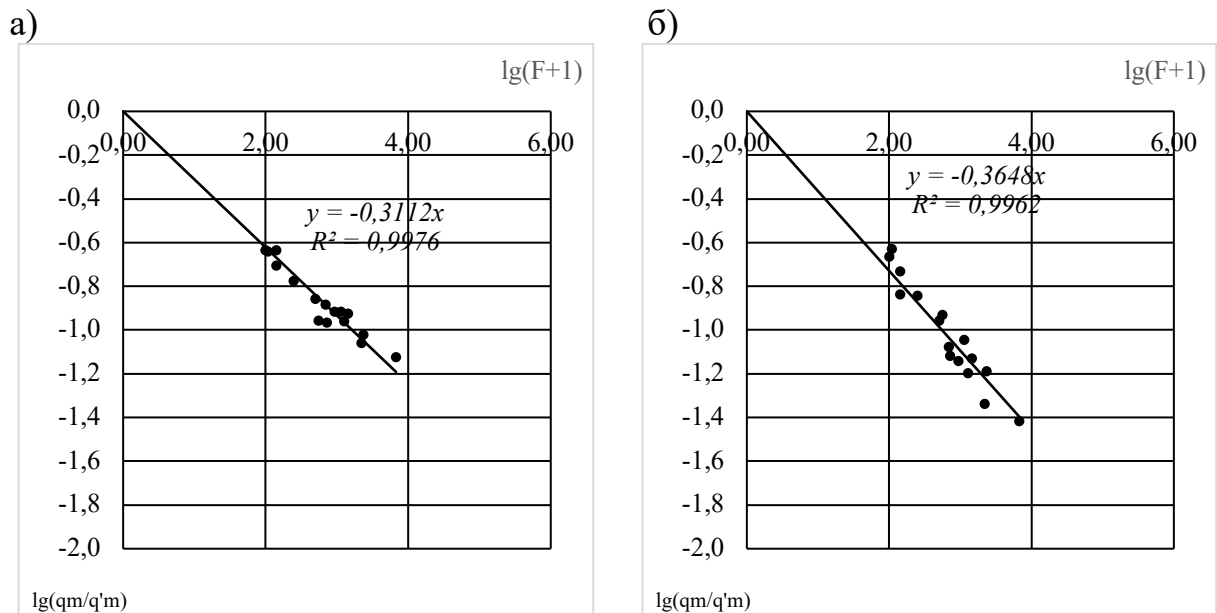


Рисунок 4.11 - Залежність відношення $\lg(q_m / q'_{q\%})$ весняних водопіль (а) та дошових паводків (б) від площі водозборів річок басейну р. Вісла в межах України

З рис. 4.11 видно, що залежність добре виражена, а проведення лінії зв'язку спрощується тим, що вона повинна виходити із нуля при $\lg(F + 1) = 0$.

Так, для весняних водопіль степеневий показник редукції склав 0,31, а для дощових паводків 0,36 [15].

Таким чином, за допомогою рівняння (4.11) визначені розрахункові значення ε_F окремо для весняних водопіль та дощових паводків (додаток II). Отримані величини узагальнені у вигляді їх залежності від площі водозборів (рис. 4.12). Для визначення коефіцієнтів русло-заплавного регулювання невивчених річок досліджуваної території рекомендується використовувати представлені на графіках розрахункові рівняння [2].

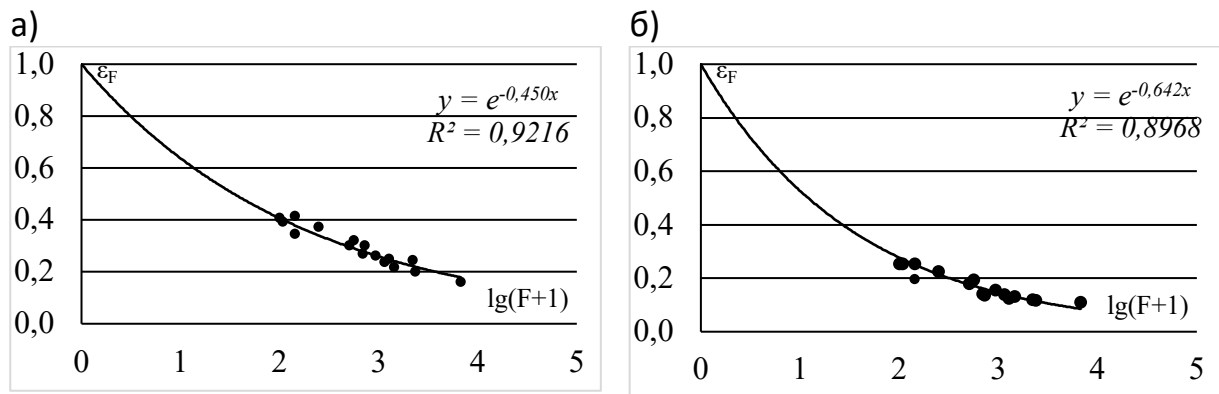


Рисунок 4.12 – Залежність коефіцієнтів русло-заплавного регулювання ε_F в період весняного водопілля(а) та дощових паводків (б) від площі водозбору для річок басейну р. Вісла в межах України [15]

В узагальненому вигляді розрахункове рівняння для визначення коефіцієнту русло-заплавного регулювання під час проходження паводків різного генетичного походження в басейні р.Вісла в межах України має вигляд

$$\varepsilon_F = \exp^{a(LgF+1)}, \quad (4.13)$$

де a дорівнює -0,450 (для весняних водопіль), або -0,642 (для дощових паводків).

4.4 Перевірочні розрахунки максимальних модулів стоку дощових паводків та весняних водопіль для річок басейну р. Вісла

Завершальним етапом роботи з метою оцінки методики виконані перевіірочні розрахунки максимальних модулів стоку дощових паводків та весняних водопіль в басейні р. Вісла за формулою (2.39), що наведені в додатку К та додатку Л.

Порядок розрахунку такий:

Необхідні вихідні дані: географічні координати центру тяжіння водозбору, площа водозбору, довжина річки, середньозважений ухил річки, заболоченість водозбору, при наявності.

Варіант розрахунку 1 (при наявності інформації щодо заболоченості водозбору):

1. Для геометричного центру тяжіння водозбору з карти (рис. 4.7) знімаються значення $Y_{1\%(f_6=0)}$ окремо для весняного водопілля (рис. 4.7а) та дощових паводків (рис. 4.7б).

2. Враховуючи заболоченість водозбору за формулами (4.6), (4.7) для дощових паводків і (4.6), (4.8) для весняних водопіль визначаються розрахункові шари стоку $Y_{1\%}$.

3. З використанням карти просторового розподілу тривалості схилового припливу (рис. 4.9), за координатами центру тяжіння водозбору визначаються величини T_0 , окремо для весняного водопілля (рис. 4.9а) та дощових паводків (рис. 4.9б).

4. За формулою (2.40) розраховуються максимальні модулі схилового припливу, з врахуванням значень коефіцієнту часової нерівномірності схилового припливу, який рекомендовано осереднити для басейну р. Вісли на рівні 7,38 для весняного водопілля, та на рівні 3,94 - для дощових паводків.

5. Значення трансформаційної функції розраховуються окремо для періоду весняного водопілля за формулою (4.9) та дощових паводків (4.10). При цьому час руслового добігання визначається за формулою:

$$t_p = L/V_d ; \quad (4.14)$$

де L – довжина річки, км;

V_d – швидкість руслового добігання, км/год.

Для річок басейну р. Вісла в межах України регіональна формула для визначення швидкості руслового добігання має вигляд [17]:

$$V_d = 1,33 * F^{0,11} I_{срзв}^{0,35} ; \quad (4.15)$$

де $I_{срзв}$ - середньозважений ухил річки, ‰.

6. Коефіцієнт русло-заплавного регулювання визначається за формулою (4.14) окремо для весняних водопіль та дощових паводків.

Спрощений варіант розрахунку 2 (при відсутності інформації щодо заболоченості водозбору):

1. Для геометричного центру тяжіння водозбору з карти (рис. 4.10) знімаються значення $q'_{1\%}$ окремо для весняного водопілля (рис. 4.10а) та дощових паводків (рис. 4.10.б).

2. За формулою (4.10) розраховуються значення трансформаційної функції, окремо для періоду весняного водопілля (4.11а) та дощових паводків (4.11б). При цьому час руслового добігання визначається за формулою (4.14) з урахуванням регіональної формули швидкості руслового добігання (4.15).

3. Коефіцієнт русло-заплавного регулювання визначається за формулою (4.14), окремо для весняних водопіль та дощових паводків.

Як видно з додатку К отримані значення $q_{1\%}$ для весняного водопілля при наявності інформації щодо заболоченості водозбору коливаються в межах $0,05 \text{ м}^3 / (\text{с} \cdot \text{км}^2)$ (р. Західний Буг - с. Литовеж) до $0,27 \text{ м}^3 / (\text{с} \cdot \text{км}^2)$ (р. Західний Буг - смт Сасів), і від $0,03 \text{ м}^3 / (\text{с} \cdot \text{км}^2)$ (р. Луга - м. Володимир-Волинський)

до $0,25 \text{ м}^3 / (\text{с} \cdot \text{км}^2)$ (р. Західний Буг - смт Сасів) - для дощових паводків [2,18].

Розрахунок $q_{1\%}$ за відсутності інформації про заболоченість водозбору показав відповідні результати. Так, для весняного водопілля значення знаходяться в межах від $0,06 \text{ м}^3 / (\text{с} \cdot \text{км}^2)$ (р. Західний Буг - с. Литовеж) до $0,31 \text{ м}^3 / (\text{с} \cdot \text{км}^2)$ (р. Західний Буг - смт Сасів), а для дощових паводків від $0,02 \text{ м}^3 / (\text{с} \cdot \text{км}^2)$ (р. Луга - м. Володимир-Волинський) до $0,28 \text{ м}^3 / (\text{с} \cdot \text{км}^2)$ (р. Західний Буг – смт Сасів) (додаток Л).

Для подальшого використання, наприклад при гідротехнічному проектуванні, до розрахунку приймається найбільше значення максимального модуля стоку (або витрати води) для кожного водозбору.

Точність розрахунку оцінювалася за середнім відносним відхиленням між розрахованими і фактичними значеннями за формулою:

$$|\Delta| = \frac{|q_{m_p} - q_{m_\phi}|}{q_{m_\phi}} \cdot 100\%, \quad (4.16)$$

де q_{m_ϕ} - величина максимального модуля стоку весняного водопілля або дощових паводків, що визначена за даними статистичної обробки по 2015 р.; q_{m_p} - модуль стоку, розрахований за наведеною вище методикою.

При першому варіанті розрахунку максимального модуля стоку (за наявності даних про заболоченість водозбору) середнє відхилення становить $\pm 8,84\%$ для весняного водопілля та $\pm 18,3\%$ для дощових паводків. За умов відсутності інформації про заболоченість (спрощений варіант) для весняних водопіль $|\Delta|_{q1\%} = \pm 9,00\%$, а для дощових паводків - $|\Delta|_{q1\%} = \pm 18,5\%$.

На рис. 4.13 та 4.14 також представлений графічний варіант оцінки точності запропонованої методики.

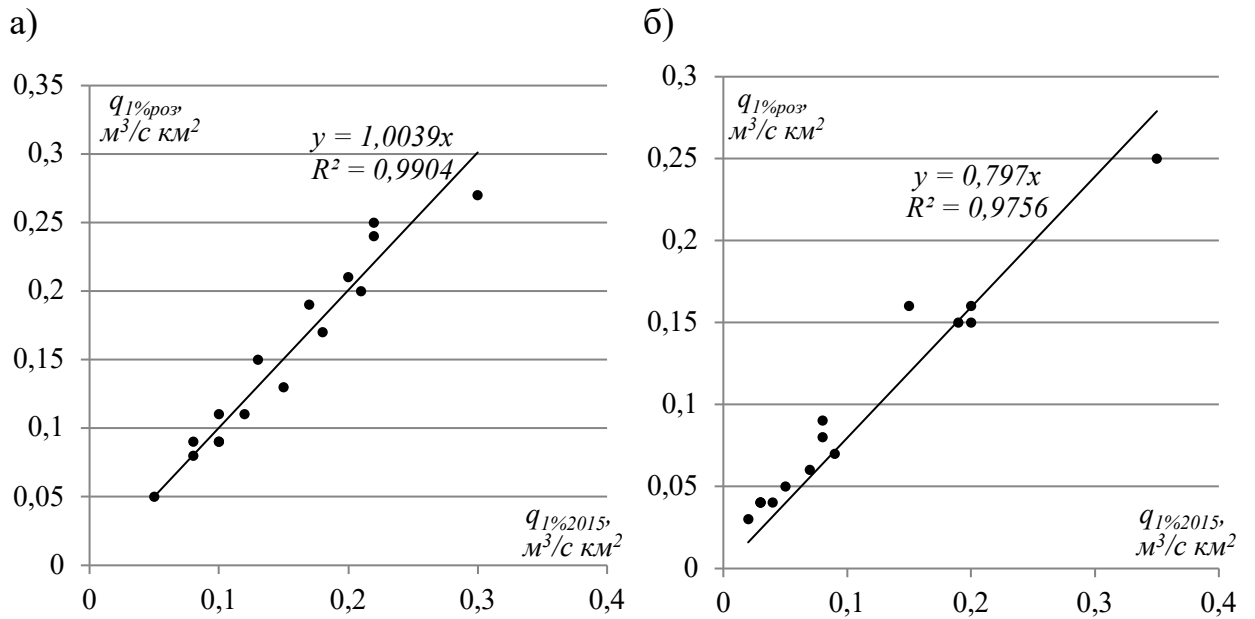


Рисунок 4.13 – Порівняння розрахункових модулів стоку 1%-ої ймовірності перевищення в період весняного водопілля (а) та дощових паводків (б) з даними статистичної обробки до 2015 р. включно (варіант розрахунку 1)

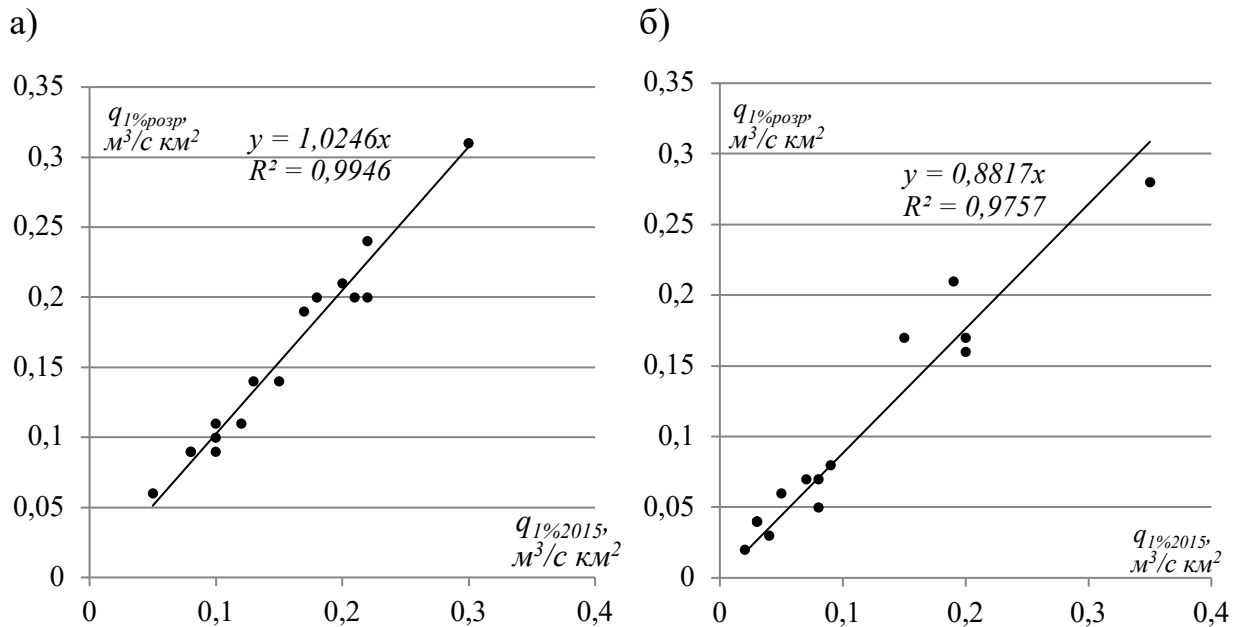


Рисунок 4.14 – Порівняння розрахункових модулів стоку 1%-ої ймовірності перевищення в період весняного водопілля (а) та дощових паводків (б) з даними статистичної обробки до 2015 р. включно (варіант розрахунку 2)

Як добре ілюструють представлені порівняння, для весняних водопіль (рис. 4.13) точність визначення розрахункових модулів стоку доволі висока ($r=0.97-0.98$), а відхилення розташовані рівномірно (коефіцієнт регресії лінії зв'язку практично дорівнює одиниці); дещо інша ситуація для дощових паводків – при також доволі високих коефіцієнтах кореляції ($r=0.95-0.96$) коефіцієнт регресії лінії зв'язку коливається від 0,79 до 0,88, що говорить про дещо занижені розрахункові значення. Такий результат можна пояснити тим, що самі 1%-ві максимальні витрати за результатами статистичної обробки, як було показано в розд. 3, були завищені відносно максимально спостережених витрат води дощових паводків. На рис. 4.15 показано порівняння розрахованих за методикою максимальних витрат води дощових паводків 1%-ої ймовірності перевищення з максимальними спостереженими за наявний період. В цьому випадку розрахункові значення витрат води співпадають зі спостереженими з дуже високим коефіцієнтом кореляції ($r=0.99$), а коефіцієнт лінійної регресії наближається до одиниці.

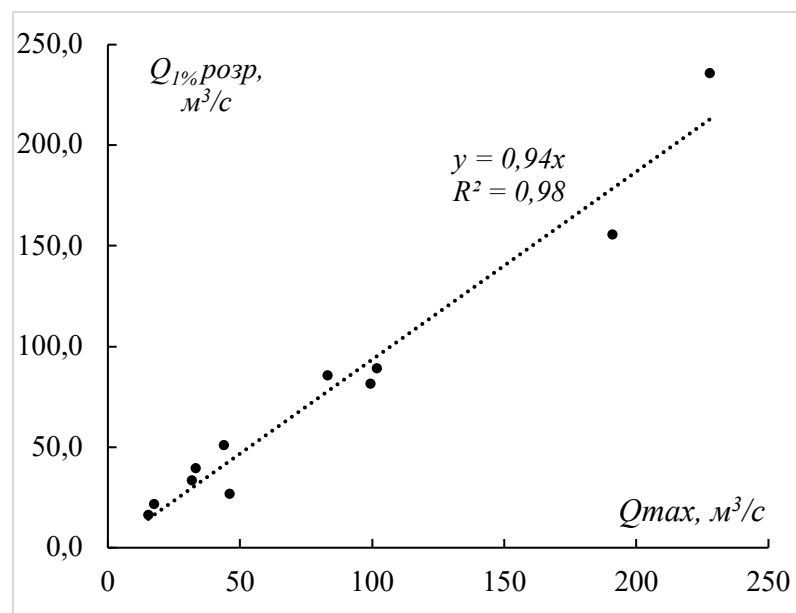


Рисунок 4.15 – Порівняння розрахункових витрат води дощових паводків 1%-ої ймовірності перевищення з максимальними за період спостережень по 2015 р. включно (варіант розрахунку 1)

Отже, такі результати в повній мірі відповідають точності вихідної інформації по максимальному стоку річок в басейні р. Вісла ($\pm 18,6\%$ - для весняного водопілля та $\pm 22,3\%$ – для дощових паводків) і точності вимірювання максимальних витрат води ($\pm 20\%$) та дозволяють рекомендувати операторну модель для визначення максимальних модулів стоку та максимальних модулів схилового припливу весняного водопілля і дощових паводків в басейні р. Вісла в межах України при відсутності спостережень за стоком.

Висновки до розділу 4

1. Територіальні узагальнення характеристик максимального стоку та обґрунтування основних параметрів операторної моделі формування максимального стоку річок басейну р. Вісла виконані із застосуванням всієї наявної гідрологічної інформації, а також із залучення даних по басейну р. Прип'ять;
2. Виявлена синхронність коливань максимального стоку весняного водопілля та дощових паводків по українській частині басейну р. Вісла та басейну р. Прип'ять, що дозволило використовувати такі дані при подальших розрахунках;
3. Дослідження впливу інтразональних факторів на характеристики максимального стоку річок досліджуваного басейну показало статистично значущу залежність шарів стоку, як весняних водопіль, так і дощових паводків від заболоченості та залісеності водозбору, але найбільший вплив все ж таки оказують болота;
4. За умов виключення впливу боліт, залежність шарів стоку весняних водопіль та дощових паводків 1%-ої ймовірності перевищення від географічної широти центрів тяжіння водозборів є статистично значущою, що стало підґрунтям для узагальнення цих величин у вигляді карти ізоліній;

5. Обґрунтовані регіональні формули для визначення коефіцієнтів впливу заболоченості, які дозволяють перейти від шарів стоку з виключенням заболоченості, знятих з відповідних карт до шарів стоку з врахуванням впливу заболоченості окремо для весняних водопіль та дощових паводків;
6. Для річок басейну р. Вісла визначені коефіцієнти нерівномірності схилового припливу для весняного водопілля $\frac{n+1}{n} = 7,38$, а $n = 0,16$, для дощових паводків, відповідно, $\frac{n+1}{n} = 3,94$, а $n = 0,34$;
7. Тривалість схилового припливу під час проходження паводків різного генетичного походження визначена чисельним методом з використанням програмного забезпечення “Caguar” у двох наближеннях;
8. В ході виконання роботи, з використанням програмного забезпечення QGIS побудовані карти просторового розподілу шарів стоку з виключенням впливу заболоченості, карти тривалості схилового припливу та модулів схилового припливу рідкісної імовірності перевищення, за якими можна отримати відповідні характеристики у басейні р. Вісла в межах України за відсутності спостережень за стоком;
9. Аналізуючи отриманий розподіл максимальних модулів схилового приливу $q'_{1\%}$, слід відмітити, що найбільші величини можна очікувати як для весняних водопіль, так й для дощових паводків у суббасейні р. Сян. Високі весняні водопілля також можливі на півночі досліджуваного басейну наряду з окремими локальними дощовими паводками в центральній частині суббасейну Західного Бугу;
- 10.3 метою врахування трансформації максимального схилового припливу у русловий стік, обґрунтовані регіональні формули для визначення трансформаційної функції окремо для весняних водопіль та дощових паводків на річках досліджуваної території. Для весняних водопіль

значення $\psi(t_p / T_0)$ коливаються в межах від 0,40 до 0,58-0,59, в той час як для дощових паводків характерна дещо менша трансформація зі значеннями $\psi(t_p / T_0)$ на рівні 0,50-0,75;

11. Ефекти русло-заплавного регулювання в рамках операторної моделі враховуються відповідним параметром ε_F , який добре описується експоненціальною функцією в залежності від площі водозборів річок басейну Вісли, з окремими показниками степеню для весняних водопіль та дощових паводків;
12. Для визначення максимальних модулів стоку рідкісної ймовірності перевищення за відсутності спостережень за стоком на досліджуваній території пропонується два варіанти розрахунку – з використанням даних про заболоченість водозборів та окремі розрахунки всіх складових схилового припливу, або спрощений варіант – з визначення максимального модуля схилового припливу безпосередньо з карти ізолій;
13. Середня абсолютна похибка розрахунку максимального модуля стоку за наявності даних про заболоченість водозбору для весняного водопілля складає $\pm 8,84\%$, а для дощових паводків $\pm 18,3\%$, що знаходиться на рівні точності вихідної інформації, а отже дозволяє використовувати методику;
14. При використанні спрощеної процедури розрахунку, точність визначення максимальних модулів декілька зменшується, але також дозволяє рекомендувати такий варіант розрахунку, наприклад, для попередньої оцінки максимально можливого припливу зі схилів під час проходження визначних весняних водопіль та дощових паводків на річках басейну Вісли в межах України.

Перелік використаних джерел до розділу 4

1. Андреевская Г. М., Гопченко Е. Д., Овчарук В. А. О форме графиков притока воды со склонов в русловую сеть. Метеорология, климатология и гидрология. 1996. Вып. 33. С.106-110.
2. Регіональні наукові дослідження в області гідрологічних розрахунків і прогнозів водного режиму річок і водойм України : Звіт про НДР. ДР № 0118U00121 (остаточний) / Ж. Р. Шакірзанова та ін. Одеса, Одеський державний екологічний університет, 2021. 455 с.
3. Определение расчетных гидрологических характеристик СНиП 2.01.14-83. Москва : Госком СССР по делам строительства, 1983. 97 с.
4. Гопченко Є. Д., Овчарук В. А., Шакірзанова Ж. Р. Розрахунки та довгострокові прогнози характеристик максимального стоку весняного водопілля в басейні р. Прип'ять : монографія. Одеса : Екологія, 2011. 336 с.
5. Гопченко Є. Д., Бурлуцька М. Е., Романчук М. Є., Мартинюк М. О. Сучасні методи дослідження максимального стоку весняних водопіль і дощових паводків річок України. *Науковий вісник Херсонського державного університету*. 2019. № 10. С. 114-118.
6. Мартинюк М.О., Овчарук В.А. Визначення характеристик максимального стоку дощових паводків в басейні Вісли в межах України з використанням супутникових даних і ГІС-технологій. Матеріали ХІХ наукової конференції молодих вчених ОДЕКУ, 25-29 травня. Одеса : ОДЕКУ, 2020. С. 114-115.
7. Martyniuk M.O., Ovcharuk V.A. Study of the influence of zonal and azonal factors on the maximum floods runoff in the Vistula basin (within Ukraine). *Earth system changes and Baltic Sea coasts*. 3 rd Baltic Earth Conference, Jastarnia, Hel Peninsula, Poland, 1-5 June 2020. International Baltic Earth Secretariat Publication No. 18, June 2020. P.76.

8. Мартинюк М.О., Овчарук В.А. Використання ГІС-технологій для визначення залісеності басейнів річок Малого та Волинського Полісся. *Геологічне, гідрологічне та біологічне різноманіття Полісся* : зб. наукових праць Міжнародної науково-практичної конференції до 130-річчя від дня народження видатного польського дослідника Полісся Станіслава Малковського та у рамках проведення Водного форуму до 105-річчя Національного університету водного господарства та природокористування. Рівне : НУВГП, 2020. С. 287–291.
9. Регіональні наукові дослідження в області гідрологічних розрахунків і прогнозів водного режиму річок і водойм України. Просторово-часовий аналіз гідрометеорологічної і гідрологічної інформації по окремих регіонах України : Звіт про НДР. ДР № 0118U00121 (проміжний) / Є. Д. Гопченко та ін. Одеса, Одеський державний екологічний університет, 2020. 369 с.
10. Гопченко Е. Д., Мокина Н. В. Оценка влияния местных факторов на продолжительность склонового притока (на примере рек Полесья). *Метеорология, климатология и гидрология*. 1997. № 34. С. 231-239.
11. Гопченко Є. Д., Овчарук В. А., Романчук М. Є., Траскова А. В. Науково-методична база для визначення тривалості схилового припливу під час дощових паводків і весняних водопіль. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2014. № 14. С. 205-212.
12. Мартинюк М. О., Овчарук В. А. Визначення та узагальнення граничних модулів схилового припливу підчас паводків та водопіль в басейні р. Вісла. Матеріали ХХ наукової конференції молодих вчених ОДЕКУ, м. Одеса, 26-30 квітня 2021 р. С. 95-96.
13. Мартинюк М. О., Овчарук В. А. Обґрунтування параметрів розрахункової методики для визначення максимального стоку річок району басейну Вісли. *Другий Всеукраїнський гідрометеорологічний з'їзд* : тези доповідей. (м. Одеса, 7-9 жовтня 2021 р.) С. 75-76.

14. Martyniuk M. O., Ovcharuk V. A. The modern method for calculating the maximum river runoff on the Vistula River Basin within Ukraine. *Socio-ecological resilience across Eurasia – Innovation for sustainability transition : abstracts on the INTENSE Open Science Conference* (Tartu/online, 5-6 October, 2021). P. 21-22.
15. Овчарук, В. А., Мартинюк, М. О. Застосування операторної моделі для визначення максимальних модулів стоку весняних водопіль і дощових паводків річок басейну Вісли в межах України. *Людина та довкілля. Проблеми неоекології*. 2021. № 36. С. 22-33.
16. Овчарук В. А., Траскова А. В. Обґрунтування характеристик схилового припливу в період весняного водопілля на річках правобережжя Дністра. *Геополітика і екогеодинаміка регіонів : наук. журнал*. 2014. Вип. 1(10). С. 771-776.
17. Гопченко Е. Д., Овчарук В. А. Методика расчета скорости руслового добегания на реках Украины. *Причорноморський екологічний бюлетень*, Одеса : Інноваційно-інформаційний центр «ІНВАЦ», 2007. № 2 (24). С. 53-55.
18. Мартинюк М. О., Овчарук В. А. Регіональна методика визначення стоку весняних водопіль і дощових паводків річок басейну Вісли в межах України. Матеріали ХХІ наукової конференції молодих вчених ОДЕКУ, м. Одеса, 23-31 травня 2022 р. С. 95-96.

РОЗДІЛ 5

ОЦІНКА ГІДРОЛОГІЧНИХ РИЗИКІВ ЗАТОПЛЕННЯ В БАСЕЙНІ ВІСЛИ В МЕЖАХ УКРАЇНИ

Згідно з Директивою 2007/60/ЄС Європейського Парламенту від 23 жовтня 2007 року, «...затоплення – тимчасове покриття території водою під час повені чи паводка, а також затоплення, спричинені гірськими потоками, морськими згінно-нагінними явищами, за винятком затоплення зворотними водами» [1].

Відповідно, ризик затоплення – поєднання ймовірності затоплення і потенційних негативних наслідків для здоров'я населення, довкілля, культурної спадщини та економіки, пов'язаних з затопленням [1].

Імплементация Паводкової директиви ЄС в Україні проходить на основі низки розроблених документів: Методика попередньої оцінки ризиків затоплення [2], Методика розробки карт загроз і ризиків затоплення [3], Порядок розроблення плану управління ризиками затоплення [4].

5.1 Попередня оцінка гідрологічних ризиків затоплення

Методика попередньої оцінки ризиків затоплення, що базується на аналізі значних повеней у минулому, що призвели до збитків від затоплень та відповідають рівню надзвичайних ситуацій, розроблена Українським гідрометеорологічним інститутом ДСНС України та НАН України [5].

Застосування даної методики дає змогу визначити території, які мають потенційно значні ризики затоплення та зменшити негативний вплив затоплень на життя і здоров'я людей, господарство, культурну спадщину.

На основі Методики попередньої оцінки ризиків затоплення та Методики розробки карт загроз і ризиків затоплення розроблено план

управління ризиками затоплення на окремих територіях у межах району басейну річки Вісла на 2023-2030 роки [6].

Згідно з планом, у басейні р Вісла визначені 16 територій, що мають потенційно значні ризики затоплення, з яких 11 розташовані на ділянках водних об'єктів і мають загальну довжину 323 км, 5 територій розташовані в населених пунктах, що знаходяться за межами ділянок водних об'єктів (рис. 5.1).

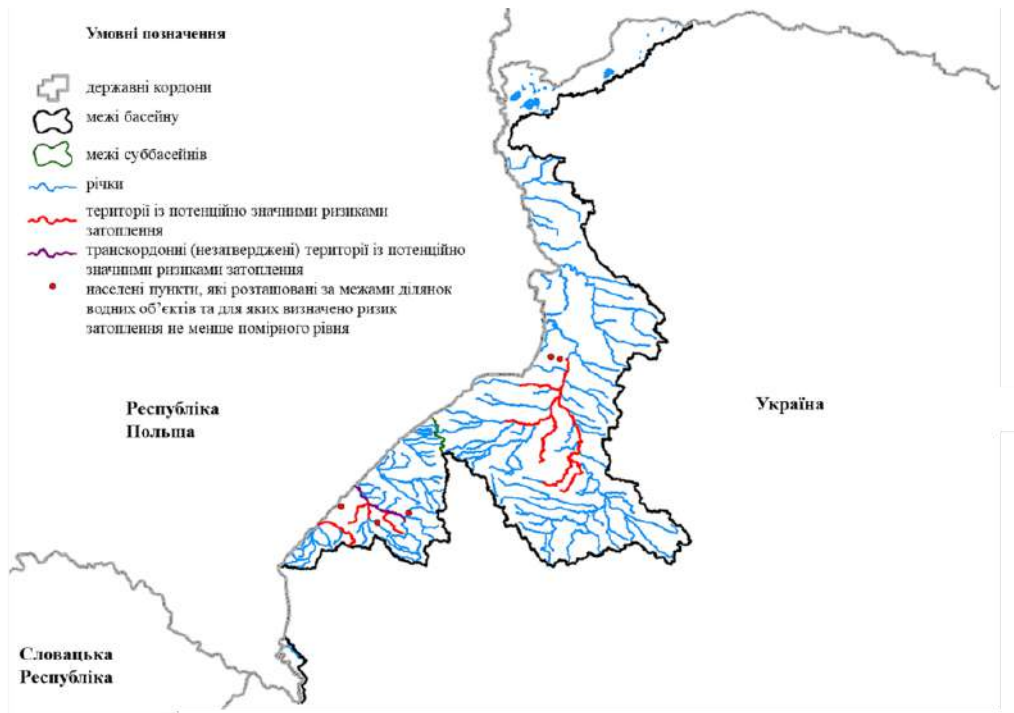


Рисунок 5.1 – Карта територій із потенційно значними ризиками затоплення у межах району басейну річки Вісла [6]

Якщо порівняти території з потенційно значним ризиком затоплення (рис. 5.1) та просторовий розподіл максимальних модулів схилового припливу під час весняного водопілля та дощових паводків в басейні р. Вісла, представлений на рис. 4.10, то можна відмітити їх добру збіжність відносно того, що це суббасейн Сяну та центральна частина басейну Вісла. Отже, як було показано в розділі 4, в рамках операторної моделі формування максимального стоку річок, карти розподілу максимальних модулів схилового припливу рідкої ймовірності перевищення також є одним з варіантів попередньої оцінки ризиків затоплення.

Визначення потенційно значущих затоплень залежить від критерію значущості наслідків затоплення (табл. 5.1) і критерію ймовірності виникнення затоплення (табл. 5.2).

При оцінюванні наслідків затоплення встановлена шкала балів з описом ознак значущості наслідків затоплення за критеріями, наведеними в табл. 5.1.

Таблиця 5.1 – Критерії визначення значущості наслідків затоплення [2]

Величина «Н»/ характер наслідків	Ознаки значущості наслідків
1 незначні наслідки	Затоплення короточасне та за своїми наслідками (розміром зони затоплення, та/або кількістю постраждалих осіб, та/або завданими збитками) може бути класифіковане як небезпечна подія або надзвичайна ситуація об'єктового рівня відповідно до Порядку класифікації надзвичайних ситуацій за їх рівнями, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24 березня 2004 року № 368 (далі - Порядок класифікації) [7].
2 помірно значні наслідки	Затоплення спричиняє значні та довготривалі наслідки і може бути класифіковане як надзвичайна ситуація місцевого рівня відповідно до Порядку класифікації
3 серйозні наслідки	Затоплення спричиняє постійні та незворотні пошкодження і може бути класифіковане як надзвичайна ситуація регіонального або державного рівня відповідно до Порядку класифікації

При оцінюванні ймовірності затоплення встановлена шкала балів з описом ознак ймовірності виникнення затоплення за критеріями, наведеними в табл. 5.2.

Таблиця 5.2 – Критерії визначення ймовірності виникнення затоплення [2]

Величина «І»/ характер ймовірності	Ознаки ймовірності виникнення затоплення
1 низька ймовірність	Затоплення виникає рідко та нерегулярно. Може трапитися не частіше ніж один раз на 500 років
2 середня ймовірність	Затоплення виникає періодично, але нерегулярно. Може трапитися не частіше ніж один раз на 100 років
3 висока ймовірність	Затоплення виникає часто та регулярно. Може трапитися один раз на 10 років або частіше

Величина ризику визначається за допомогою методу, наведеного в табл. 5.3.

Таблиця 5.3 – Величина ризику затоплення [2]

Наслідки (Н)	Ймовірність (І)		
	Низька	Середня	Висока
Серйозні	3 Помірний ризик	4 Високий ризик	5 Дуже високий ризик
Помірно значущі	2 Низький ризик	3 Помірний ризик	4 Високий ризик
Незначні	1 Малозначний ризик	2 Низький ризик	3 Помірний ризик

Згідно з табл. 5.3, величина ризику розрізняється від мінімальної (1 - малозначний ризик) до максимальної (5 - дуже високий ризик), а наслідки від затоплень варіюють від «незначних» до «серйозних».

5.1.1 Сучасний стан досліджень ризиків затоплень

Дослідження, пов'язані з визначенням зон затоплень під час проходження паводків активно ведуться у багатьох країнах світу. Це важлива область, оскільки затоплення можуть мати серйозні наслідки для населення, економіки та природного середовища. Дослідження в цій галузі орієнтовані на розвиток більш точних та надійних методів прогнозування та визначення зон затоплень, а також на вдосконалення підходів до управління ризиком затоплень.

Протягом ХХ століття дослідження затоплень та їх ризиків розвивалися у багатьох країнах світу. Починаючи з 1970-х років для забезпечення спрощеного представлення процесів, що призводять до повеней, були розроблені обчислювальні гідрологічні та гідравлічні моделі. Як гідрологічні, так і гідравлічні моделі в даний час є основними інструментами для управління ризиками повеней. Гідрологічне моделювання використовувалося для визначення стоку води з водозбірного басейну під впливом дощових

опадів та танення снігу, а гідравлічні моделі використовувалися для моделювання потоку через річкові русла та заплави [8,9].

Технологічні досягнення, такі як збільшення обчислювальної потужності комп'ютерів та розробка сучасного програмного забезпечення дозволили розробникам моделей включити більш детальне представлення процесів, що призводять до повеней [10, 11].

Сучасне дослідницьке програмне забезпечення для гідрологічного моделювання може моделювати водозбірні басейни, річки та заплави в одному вимірі (1D) та двох вимірах (2D). Більшість моделей розв'язують варіації рівнянь Сен-Венана, щоб імітувати течію на суші та в руслі під час проходження паводку.

Розробка моделей затоплень покращила розуміння процесів стоку, що призводять до затоплень, а також сприяла створенню методологій, які використовуються зокрема для створення карт небезпек та оцінки ризиків [12,13].

За останнє десятиліття відбулися зміни в методах, що використовуються для управління ризиками затоплень. Ці зміни зумовлені потребою в поглибленому розумінні процесів, пов'язаних з ризиком затоплень, зокрема глобальними змінами клімату і їх впливом на стік [14].

Таким чином, дослідження паводків різного походження та мінімізація ризику затоплення в критичних місцях (наприклад, у забудованому середовищі) стає все більш важливою сферою управління ризиками затоплень і, отже, моделювання затоплень [15].

У наш час активно розробляються стратегії зменшення наслідків затоплень та управління ризиками, такі як структурний захист від повеней, стійкі міські дренажні системи, синьо-зелена інфраструктура [16-18].

У роботі [19] описані підходи управління ризиками затоплень у Китаї, зокрема «губчасті міста».

В Україні активний розвиток досліджень, пов'язаних з моделюванням зон затоплень, а також оцінкою ризиків затоплень розпочався у XXI сторіччі.

Так, з 2001 р. з'являються перші дослідження І.Ковальчука, присвячені розробці методики аналізу площ затоплень у басейні р. Дністер [20,21].

У 2002 р. в роботі Л.Плиски описана методика роботи з програмним комплексом ArcView при розробці ГІС-моделі затоплення на р. Тиса (м. Рахів) [22].

Співробітниками Закарпатського басейнового управління водних ресурсів р. Тиса спільно з європейськими дослідниками реалізовані проекти управління ризиками затоплень на р. Тиса [23].

Зокрема, вченими Інституту проблем математичних машин і систем НАН України та фахівцями Центру ГІС Аналітик, під керівництвом М.Й. Железняка, у 2010 році створена система моделювання зон затоплень паводковими водами територій м. Київ, а саме моделі RIVTOX та COASTOX-UN [24]. Тестування моделі COASTOX-UN у США та Південній Кореї показало її переваги над аналогами MIKE 21 та ADCIRC [25].

Методика моделювання водозбірних басейнів а також методологічні основи використання програмного забезпечення HEC-RAS та HEC-GeoRAS для моделювання затоплень внаслідок підвищення рівня води у річках описано в роботах Ю.П. Стародуба та А.П. Гаврися [26, 27].

У роботах, присвячених математичному моделюванню повеней р. Опір та р. Стрий наведено порівняння та оцінка результатів моделювання затоплення за допомогою програмних комплексів ArcGIS, HEC-GeoRAS, HEC-RAS та результатів розрахункового математичного моделювання. Розрахунки показали подібні результати, враховуючи похибки, що зумовлені неточністю вимірювань геометричних розмірів річки [28].

5.1.2 Фактори, що впливають на ризик затоплення

На ризик затоплення, також як й на формування максимального стоку річок, впливає цілий ряд факторів. Основні фактори формування максимального стоку в басейні р. Вісла розглянуті нами у 1 розділі. Що

стосується чинників, що підвищують ризик затоплення окремих територій, то у своїй роботі [29] О'Донел і Торн відмічають, що деякі з них відносяться до природних процесів, а інші - до людської діяльності. Основні фактори, що впливають на ризик затоплення, включають:

1. Географічні умови: рельєф місцевості, геологічні утворення та гідрологічна мережа визначають розподіл води та потенційний ризик затоплення. Наприклад, наявність річок, озер або низинних районів може збільшити ризик затоплення;

2. Погодні умови: інтенсивні дощі, танення снігу, циклони та інші погодні явища можуть спричинити паводки. Висока інтенсивність опадів може значно збільшити ризик затоплення;

3. Зміна клімату: загальне зростання температури повітря та глобальні зміни клімату можуть впливати на розподіл опадів, висоту снігового покриву та, як результат, на затоплення. Зміни клімату можуть призводити до збільшення ризику затоплення через збільшення інтенсивності та частоти погодних явищ;

4. Людська діяльність: зміни природних екосистем, зменшення лісових площ, урбанізація та інші людські дії можуть впливати на ризик затоплення. Наприклад, забудова на ділянках, що періодично затоплюються, неправильне керування водними ресурсами можуть підвищити ризик затоплення;

5. Інфраструктура: стан водних споруд, включаючи греблі, дамби, канали та системи водовідведення, мають великий вплив на ризик затоплення. Недоліки у будівництві, погана технічна підтримка та недостатнє обслуговування інфраструктури можуть збільшити ймовірність затоплення.

6. Вразливість населення та інфраструктури: рівень підготовленості та вразливість населення і інфраструктури великою мірою визначають наслідки затоплення. Населені райони з низьким рівнем підготовленості, недостатньою системою попередження, обмеженими можливостями евакуації та недостатніми інженерними заходами безпеки є особливо вразливими перед затопленнями [29].

5.1.3 Визначення параметрів оцінки ризику затоплення

Параметри оцінки ризику затоплення визначаються на основі доступних даних та контексту конкретного дослідження. Основні параметри, які можуть бути використані для оцінки ризику затоплення, включають [30]:

1. Інтенсивність паводків: визначає, наскільки сильними можуть бути паводки в розглянутій області. Інтенсивність паводків може бути визначена на основі історичних даних про рівні води, витрати води та тривалість паводків;

2. Частота паводків: вказує, як часто можуть виникати паводки в досліджуваній області. Частота паводків може бути визначена на основі історичних даних;

3. Площа та обсяг затоплення: відображають просторовий розмах та масштаб затоплення, яке може відбутися внаслідок паводків. Вони можуть бути визначені на основі географічних даних, топографічних карт, цифрових моделей рельєфу та інших джерел інформації;

4. Швидкість розвитку паводку: вказує на темп, з яким паводквий стік затоплює територію. Швидкість розвитку паводку може бути визначена на основі історичних даних або моделювання гідрологічних процесів;

5. Потенційні збитки: відображає втрати, які можуть виникнути внаслідок затоплення. Вони можуть включати матеріальні збитки, втрату життів або здоров'я людей, пошкодження інфраструктури;

6. Вразливість населення та інфраструктури: визначає, наскільки вразливі населені райони та інфраструктура перед затопленнями. Враховує рівень підготовленості, наявність попереджувальних систем, можливості евакуації, стан інженерних заходів безпеки, а також густоту забудови в районах під загрозою затоплення;

7. Екологічні наслідки: враховує можливий вплив паводків на природні екосистеми та біорізноманіття. Оцінює можливі втрати в природних ресурсах, забруднення водоймищ та шкоду для екосистем;

8. Соціально-економічні наслідки: відображає соціально-економічні наслідки затоплення, такі як втрати виробничої діяльності, економічні збитки, втрати робочих місць та соціальні наслідки для спільнот;

9. Ймовірність виникнення паводку. Може бути визначена на основі статистичних даних про попередні паводки, кліматичних змін, гідрологічних моделей та інших факторів.

Визначення цих параметрів вимагає збору відповідних даних, аналізу інформації та використання відповідних методів оцінки ризику. Комбінація цих параметрів дозволяє отримати комплексну оцінку ризику затоплення та розробити ефективні стратегії попередження та управління ризиком.

5.2. Моделі та методи оцінки ризику затоплення

Існує велика кількість моделей оцінки ризику затоплення, які застосовуються у дослідженнях:

1. Гідрологічні моделі: за допомогою таких моделей визначається розподіл води та затоплених зон під час паводків. Такі моделі базуються на гідрологічних рівняннях, що враховують водний баланс, характеристики річкових басейнів та інші фактори і дозволяють прогнозувати рівень води, швидкість потоку та розподіл зон затоплення [31];

2. Статистичні моделі: застосовуються у проведенні аналізу статистичних зв'язків між паводками та факторами ризику затоплень. Вони базуються на аналізі історичних даних про паводки і використовують статистичні методи, такі як регресійний аналіз, кластерний аналіз та аналіз розподілів для встановлення залежностей між паводками та різними факторами [32];

3. Географічні інформаційні системи (ГІС): ГІС використовуються при інтеграції географічних даних, таких як топографічні карти, дані про річкові системи, висотні моделі рельєфу та інші для створення карт ризику

затоплення. ГІС дозволяють візуалізувати розподіл ризику та ідентифікувати вразливі об'єкти [33];

4. Аналітичні моделі: найчастіше використовуються при аналізі ризику затоплення шляхом систематичного оцінювання факторів ризику та їх впливу. Вони можуть включати SWOT-аналіз (аналіз сильних і слабких сторін, можливостей і загроз) [34];

5. Фізичні моделі: можуть бути використані для оцінки затоплених зон, руйнування споруд та інших фізичних наслідків паводків. Вони можуть включати гідродинамічні моделі, які описують рух води, включаючи швидкість потоку, розподіл тиску та інші параметри;

6. Моделі ризику на основі штучних нейронних мереж (ШНМ): використовуються при прогнозуванні ризику затоплення на основі штучних нейронних мереж. Вони використовують велику кількість вхідних даних, таких як гідрологічні, метеорологічні та географічні дані, для навчання мережі встановлювати зв'язки між вхідними параметрами та ризиком затоплення. ШНМ можуть бути використані для прогнозування ризику на різних географічних областях та в різних умовах [35, 36];

7. Вірогіднісні моделі: за допомогою таких моделей проводиться оцінка ризику затоплення на основі ймовірнісних розподілів. Для визначення ймовірності настання паводків різної інтенсивності та розрахунку ризику затоплення на основі комбінації ймовірностей використовують статистичні методи [37];

Застосування географічних інформаційних систем (ГІС) є потужним інструментом для оцінки ризику затоплення. ГІС поєднує географічні дані з різних джерел, таких як цифрові карти, супутникові зображення, дані про клімат, топографічні дані та інші, та дозволяє проводити аналіз, візуалізацію та моделювання ризиків затоплення. Основні підходи до використання ГІС для оцінки ризику затоплення включають [33]:

1. Створення спеціальних баз даних: бази даних, що містять інформацію про географічні об'єкти, такі як річки, озера, дренажні системи, ландшафти та

інші елементи, що становлять потенційну загрозу затоплення створюються за допомогою ГІС. Такі дані можуть бути використані для аналізу та моделювання ризиків;

2. Аналіз топографічних даних: ГІС дозволяють аналізувати топографічні дані, зокрема висоту, нахил території, наявність долин та западин. Це допомагає визначити потенційні шляхи розподілу води та області з найвищим ризиком затоплення;

3. Моделювання потенційних сценаріїв затоплення: моделювання різних сценаріїв затоплення на основі гідрологічних та кліматичних даних проводиться з використанням ГІС, що допомагає визначити області з найбільшим ризиком та встановити потенційні наслідки затоплення;

4. Аналіз вразливості населення та інфраструктури: ГІС дозволяють аналізувати географічні дані про населені райони, інфраструктурні об'єкти;

5. Інтеграція різних шарів інформації: комплексний підхід до оцінки ризику з врахуванням різноманітних факторів, що сприяють затопленню реалізується з інтегруванням різних шарів інформації, таких як географічні об'єкти, кліматичні дані, соціально-економічні дані та інші фактори, що впливають на ризик затоплення;

6. Візуалізація результатів: надають можливість візуалізувати результати оцінки ризику затоплення у вигляді карт, графіків, теплових карт та інших візуальних результатів. Це допомагає зрозуміти розподіл ризику затоплень та забезпечує зручну форму представлення результатів для прийняття рішень;

7. Інтерактивність та доступність: ГІС є доступним інструментом для використання науковцями і можуть застосовуватися для створення інтерактивних платформ та веб-додатків, які дозволяють користувачам взаємодіяти з результатами.

5.3. Визначення зон затоплень

Враховуючи вищенаведений короткий аналіз існуючих методів та моделей, для створення моделі затоплення та визначення відповідних зон затоплення в досліджуваному басейні р. Вісла було віддано перевагу програмному забезпеченню HEC-RAS 6.2.

HEC-RAS (Hydrologic Engineering Centers-River Analysis System) - це широко використовуване програмне забезпечення, розроблене Корпусом інженерів-гідрологів Військово-морських сил США. Воно призначене для гідравлічного моделювання та аналізу річкових систем, русел та затоплених зон. HEC-RAS використовується для гідрологічного моделювання, зокрема річкового стоку, рівнів води та зон затоплення. HEC-RAS надає комплекс інструментів для проведення одновимірного (1D) та двовимірного (2D) гідравлічного моделювання. Воно дозволяє аналізувати та проектувати різні гідравлічні структури, такі як мости, колектори, дамби та системи контролю повеней. Програмне забезпечення використовує числові методи для розв'язання рівнянь руху рідини, включаючи рівняння Сен-Венана, які описують збереження маси та моменту в потоці відкритого русла. HEC-RAS включає графічний інтерфейс користувача, який дозволяє визначати геометрію річки, встановлювати граничні умови, вводити гідрологічні дані та візуалізувати результати моделювання.

HEC-RAS є одним з стандартних інструментів для картографування затоплених територій та оцінки ризику затоплень [38].

Реалізація моделювання зон затоплень здійснена на прикладі ділянки р. Рата – с. Пристань, яка за планом управління ризиками затоплення на окремих територіях у межах району басейну річки Вісла на 2023-2030 роки, є однією з 16 із потенційно значними ризиками затоплення [6].

5.3.1 Вихідні дані

Вихідні дані, необхідні для моделювання затоплень, подібні для більшості відповідних програмних комплексів і значною мірою залежать від обраного методу модулювання. До вихідних даних відносяться [38]:

1. Цифрові карти. Топографічні карти дозволяють отримати інформацію про рельєф території, висоту, нахил та інші географічні характеристики, що можуть впливати на розподіл води під час затоплення;

2. Гідрологічні дані. Можуть включати інформацію про витрати, рівні води в річках та інших водних об'єктах. Можуть бути отримані за даними спостережень або за модельними розрахунками;

3. Дані про руслову мережу. Дані про руслову мережу, включаючи розташування річок, каналів, локальних понижень рельєфу, а також каналізаційних систем необхідна для визначення потенційних шляхів розподілу води під час затоплення;

4. Дані про населені пункти та інфраструктуру. Визначення розташування населених пунктів, будівель, доріг, господарських об'єктів та іншої інфраструктури допомагає дослідити потенційні наслідки затоплення та вразливість населення та інфраструктури;

5. Кліматичні дані: Інформація про кліматичні умови, включаючи опади, температуру, вітер та інші фактори використовуються для прогнозного моделювання затоплень;

6. Геологічні дані. Дані про геологічну структуру, ґрунти, водонепроникність території та інші геологічні параметри можуть відігравати роль у визначенні потенційних зон затоплення..

5.3.2 Створення цифрової моделі рельєфу

Використання геоінформаційних систем та супутникових знімків у гідрологічних розрахунках і моделюванні дозволяє отримати або уточнити

морфометричні характеристики будь-якого річкового басейну, а також руслової і річкової мережі. Зокрема, з застосуванням сучасних ГІС можливо побудувати окремий річковий басейн для будь якої точки досліджуваної території, наприклад, гідрологічного посту. У роботі наведена методика створення і попередньої обробки цифрової моделі рельєфу, а також визначення річкової мережі і водозбору на прикладі всього басейну р. Вісла в межах України, а також для окремої ділянки з потенційно значним ризиком затоплення р. Рата – с. Пристань

Цифрові моделі рельєфу відіграють важливу роль у гідрологічному аналізі і подальшому моделюванні. Зокрема, ЦМР використовуються при визначенні територій, що мають потенційно значні ризики затоплення та побудові карт загроз та ризиків затоплення [27].

Розробка ЦМР дозволяє спростити базовий аналіз річкових систем, зокрема шляхом автоматичної побудови річкової мережі, водозборів, і визначення їх морфометричних характеристик. Створення ЦМР досліджуваного басейну проводилось за допомогою QGIS з додатками GRASS і SAGA.

Необхідними даними для створення ЦМР є SRTM знімки найбільшої доступної роздільної здатності, які можна отримати на ресурсі EarthExplorer [39]. Якщо для аналізу обрана велика територія, таких знімків буде декілька, які надалі об'єднуються в один растровий шар. Знімки SRTM отримані у географічній системі координат, і для подальшої роботи перепроєкціюються для отримання одиниць виміру в метрах.

На рис. 5.2 зображені об'єднані необроблені SRTM знімки, обрізані по території басейну р. Вісла в межах України.

Використання ЦМР в гідрологічному моделюванні базується на принципі стікання води з комірки з більшою висотою у розташовану поряд комірку з меншою висотою. Таким чином, комірки ЦМР утворюють мережу потоку, за якою можна визначати річкові русла і водозбори.

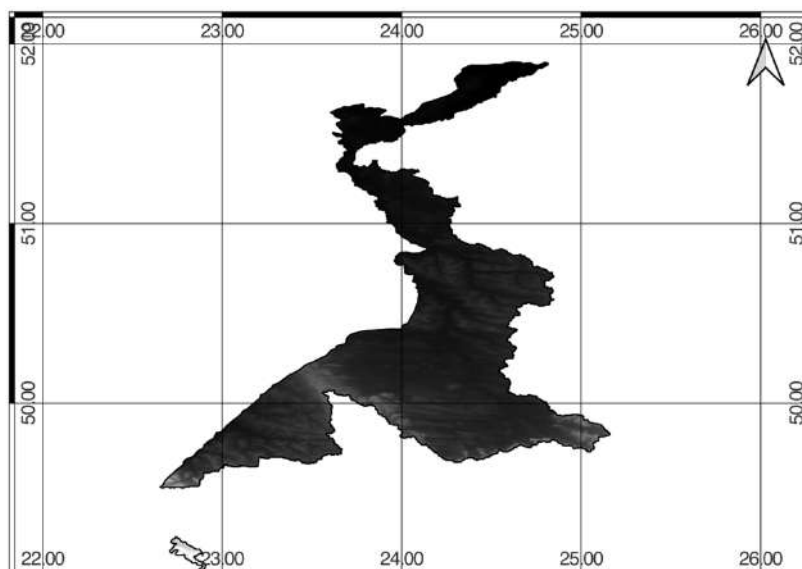


Рисунок 5.2 – SRTM знімки басейну р. Вісла в межах України

Для використання таких знімків у гідрологічному моделюванні такі пониження варто видаляти або згладжувати, щоб вони перестали бути замкненими. В роботі був використаний інструмент Fill Sinks XXL (Wang & Liu) з додатку SAGA, що дозволяє на місці замкнених понижень створити похилу поверхню [40, 41]. На рис. 5.3 представлена побудована цифрова модель рельєфу басейну р. Вісла в межах України.

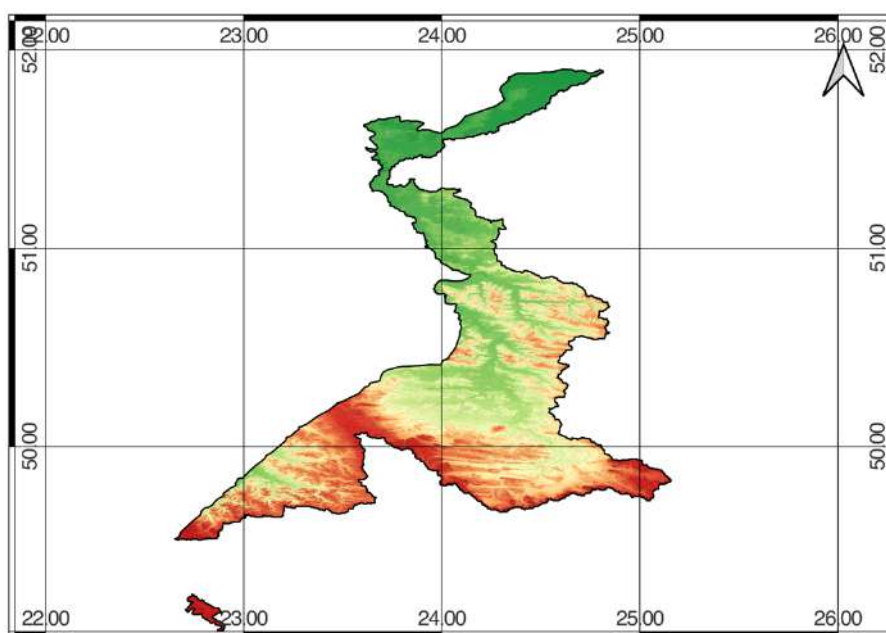


Рисунок 5.3 – Цифрова модель рельєфу басейну р. Вісла в межах України

Одним з методів визначення русла річок є інструмент Flow Accumulation з додатку SAGA або r.flow з додатку GRASS. Так, для кожної точки поверхні визначається сумарна кількість всіх комірок, стік з яких переходить через дану комірку [42]. Шар будується в умовних одиницях, і для коректного відображення растровий шар перекласифікуються так, щоб на карті відображались лише ті комірки, через які проходить стік з визначеної кількості комірок. У даному випадку використовувались знімки SRTM 1 Arc-second з шагом комірки у 30 м, тобто 1 комірка займає площу 900 м². Для відображення на карті були обрані комірки, через які проходить стік з 1 111 комірок (1 км²) або більше. При оформленні карти можна представити комірки, через які проходить стік з найбільшої кількості комірок найтемнішими.

На рис. 5.4 наведена побудована за представленою вище методикою річкова мережа басейну р. Вісла в межах України.

За таким алгоритмом визначаються і межі водозбору, але з використанням інструменту Catchment Area (SAGA). Водозбірна площа тут визначається для обраної комірки ЦМР, яка є замикаючим створом.

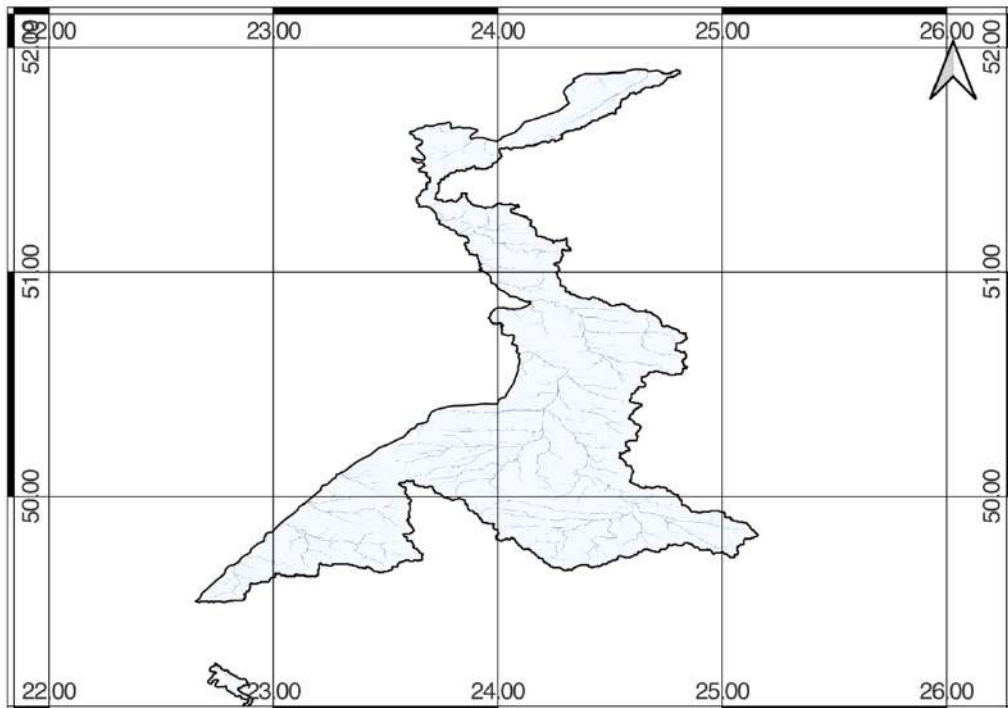


Рисунок 5.4 – Річкова мережа басейну р. Вісла в межах України

Площа буде дорівнювати сумарній площі всіх комірок, стік з яких проходить через дану комірку.

Цифрова модель рельєфу (ЦМР) з достатньою точністю для попереднього моделювання зон затоплення для великих територій може бути побудована за даними SRTM, але проведені аналізи точності даних SRTM [41, 43] вказують на значні похибки, до 2,9 м для рівнинної території.

Для точного дослідження ТПЗРЗ слід користуватися уточненими ЦМР, отриманими за даними LiDAR зйомки та промірних робіт безпосередньо у польових дослідженнях.

У подальших розрахунках за відсутності польових спостережень та зйомок були використані саме дані SRTM, отримані з ресурсу USGS Earth Explorer та оформлені за допомогою QGIS. Отриману ЦМР можливо використовувати при подальшому моделюванні зон затоплення на території басейну р. Вісла в межах України.

Для прикладу визначення зон затоплення окремих територій, що мають потенційні ризики затоплення обрана ділянка р. Рата – с. Пристань. Для подальшого аналізу необхідно виділити територію басейну р. Рата з замикаючим створом у с. Пристань. Виділення басейну проведене за допомогою QGIS з використанням інструменту Upslope Area з додатку SAGA.

Інструмент призначений для ідентифікації комірок, стік з яких проходить через точку з заданими координатами і фактично дозволяє визначити межі басейну.

Результатом обробки вихідної ЦМР є растровий шар у якому представлені тільки 2 значення: 1 – для комірок, що входять до басейну і 0 – для комірок, що не входять.

Отриманий і векторизований шар, що відображає басейн р. Рата - с. Пристань, використовується як маска для обрізки ЦМР.

Результат виділення басейну р. Рата - с. Пристань, а також частина ЦМР для досліджуваної ділянки наведена на рис. 5.5 і 5.6.

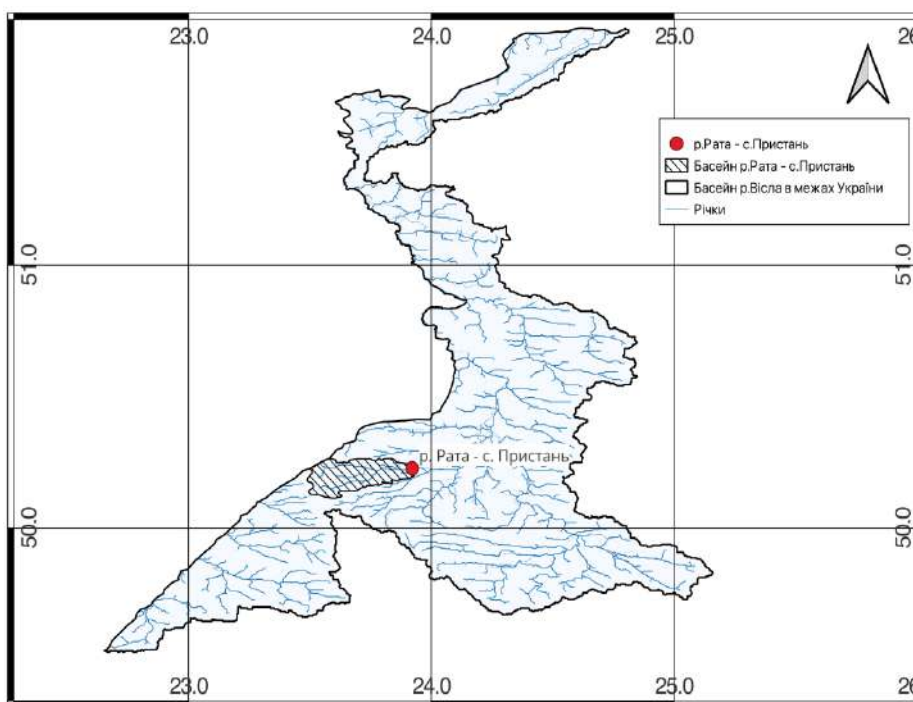


Рисунок 5.5 – Басейн р. Рата – с.Пристиань у межах української частини басейну р. Вісла

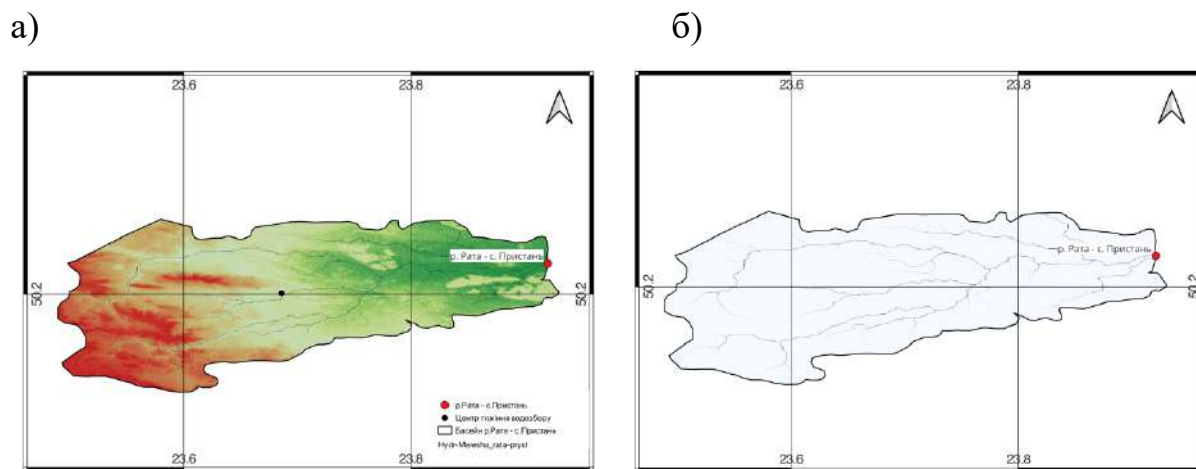


Рисунок 5.6 – Цифрова модель рельєфу (а) та руслова мережа (б) басейну р. Рата – с. Пристань

5.3.3 Методи проектування гідрографів весняного водопілля та дощових паводків

У світі при проектуванні гідрографів широко використовуються фізико-математичні моделі формування річкового стоку, як надійні методи

розрахунків відповідних характеристик стоку. Такі моделі враховують не тільки процеси стікання води, а і інші елементи стоку: ґрунтовий стік, випаровування, інфільтрація води, поверхнева затримка та стікання води поверхнею водозбору.

Одні з перших моделей були засновані на методі одиничного гідрографу, запропонованому Л.К. Шерманом [44].

Існує велика кількість сучасних моделей, що використовуються на базі відповідного програмного забезпечення. Деякі з цих моделей здатні моделювати кількість зливових вод (MIDUSS 98, CIVILCAD і ILSAX), у той час як інші – як кількість, так і якість зливових вод (XP-SWMM, DR3M, HSPF і STORM).

Тим не менш, реалізація проектування паводкових гідрографів з достатньою точністю може бути виконана більш простим шляхом на основі сучасних формул об'ємного або операторного вигляду.

Існує досить широка методична база для проектування паводкових гідрографів, що включає методи, що засновані на типових моделях паводків, схематизації паводку за геометричною фігурою, та на індивідуальному проектуванні по ходу кривих водовіддачі і розподілу одиничних площ [45].

Окремо виділяють методи побудови гідрографів природних паводків та паводків техногенного характеру.

Вибір методу проектування гідрографів значною мірою залежить від наявності достатньої вихідної інформації по максимальному стоку. Якщо за досліджуваним водозбором існує достатній за тривалістю ряд спостережень за стоком, для побудови розрахункового гідрографу широко використовується метод аналогії.

Таким чином за основу обирається паводок або водопілля з найбільшою спостереженою витратою води. При коротких рядах спостережень використовується типовий, осереднений гідрограф [45]. Перехід до розрахункового гідрографа виконується за допомогою рівняння:

$$Q_i = Q_{i\phi} k_Q; \quad (5.1)$$

та

$$t_i = t_{i\phi} k_t; \quad (5.2)$$

де $Q_{i\phi}$ і Q_i – витрати води фактичного та розрахункового гідрографів в одиницю часу;

$t_{i\phi}$ і t_i – відповідні значення абсцис фактичного та розрахункового гідрографів;

k_Q – перехідний коефіцієнт для розрахунку ординат гідрографів;

k_t – перехідний коефіцієнт для розрахунку абсцис гідрографів, які визначаються за формулою:

$$k_t = (q_\phi / Y_\phi) \cdot (Y_p / q_p); \quad (5.3)$$

де q_ϕ і Y_ϕ , q_p і Y_p – максимальні модулі та шари стоку фактичного та розрахункового гідрографу.

У методиці проектування гідрографів, наведеній у СНіП 2.01.14-83 [46] у якості вихідних даних приймаються фактичні витрати води високих водопіль.

Розрахункові гідрографи весняних водопіль будуються по середніх добових витратах води, найчастіше обирається фактичний гідрограф, що характеризується однією вершиною з найбільшою витратою води, але можуть використовуватися багатoverшинні гідрографи.

Перехід від фактичного гідрографа до розрахункового виконується наступним чином:

- за максимальними витратами води розраховуються перехідні коефіцієнти k_1 , k_2 , k_3 :

$$k_1 = \frac{Q_p}{Q_\phi}; \quad (5.4)$$

$$k_2 = \frac{(W_p - 86400Q_p)}{(W_\phi - 86400Q_\phi)}; \quad (5.5)$$

$$k_3 = \frac{(W'_p - W_p)}{(W'_M - W_M)}; \quad (5.6)$$

де Q_p і Q_ϕ – максимальні середньодобові витрати води фактичного та розрахункового гідрографів;

W_p і W_ϕ – об'єми стоку головної хвилі фактичного та розрахункового гідрографів;

W'_p і W'_M – об'єми стоку фактичного та розрахункового гідрографів.

- визначається масштабний коефіцієнт абсциси k_t :

$$k_t = \frac{\frac{q_\phi}{Y_\phi}}{\frac{Y_p}{q_p}}; \quad (5.7)$$

- координати розрахункового гідрографу визначаються за формулами:

$$Q_i = Q_{i_\phi} \cdot t; \quad (5.8)$$

$$t_i = t_{i_\phi} \cdot k_t. \quad (5.9)$$

За відсутності спостережень Г.О. Алексеевим [47] запропоновано проектування гідрографів з використанням рівняння виду:

$$y = 10 \frac{a(1-x)^2}{x}; \quad (5.10)$$

де $y = Q_t/Q_p$ – ординати розрахункових гідрографів, виражені в частках від максимальної середньодобової витрати води;

$x = t/t_n$ – абсциси розрахункових гідрографів виражені в частках від тривалості підйому повені t_n ;

a – параметр, який залежить від коефіцієнта форми гідрографа λ .

Тривалість підйому водопілля або паводка t_{Π} розраховується як:

$$t_{\Pi} = \lambda Y_p / q_p ; \quad (5.11)$$

де Y_p – розрахунковий шар стоку відповідної забезпеченості;

q_p – максимальний модуль стоку відповідної забезпеченості.

Коефіцієнт форми гідрографа λ визначається за таблицею, наведеною у СНіП 2.01.14-83 [46] з використанням коефіцієнта несиметричності k_s , який встановлюється в залежності від площі водозбору або по річках-аналогах і може визначатися як:

$$k_s = Y_n / Y_m ; \quad (5.12)$$

де Y_n – шар стоку за період підйому водопілля або паводка;

Y_m – шар стоку за період водопілля або паводка.

При відсутності спостережень за максимальним стоком також використовується методика Д.Л. Соколовського [45], що є удосконаленим варіантом схематизації Д.І. Кочеріна [48], за якою фази підйому та спаду гідрографів описуються окремими рівняннями:

- для фази підйому:

$$Q_t = Q_m \left(\frac{t}{t_n} \right)^{m_1} ; \quad (5.13)$$

- для фази спаду:

$$Q_t = Q_m \left(\frac{t_{cn} - t}{t_{cn}} \right)^{m_2}; \quad (5.14)$$

де t_n – тривалість підйому;

t_{cn} – тривалість спаду;

Q_m – максимальна витрата води.

m_1 та m_2 визначаються шляхом інтегрування по t_n та t_{cn} :

- для фази підйому:

$$W_n = \int_0^{t_n} Q_t dt = \frac{1}{m_1 + 1} Q_m t_n; \quad (5.15)$$

- для фази спаду:

$$W_{cn} = \int_0^{t_{cn}} Q_t dt = \frac{1}{m_2 + 1} Q_m t_{cn}; \quad (5.16)$$

де W_n – об'єм стоку у фазі підйому;

W_{cn} – об'єм стоку у фазі спаду.

Відповідно, отримали:

$$m_1 + 1 = \frac{Q_m t_n}{W_n} = \frac{Q_m t_n}{Y_m \cdot F}; \quad (5.17)$$

$$m_2 + 1 = \frac{Q_m t_{cn}}{W_{cn}} = \frac{Q_m (T_n - t_{cn})}{Y_m \cdot F}; \quad (5.18)$$

де T_n – тривалість водопілля або паводка, $T_n = t_n + t_{cn}$.

Згідно з методикою проектування гідрографів при відсутності даних спостережень, наведеній СНіП 2.01.14-83 рекомендується схема Г.О. Алексєєва (5.10).

У такому випадку ординати розрахункового гідрографа визначаються як:

$$Q_i = y' Q_p ; \quad (5.19)$$

$$t_i = x t_n ; \quad (5.20)$$

де y' і x – відносні ординати розрахункового гідрографу;

t_n – тривалість підйому весняної повені або паводка, що визначається за формулою:

$$t_n = 0,0116\lambda \frac{Y_p}{q_p} ; \quad (5.21)$$

де Y_p – розрахунковий шар стоку за паводок чи водопілля;

q_p – розрахунковий модуль стоку.

Недоліком методики є розрахунок коефіцієнта форми гідрографа λ та коефіцієнта симетричності k_s , який рекомендовано визначати по річках-аналогах.

Перехідні коефіцієнти від строкових максимальних витрат води до середньодобових значень k_τ також визначаються спрощено, по річках-аналогах або за таблицями, наведеними в СНіП 2.01.14-83 в залежності від площі водозбору.

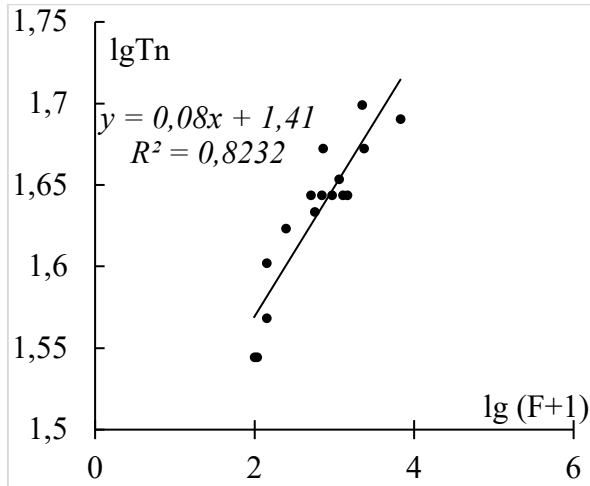
У роботі Є.Д. Голченко та С.В. Авгайтиса обґрунтована методика проектування паводкових гідрографів, яка включає до розрахунку характеристики схилового припливу, що значною мірою впливають на k_τ [49].

Так, в залежності від тривалості водопілля T_n та коефіцієнту часової нерівномірності стоку $\frac{m+1}{m}$ перехідні коефіцієнти k_τ будуть дорівнювати:

$$k_\tau = \frac{1}{1 - \frac{1}{(m+1)T_n}} . \quad (5.22)$$

Для визначення тривалості водопілля T_n в залежності від площі водозборів на досліджуваній території р. Вісла в межах України побудовані відповідні графіки:

а)



б)

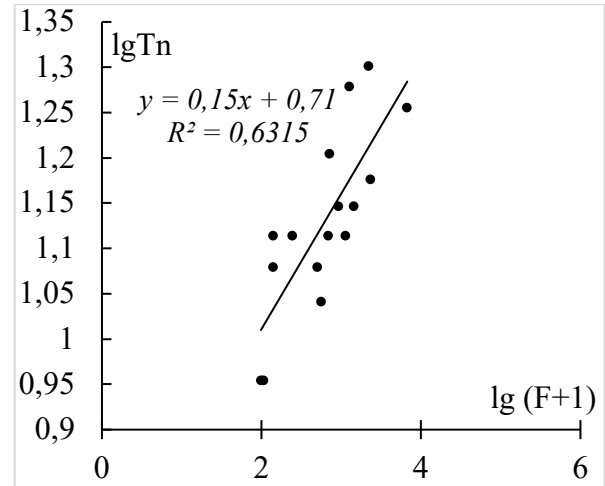


Рисунок 5.7 – Визначення тривалості (а) водопілля T_n та (б) паводків у басейні р. Вісла в межах України

Виходячи з рис. 5.7, тривалість водопілля T_n визначається за виразом:

$$\lg T_n = 0.08 \lg(F + 1) + a ; \quad (5.23)$$

$$T_n = a (F + 1)^{0.08} ; \quad (5.24)$$

Тривалість паводку:

$$\lg T_n = 0.15 \lg(F + 1) + a ; \quad (5.25)$$

$$T_n = a (F + 1)^{0.15} ; \quad (5.26)$$

де $a = T_0$ – час схилового припливу.

Коефіцієнти часової нерівномірності схилового припливу у свою чергу отримані у розділі 3 і формула для їх визначення в залежності від площі водозбору має вигляд:

- для весняних водопіль:

$$\frac{m+1}{m} = 7.4 - 1.45 \lg (F + 1) ; \quad (5.27)$$

відповідно,

$$m = \frac{1}{6.4 - 1.45 \lg (F + 1)} ; \quad (5.28)$$

- для дощових паводків:

$$\frac{m+1}{m} = 3.9 - 0.8 \lg (F + 1) ; \quad (5.29)$$

$$m = \frac{1}{2.9 - 0.8 \lg (F + 1)} ; \quad (5.30)$$

Отримані регіональні рівняння можуть бути використані для проектування гідрографів за відсутності даних спостережень на річках в басейні Вісли в межах України.

5.3.4 Реалізація методики проектування гідрографів весняного водопілля та дощових паводків

Розрахункові гідрографи для досліджуваної території р. Вісла в межах України проектувалися за методикою Г.О. Алексєєва, що наведена в СНіП 2.01.14-83 та була удосконалена Є.Д. Гопченко та С.В. Авгайтисом [49].

Як було зазначено вище, гідрографи періоду весняного водопілля будуються за середньодобовими витратами води, отже необхідно перейти від

розрахункової максимальної витрати $Q_{1\%}$ до середньодобової $Q_{1\%сер}$ за допомогою перехідного коефіцієнту K_t за формулою:

$$Q_{1\%сер} = Q_{1\%} k_t ; \quad (5.31)$$

Перехідний коефіцієнт k_t визначається за формулою (5.22) з використанням (5.24), (5.26) і (5.28), (5.30).

Форма розрахункових гідрографів залежить від багатьох факторів, таких як морфометричні характеристики басейну та розподілу часу водовіддачі, але в гідрологічних розрахунках приймають типову форму гідрографа.

Коефіцієнт несиметричності гідрографа k_s і відповідний йому коефіцієнт форми гідрографа λ визначені за виразом (5.32), наведеним у роботі [49].

$$k_s = 0.34 - 0.046 \lg (F + 1) ; \quad (5.32)$$

Визначення схеми гідрографів, як для весняного водопілля, так і для дощових паводків за допомогою рівняння запропоноване Г.О. Алексєєвим:

$$Y = 10^{\frac{\alpha(1-x)^2}{x}} ; \quad (5.33)$$

де X – відносна абсциса розрахункового гідрографа, виражена в частках тривалості паводка;

Y – відносна ордината розрахункового гідрографа, виражена в частках середньодобової максимальної витрати води визначеної забезпеченості.

Абсолютні абсциси розрахункового гідрографу визначаються за формулою:

$$t_i = X_i t_n ; \quad (5.34)$$

де t_{Π} – тривалість підйому весняного водопілля або дощових паводків, визначається як:

$$t_{\Pi} = \frac{0.0116 \cdot \lambda \cdot Y_{1\%}}{q_{1\%}}; \quad (5.35)$$

де $Y_{1\%}$ - розрахунковий шар стоку весняного водопілля або дощових паводків рідкісної імовірності перевищення, мм; $q_{1\%}$ - модуль максимального стоку весняного водопілля або дощових паводків $\text{м}^3/\text{скм}^2$, λ – коефіцієнт форми гідрографа.

Для перевірки методики були побудовані паводкові гідрографи за характерні роки – роки, у які спостерігались найбільші максимальні спостережені витрати води весняних водопілля та дощових паводків, наближені до розрахункових витрат рідкісної імовірності перевищення.

Проектування паводкових гідрографів проведене для гідрологічних постів, що є замикаючим створом різних за площею водозборів (рис. 5.8 – 5.10)

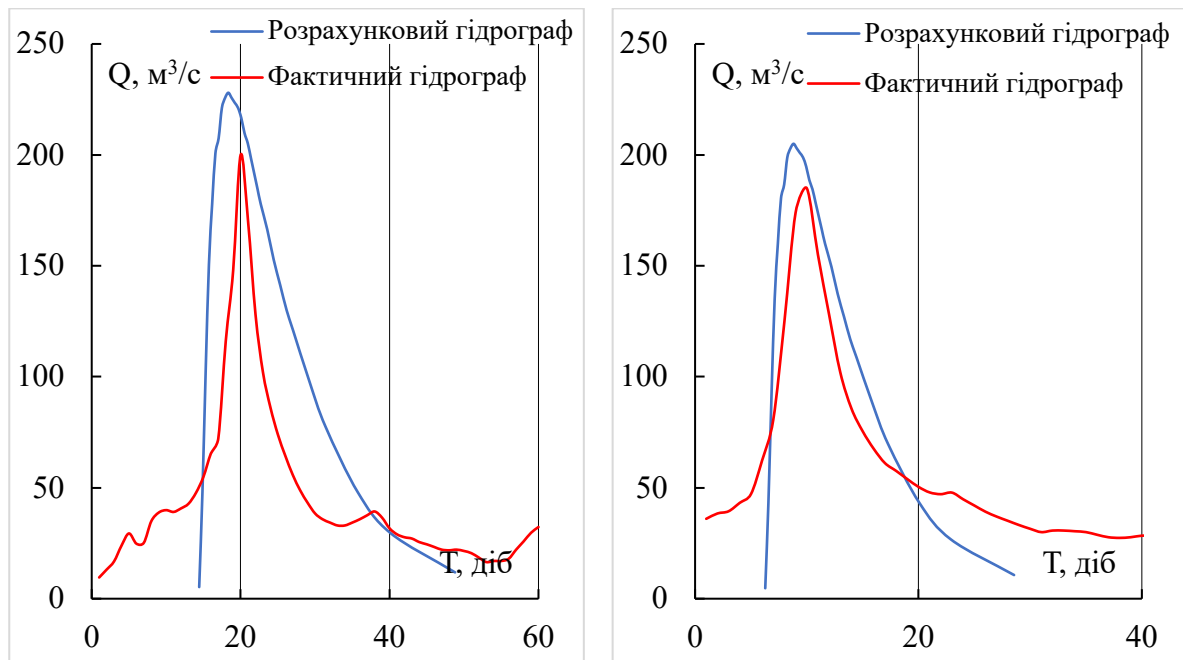


Рисунок 5.8 – Порівняння фактичних та розрахункових паводкових гідрографів весняного водопілля (а) та дощових паводків (б) р. Західний Буг – м. Кам’янка Бузька ($F = 2350 \text{ км}^2$)

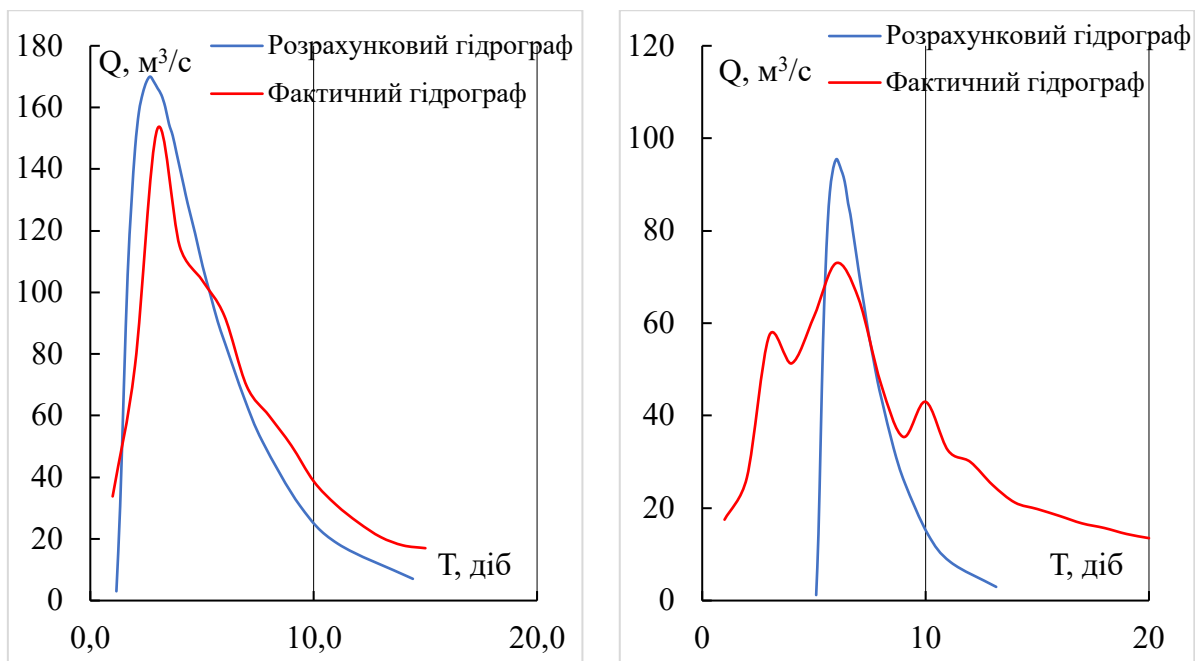


Рисунок 5.9 – Порівняння фактичних та розрахункових паводкових гідрографів весняного водопілля (а) та дощових паводків (б) р. Рата – м. Волиця ($F = 1140 \text{ км}^2$)

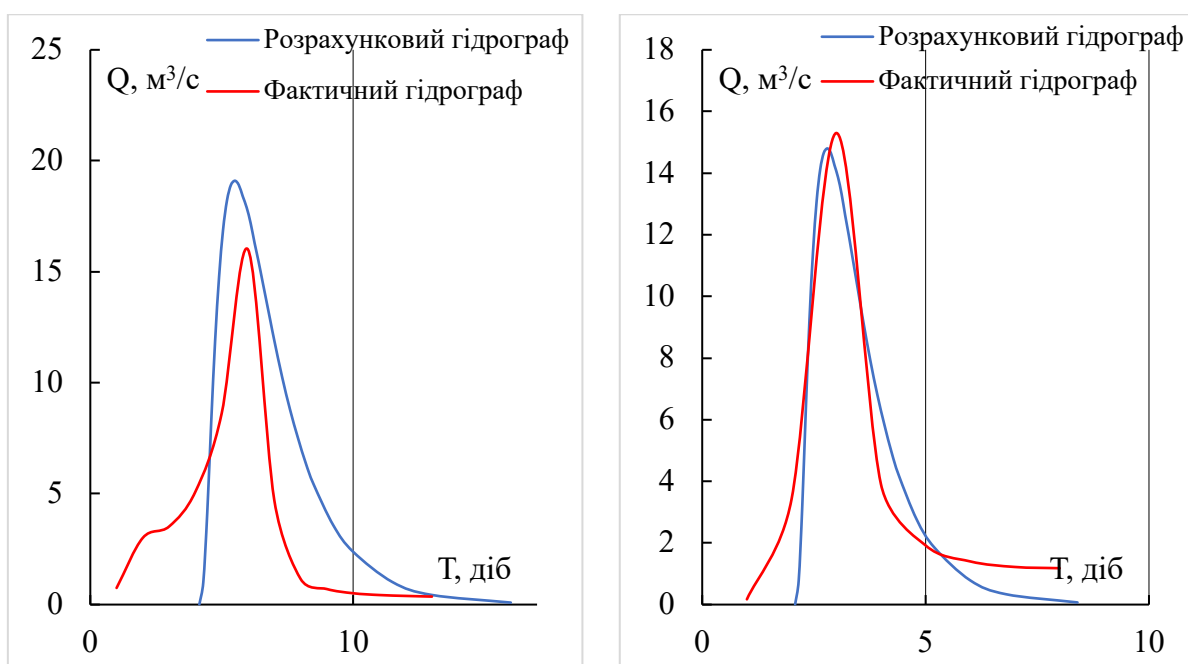


Рисунок 5.10 – Порівняння фактичних та розрахункових паводкових гідрографів весняного водопілля (а) та дощових паводків (б) р. Свиня – Жовква ($F = 98,6 \text{ км}^2$)

Як видно з рис. 5.8 – 5.10 для одномодальних гідрографів спостерігається досить висока збіжність. Точність отриманих розрахункових гідрографів на досліджуваному водозборі р. Вісла в межах України зберігається як для великих (р. Західний Буг – м. Кам'янка Бузька, $F = 2350 \text{ км}^2$) так і для малих водозборів (р. Свина – Жовква, $F = 98,6 \text{ км}^2$) і більшою мірою залежать від інтенсивності та характеру часового розподілу зливових опадів.

5.3.5 Обґрунтування методики проектування паводкових гідрографів в басейні р. Вісла в межах України за відсутності спостережень

Визначення максимальних витрат води рідкісної імовірності перевищення для побудови розрахункового гідрографу проводилось за методикою, наведеною у розділі 2 та обґрунтованою в розділі 4.

Послідовність розрахунку за пропонованою методикою показана в п.4.4.

Площа досліджуваного водозбору F та довжина річки L визначається за побудованою ЦМР, ухил I визначається за повздовжнім профілем, що також заснований на даних ЦМР (рис. 5.11).

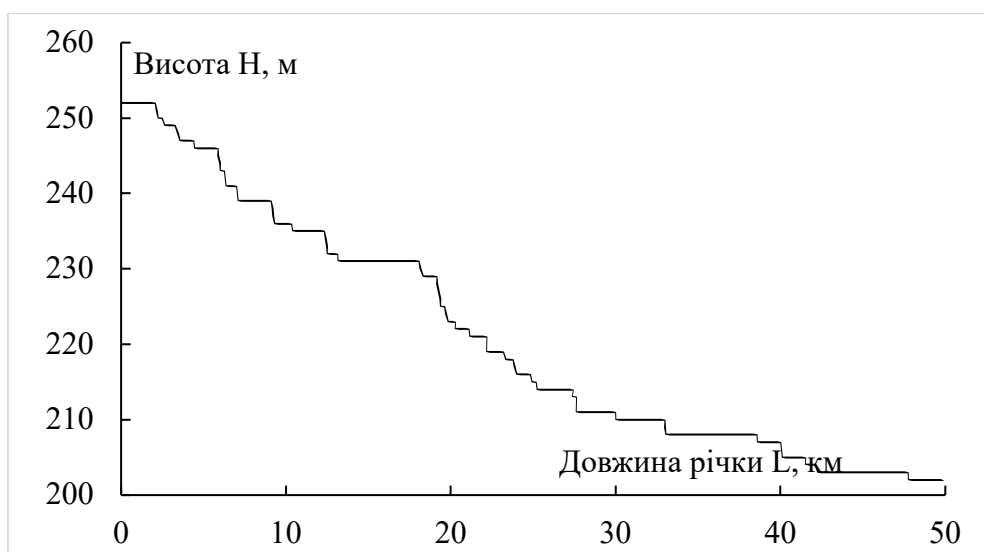


Рисунок 5.11 – Повздовжній профіль р. Рата – с. Пристань

За ЦМР визначена площа басейну р. Рата – с. Пристань, складає $F = 347 \text{ км}^2$. Довжина річки за повздовжнім профілем (рис. 5.11) $L = 49,9 \text{ км}$, ухил річки $I = 1 \text{ м/км}$.

За отриманими параметрами розрахункової методики проведений розрахунок максимальних модулів стоку $q_{1\%}$ для весняного водопілля за формулою (2.39) та відповідний розрахунок максимальних витрат води $Q_{1\%}$.

Розрахунковий гідрограф будується на основі даних про максимальні витрати, що відповідають розрахунковій забезпеченості, у нашому випадку – 1% за методикою СНиП 2.01.14-83 [46].

За наведеною вище методикою побудований розрахунковий гідрограф весняного водопілля на р. Рата – с. Пристань представлений на рис. 5.12

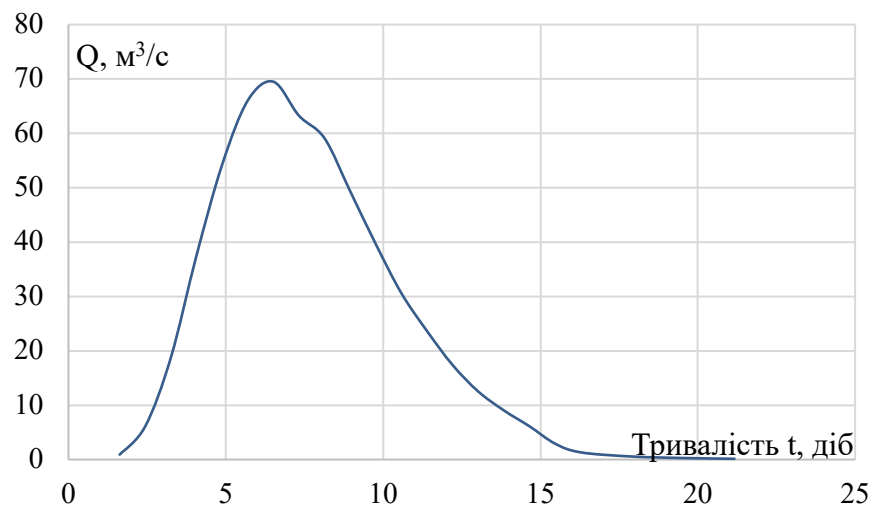


Рисунок 5.12 – Розрахунковий гідрограф весняного водопілля р. Рата – с. Пристань

5.4 Гідрологічне моделювання зони затоплення

Першим етапом роботи є створення нового проекту та робота з інтегрованою до програмного комплексу HEC-RAS ГІС - RAS Mapper. Необхідно імпортувати попередньо підготовану ЦМР та створити одновимірну модель потоку (1D). Для цього вручну та за допомогою підкладки з супутникових знімків відмічаються берегові лінії.

Далі визначаються осьові лінії потоку (Flow Paths). Вони використовуються для розрахунку довжини ділянок між поперечними перетинами і будуються вздовж берегової лінії за течією. Лінії не відображають і можуть не співпадати з зонами можливого затоплення, а є лише початковою геопросторовою оцінкою зв'язку центру мас потоку від одного поперечного перетину до іншого.

Також будуються лінії крос-секції річки (Cross sections). Їх потрібно розміщувати перпендикулярно потоку, досить часто для адекватного моделювання, від верхнього створу до нижнього, захоплюючи територію, що розглядається як потенційно небезпечна для затоплень. Тобто, такі поперечні перетини відображають зміни рельєфу всієї заплави, а в районі русла обмежені берегами автоматично позначаються як поперечні перерізи потоку [27].

Наступним кроком є побудова двовимірної моделі потоку (2D). На цьому етапі полігональним шаром визначається територія для подальшого аналізу, тобто, у нашому випадку, територія заплави річки по найвищих точках місцевості.

У побудованому шарі необхідно вказати відстань між розрахунковими точками, які є центрами розрахункових комірок. Доречніше обирати якомога менший розмір для більшої точності розрахунку. Для досліджуваної території обрана відстань між розрахунковими точками склала 5м, і відповідно, кількість розрахункових комірок близько 500000.

Також потрібно вказати коефіцієнти шорсткості Маннінга для окремих ділянок в залежності від опису водотоку та заплави.

Для досліджуваної території коефіцієнти Маннінга потоку склали від 0,06 для русла до 0,10 для заплави.

Після введення всіх необхідних характеристик запускається формування таблиці гідравлічних характеристик розрахункових комірок.

Також на даному етапі на карту наносяться лінії граничних параметрів потоку.

Після введення вихідної інформації потрібно налаштувати параметри Unsteady Flow Analysis, а саме інтервал обчислення та інтервал картування. Інтервал обчислення був обраний 1с, що відповідає більшій точності, але є більш ресурсномістким. Інтервал картування був налаштований на відображення проходження максимальної витрати.

Після проведення обробки вхідної інформації та перевірки похибок створюється растровий шар з відображенням глибини затоплення території. Для кращого відображення та можливості подальшої обробки шар затоплення імпортується в QGIS.

Авторами проведені відповідні дослідження з визначенням ділянок з потенційно значним ризиком затоплення в басейні р. Вісла в межах України з використанням розрахункового гідрографу [50,51].

Визначення зон затоплення було проведено на прикладі ділянки гідрологічного посту р. Рата – с. Волиця. Моделювання проводилось для періоду весняного водопілля та дощових паводків, а також за фактичними та розрахунковими ($Q_{1\%}$) гідрографами з метою порівняння площ зон затоплення. Варто зазначити, що максимальна спостережена витрата характерного року весняного водопілля (1964) досліджуваного басейну не є одновідсотковою. Забезпеченість її складає 3,2%. Відповідно, максимальна спостережена витрата характерного року дощових паводків має забезпеченість 3,8%.

Оброблені карти побудованих зон затоплення наведені на рис. 5.13 – 5.16.

В таблиці представлено порівняння площ затоплення з використанням фактичних та розрахункових гідрографів. Як видно з табл. 5.4 – площа затоплення може значно різнитись в залежності від величини витрат води. Тут варто врахувати, що фактичний гідрограф мав забезпеченість від 3,2% до 3,8%, і якщо ввести перехідний коефіцієнт λ_r , то він підвищує точність моделювання. Також слід враховувати, що для кожної окремої території значення можуть значно відрізнятись в залежності від рельєфу заплави.

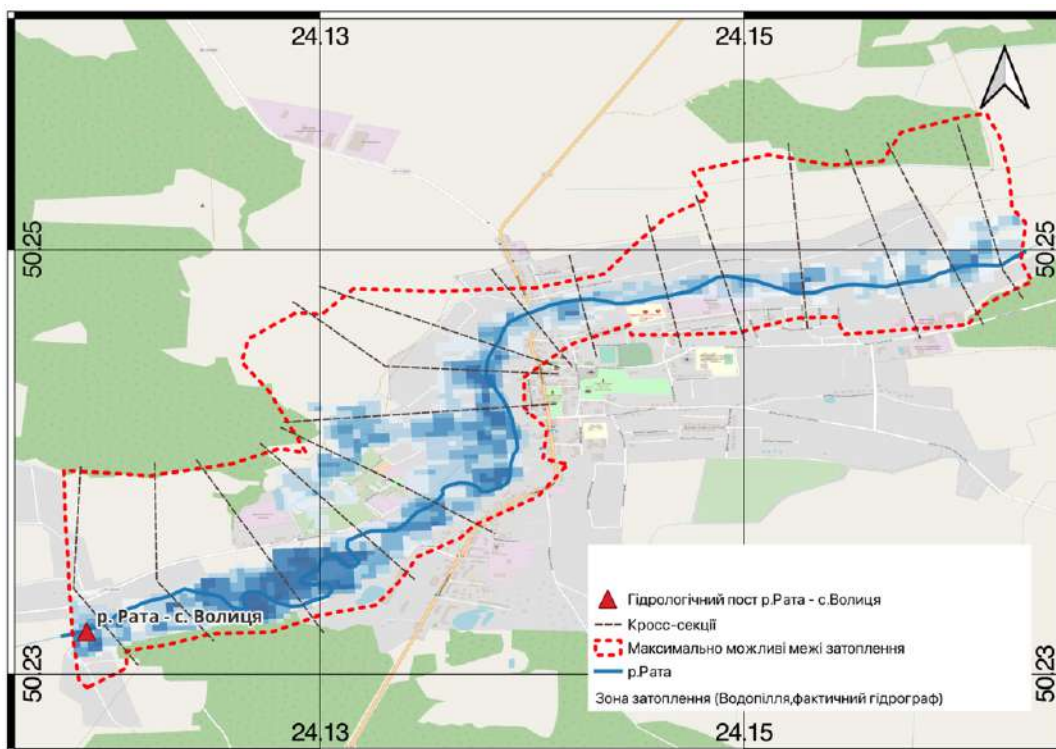


Рисунок 5.13 – Зона затоплення при проходження водопілля в районі гідрологічного поста р. Рата – с. Волиця за фактичним гідрографом (1964 р.)

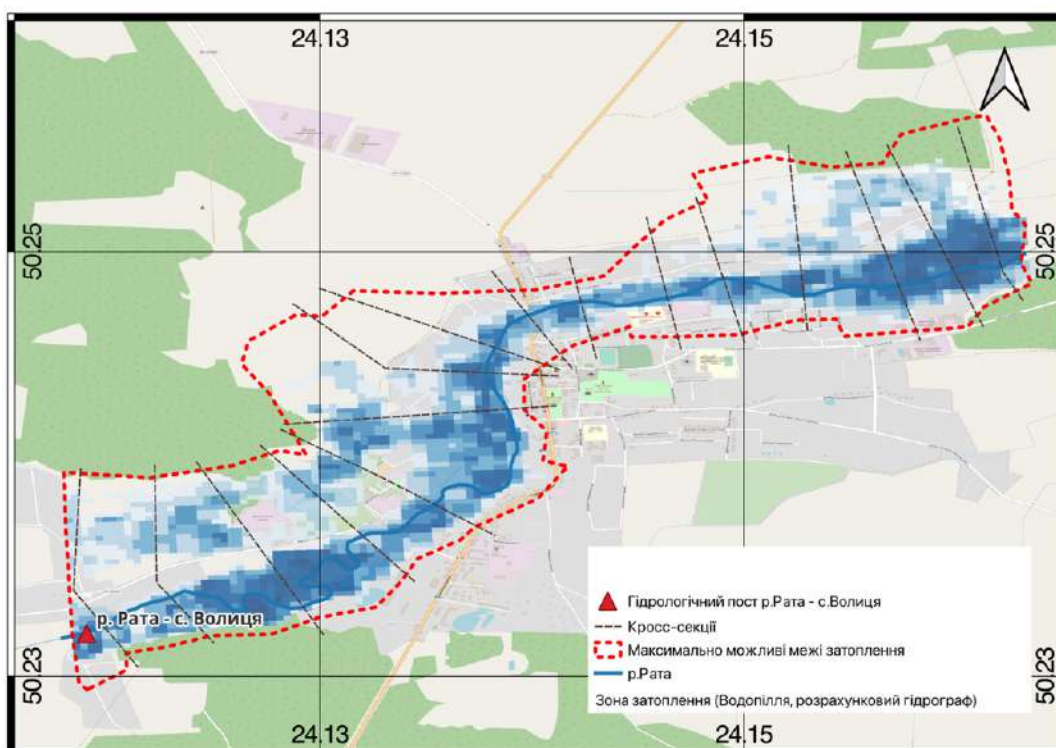


Рисунок 5.14 – Зона затоплення при проходження водопілля в районі гідрологічного поста р. Рата – с. Волиця за розрахунковим гідрографом (1%)

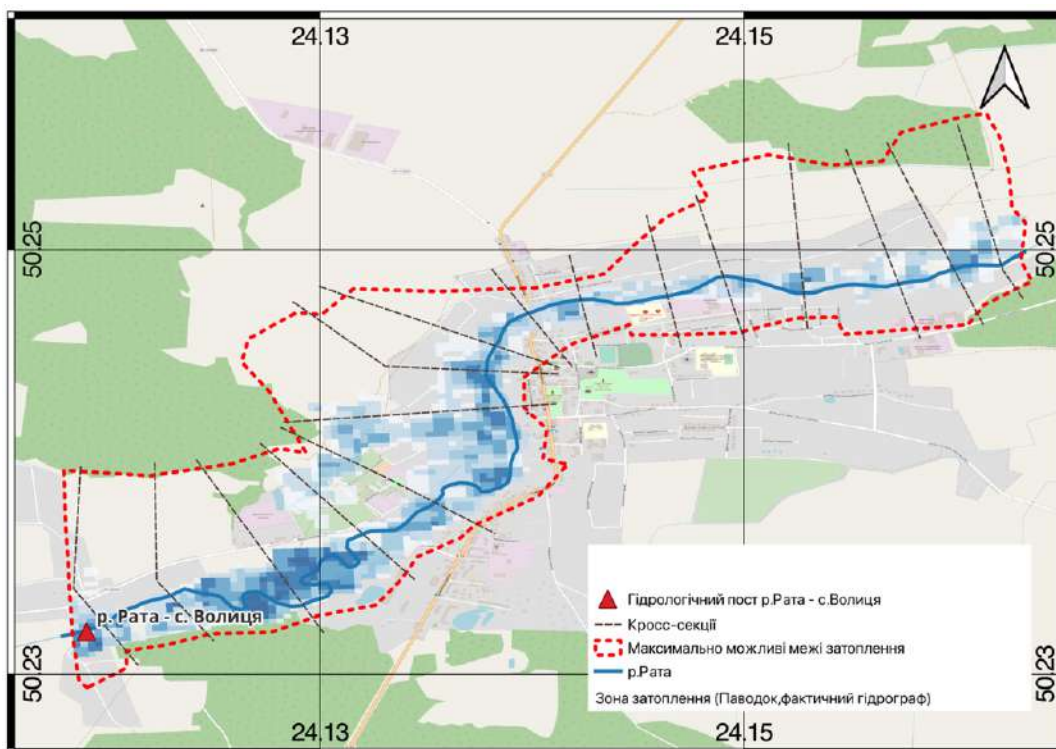


Рисунок 5.15 – Зона затоплення при проходження паводку в районі гідрологічного поста р. Рата – с. Волиця за фактичним гідрографом (1974 р.)

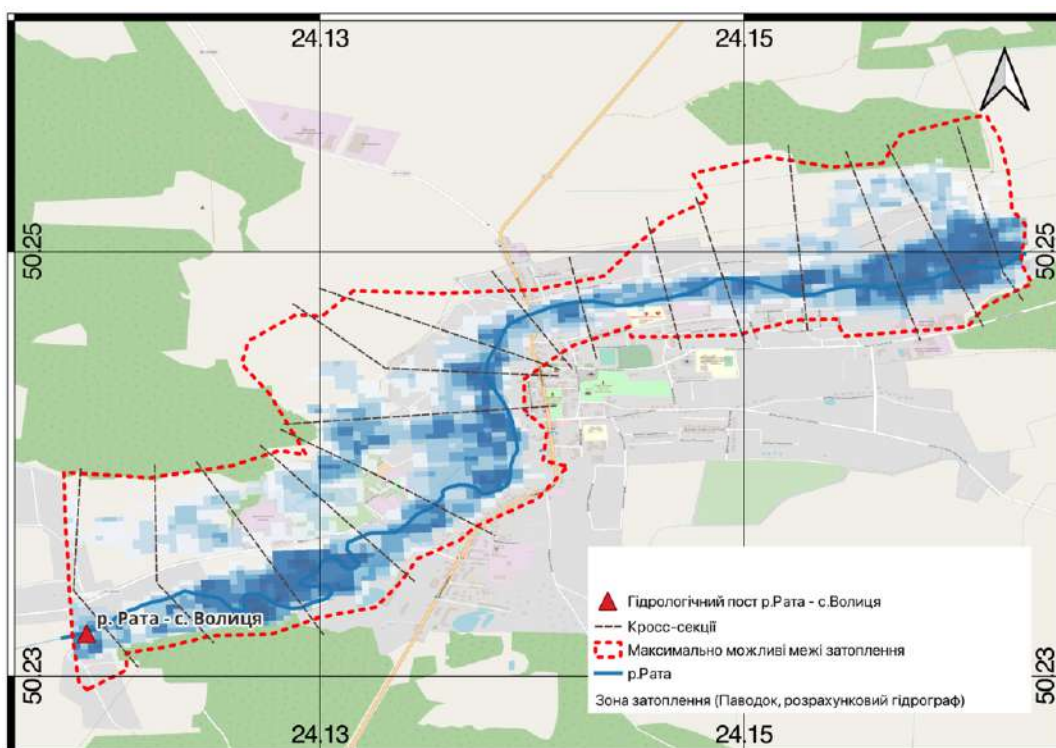


Рисунок 5.16 – Зона затоплення при проходження паводку в районі гідрологічного поста р. Рата – с. Волиця за розрахунковим гідрографом (1%)

Таблиця 5.4 – Порівняння площі зон затоплення р. Рата – м. Волиця

	Площа затоплення F, км ²	
	Весняне водопілля	Дощові паводки
Фактичний гідрограф (3,2-3,8%)/1%	4,05/5,06	3,90/5,85
Розрахунковий гідрограф (Q _{1%})	7,40	6,55

5.5. Оцінка ризиків затоплення

Для оцінки ризиків затоплення була обрана характерна територія ТПЗРЗ без наявності спостережень за стоком – р. Рата – с. Пристань.

Моделювання проводилось за наведеною вище методикою. На рис. 5.17 наведена частина ЦМР рельєфу досліджуваної ділянки з підготованою двовимірною моделлю потоку. Відображений досліджуваний периметр з 7 кросс-секціями, а також мережа розрахункових комірок. Як і у попередньому випадку, відстань між розрахунковими точками склала 5 м, а кількість розрахункових комірок склала близько 600000.

Всі відповідні параметри, такі як коефіцієнти Маннінга, граничні параметри потоку, а також відповідні параметри Unsteady Flow Analysis, а саме інтервал обчислення та інтервал картування обрані такими самими, як у попередньому прикладі.

На рис. 5.18 показаний результат моделювання, оброблена карта зон затоплення, нанесена для кращої візуалізації на ЦМР з відображенням початкового і кінцевого створу.

Для оцінки ризиків затоплення необхідною інформацією крім зон затоплення є характеристика досліджуваної території, зокрема кількість будівель, житлових будинків, культурних пам'яток, промислових об'єктів, сільськогосподарських територій, доріг, мостів. З метою оцінки ризиків затоплення необхідно отримати об'єкти, що потрапили до зони затоплення. З цією метою була оцифрована ділянка с. Пристань.

Як основний інструмент для оцифрування окремих об'єктів на місцевості використовувався плагін SemiAutomatic Classification QGIS. За допомогою плагіну і на основі супутникових знімків був сформований

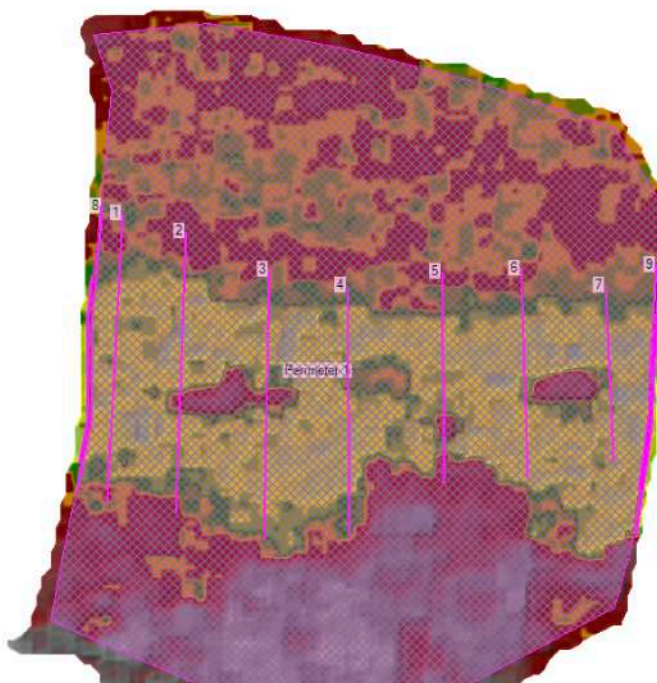


Рисунок 5.17 – Двовимірна модель потоку з урахуванням профілів (р. Рата – с. Пристань)

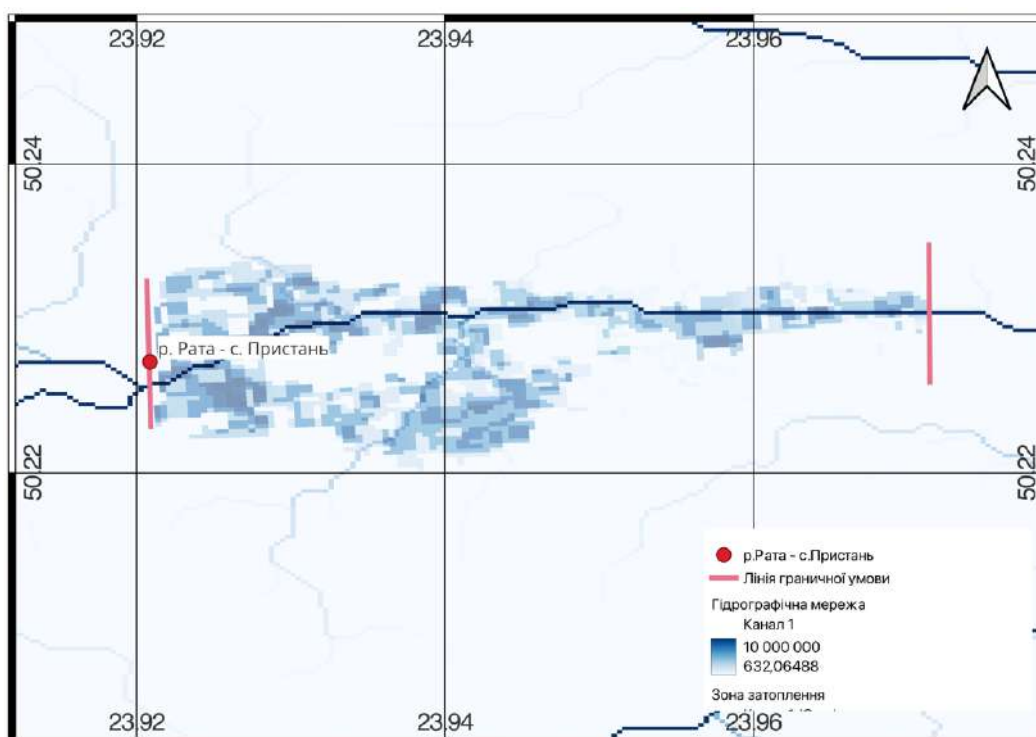


Рисунок 5.18 – Зона затоплення ділянки р. Рата – с. Пристань

набір тренувальних ділянок для подальшої класифікації шляхом виділенням спектральних сигнатур.

Таким чином, скориставшись плагіном SemiAutomatic Classification була проведена напівавтоматична класифікація знімку та визначені будинки та дороги в межах зони затоплення с. Пристань (рис. 5.19).

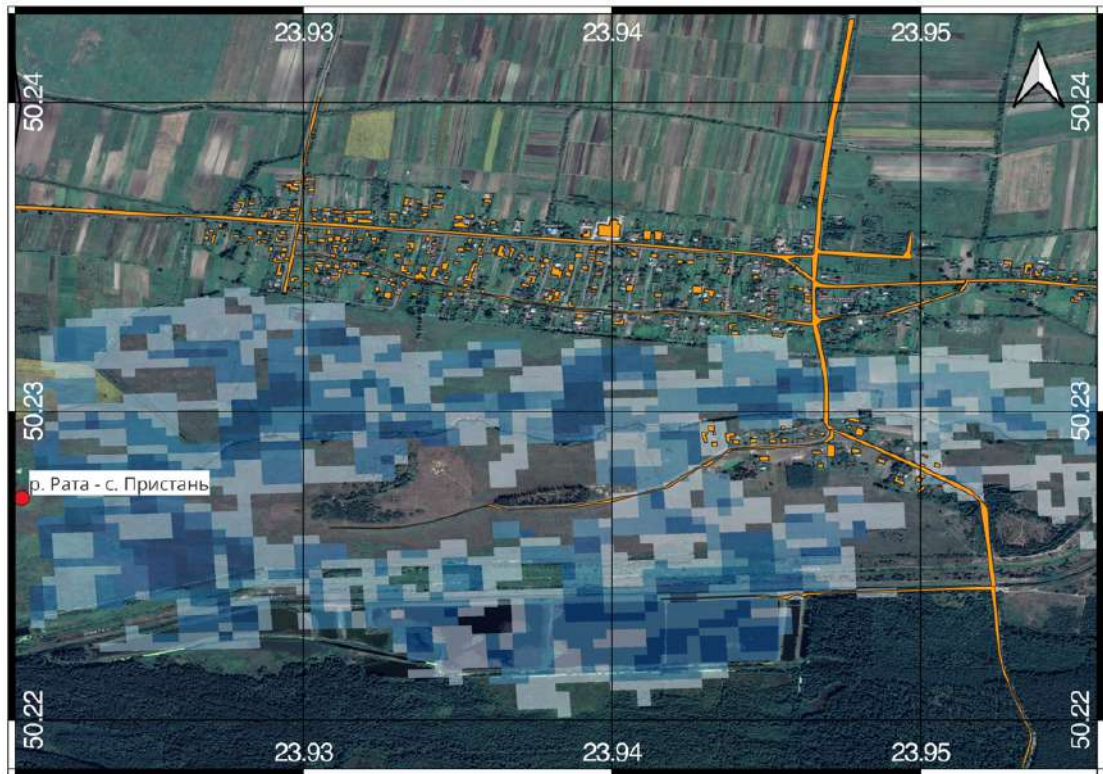


Рисунок 5.19 – Зона затоплення р. Рата - с.Пристань

Аналіз растрового шару зон затоплення показав, що загальна площа затоплення складає 2,21 км². Також в зоні затоплення знаходяться 14 будівель у частині села на правому березі р. Рата, частково затоплений лівий берег р. Рата – 2 будинки, ділянка дороги довжиною 1,2 км.

Найбільшому ризику підлягає південна частина села, на правому березі р. Рата.

Карти зон затоплень побудовані на основі розрахунків характеристик максимального стоку рідкісної імовірності перевищення з забезпеченістю $P = 1\%$, тобто 1 раз на 100 років. Таким чином, згідно з Методикою попередньої

оцінки ризиків затоплення, за критеріями ймовірності виникнення затоплення обрана *середня імовірність* (табл. 5.2).

За отриманими даними про площу затоплення та затоплені об'єкти, за характером значущість наслідків затоплення визначена як *помірно значна* (табл. 5.1).

Отже, величина ризику затоплення класифікується як *помірна* (табл.5.3).

Висновки до розділу 5

1. На основі попереднього аналізу існуючого програмного забезпечення та науково-методичної бази щодо визначення зон затоплення, для побудови відповідних карт зон на території досліджуваного басейну обране програмне забезпечення HEC-RAS, як таке, що широко застосовується в світі при моделюванні поверхневого стоку;
2. При побудові ЦМР використання знімків SRTM 1 Arc-second, що знаходяться у вільному доступі, може призводити до значних похибок, для нівелювання яких застосована гідрологічна підготовка знімків;
3. З метою підвищення точності оцінки ризиків затоплення рекомендовано проводити польові роботи з виконанням топографічної або LiDAR зйомки та промірних робіт;
4. Важливим етапом визначення зон затоплення є проектування розрахункового гідрографу заданої забезпеченості; в роботі використано нормативний метод (СНіП 2.01.14-83), який був удосконалений Є. Д. Гопченко та С. В. Авгайтисом;
5. Для застосування удосконаленої методики обґрунтовані регіональні параметри k_τ та k_S , з використанням даних про характеристики схилового припливу та морфометричні характеристики водозборів річок басейну р. Вісла. Порівняння розрахункових і фактичних гідрографів показало їх добру збіжність у більшості випадків;

6. Обґрунтована методика визначення зон затоплення за відсутності спостережень за стоком в басейні р. Вісла в межах України на базі операторної моделі формування стоку та гідрологічного моделювання з використанням програмного комплексу HEC-RAS;
7. Вперше виконане порівняння площі зон затоплення на основі фактичного та розрахункового гідрографу в басейні р. Вісла в межах України показало, що площі затоплення при проходженні весняного водопілля за фактичним і розрахунковим гідрографом більші, ніж при проходженні дощових паводків;
8. Проведена оцінка ризику затоплення в басейні р. Вісла в межах України на прикладі ТПЗРЗ р. Рата – с. Пристань з визначенням площі зони затоплення та об'єктів, що до неї потрапили, на основі розрахунків максимального стоку рідкісної імовірності перевищення за операторною структурою;
9. Визначена величина ризику затоплення для ТПЗРЗ р. Рата – с. Пристань, який оцінений як помірний. При цьому загальна площа затоплення складає 2,21 км², в зоні затоплення знаходяться 14 будівель у частині села на правому березі р. Рата, частково затоплений лівий берег р. Рата – 2 будинки, ділянка дороги довжиною 1,2 км;
10. Представлена методика може бути використана для інших річок басейну р. Вісла з метою визначення величина ризику затоплення ТПЗРЗ та рекомендується з метою подальшої імплементації Паводкової директиви ЄС в Україні та впровадження плану управління ризиками затоплення на окремих територіях у межах району басейну річки Вісла на 2023-2030 роки.

Перелік використаних джерел до розділу 5

1. Директива 2007/60/ЄС Європейського Парламенту і Ради від 23 жовтня 2007 г. про оцінку і управління ризиками повення (Директива про повеннях) [Електронний ресурс]: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32007L0060>. (Дата звернення: 05.05.2023 р.)
2. Наказ Міністерства внутрішніх справ України 17.01.2018 № 30 Про затвердження Методики попередньої оцінки ризиків затоплення. Зареєстровано в Міністерстві юстиції України 07 лютого 2018 р. за №2 153/31605. Офіційний вісник України від 20.03.2018. 2018 р., № 22, с. 294, стаття 749, код акта 89374/2018.
3. Наказ Міністерства внутрішніх справ України 28.02.2018 № 153 Про затвердження Методики розроблення карт загроз і ризиків затоплення. Зареєстровано в Міністерстві юстиції України 22 березня 2018 р. за №2350/31802. Офіційний вісник України від 20.04.2018. 2018 р., №231, с. 249, стаття 1101, код акта 89811/2018.
4. Постанова Кабінету Міністрів України від 4 квітня 2018 р. № 247 Про затвердження Порядку розроблення плану управління ризиками затоплення. Офіційний вісник України від 24.04.2018. 2018 р., № 32, с. 29, стаття 1116, код акта 89821/2018.
5. Звіт про науково-дослідну роботу № 3/16 «Розроблення критеріїв та попередня оцінка ризиків затоплення територій у межах річкових басейнів відповідно до нормативних документів ЄС». Київ, 2018. 197 с.
6. Про затвердження планів управління ризиками затоплення на окремих територіях у межах районів басейнів річок. Офіційний вебпортал парламенту України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/895-2022-r#Text> (дата звернення: 28.05.2023)
7. Про затвердження Порядку класифікації надзвичайних ситуацій за їх рівнями : Постанова Каб. Міністрів України від 24.03.2004 р. № 368 :

- станом на 31 груд. 2021 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/368-2004-п#Text> (дата звернення: 05.06.2023).
8. Ali H. Ahmed Suliman et al. Comparison of Semi-Distributed, GIS-Based Hydrological Models for the Prediction of Streamflow in a Large Catchment. *Water Resources Management*. 2015. No. 29(9). P. 3095-3110.
 9. Krysanova V, Bronstert A, Müller-Wohlfeil DI. Modelling river discharge for large drainage basins: from lumped to distributed approach. *Hydrol Sci J*. 1999. No. 44(2) P. 313-331.
 10. Teng J, Jakeman AJ, Vaze J et al. Flood inundation modelling: a review of methods, recent advances and uncertainty analysis. *Environ Model Softw*. 2017. No. 90. P. 201-216.
 11. Nkwunonwo UC, Whitworth M, Baily B. A review of the current status of flood modelling for urban flood risk management in the developing countries. *Sci African*. 2020. No. 7. P. 26-29.
 12. Apel H, Aronica GT, Kreibich H, Thielen AH. Flood risk analyses - how detailed do we need to be? *Nat Hazards*. 2009. No. 49. P. 79-98.
 13. Koivumäki L, Alho P, Lotsari E et al. Uncertainties in flood risk mapping: a case study on estimating building damages for a river flood in Finland. *J Flood Risk Manag*. 2010. No. 3. P. 166-183.
 14. O'Donnell EC, Thorne CR. Drivers of future urban flood risk. *Philos Trans A Math Phys Eng Sci*. 2020. No. 378. P. 216-219.
 15. Dawson RJ, Speight L, Hall JW et al. Attribution of flood risk in urban areas. *J Hydroinformatics*. 2008. No. 10. P. 275–288.
 16. Kryżanowski A, Brilly M, Rusjan S, Schnabl S. Review article: structural flood-protection measures referring to several European case studies. *Nat Hazards Earth Syst Sci*. 2014. No 14. P. 135-142.
 17. Леневи́ч О. І., Гречко А. А., Мартинюк М. О. Зелено-голуба інфраструктура малих міст (на прикладі м. Яремче, Українські Карпати). *Охорона довкілля* : зб. наук. статей XVII Всеукраїнських наукових

- Таліївських читань (м. Харків, 21 жовтня 2021 р.). Харків, 2021. С. 107-111.
18. Martyniuk M. O., Hrechko A. A., Lenevych O. I. Sewage treatment plants in small towns of Ukraine. *Socio-ecological resilience across Eurasia – Innovation for sustainability transition : abstracts on the INTENSE Open Science Conference (Tartu/online, 5-6 October, 2021)*. Tartu, 2021. P. 20-21.
19. Jiang Y., Zevenbergen C., Ma Y. Urban pluvial flooding and stormwater management: A contemporary review of China's challenges and "sponge cities" strategy. *Environmental science & policy*. 2018. No 80. P. 132-143.
20. Ковальчук І., Михнович А. Особливості геоінформаційного моделювання катастрофічних паводків у басейні Дністра. *Екологія довкілля та безпека життєдіяльності*. 2001. No 3. С. 24-29.
21. Ковальчук І., Михнович А., Steid I J. Геоінформаційне моделювання гідрогеоморфологічних процесів у долині Верхнього Дністра. *Геоморфологічні дослідження в Україні: минуле, сучасне, майбутнє*. Львів : Видавництво ЛНУ ім. Івана Франка, 2002. С. 223-227.
22. Плиска Л. В. Моделювання паводків з використанням інструментальної ГІС ArcView. *Можливості дистанційного зондування Землі та геоінформаційних технологій у вирішенні проблем Полісся : тези доп. регіон. Народи*. Луцьк, 2002. С. 83-84.
23. Байрак Г. Р. ГІС для візуалізації паводконебезпечних районів із врахуванням морфології та літології річкових долин (на прикладі долин рік Прибескидського Передкарпаття). *Геодезія, картографія і аерофотознімання*. 2013. Вип. 78. С. 43-48.
24. Коломієць П. С., Ківва С.Л., Железняк М.Й. Двовимірна модель мілкої води на неструктурованих сітках. *Математичне та імітаційне моделювання систем МОДС 2008 : тези конференції*. Київ : ІПММС НАНУ, 2008. С 48-51.
25. Бойко В. М., Євдін Є. О., Железняк М. Й., Коломієць П. С., Іщук О. О. Особливості формування весняного стоку Дніпра та моделювання зон

- затоплення у межах м. Києва на основі сучасної гідролого-гідравлічної моделі. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*. 2012. Вип. 1. С. 55-63.
26. Стародуб Ю. П. Створення шейп-файлу в процесі моделювання водозбірних басейнів проекту вивчення небезпек водних надзвичайних ситуацій. *Управління проектами: стан та перспективи* : матеріали X Міжнародної науково-практичної конференції. Миколаїв, 2014. С. 281-283.
27. Стародуб Ю. П., Гавриць А. П. Використання допоміжного програмного забезпечення HEC-GeoRAS та HEC-RAS в проекті підвищення стану безпеки територій. *Управління проектами та розвиток виробництва*. 2015. №1 (53). С. 30-35.
28. Стародуб Ю. П., Гавриць А. П. Ініціювання проектів підвищення стану безпеки територій засобами математичного моделювання повеней. *Вісник Львівського державного університету безпеки життєдіяльності*. 2015. Вип. 11. С. 96-100.
29. O'Donnell EC, Thorne CR. Drivers of future urban flood risk. *Philos Trans A Math Phys Eng Sci*. 2020. No. 378. P. 216-219.
30. Hewlett JD, Hibbert AR. Factors affecting the response of small watersheds to precipitation in humid areas. *Forest hydrol*. 1967. No. 1. P. 275-290.
31. Anselmo V., Galeati G., Palmieri S., Rossi U., Todini E. Flood risk assessment using an integrated hydrological and hydraulic modelling approach: a case study, *Journal of Hydrology*. 1996. Vol. 175, Issues 1-4. P. 533-554.
32. Cunnane C. Review of Statistical Models for Flood Frequency Estimation. *Hydrologic Frequency Modeling*. Dordrecht, 1987. P. 49-95.
33. Makropoulos C, Butler D, Maksimovic C. GIS-supported stormwater source control implementation and urban flood risk mitigation. *Advances in Urban Stormwater and Agricultural Runoff Source Controls*. 2001 P. 95-105
34. Wan S., Radhakrishnan M, Zevenbergen C., Pathirana A. Capturing the changing dynamics between governmental actions across plausible future

- scenarios in urban water systems. *Sustainable Cities and Society*. 2020. Vol. 62.
35. Priscillia S., Schillaci C., Lipani A. Flood susceptibility assessment using artificial neural networks in Indonesia. *Artificial Intelligence in Geosciences*. 2021. Vol. 2. P. 215-222.
36. Khoirunisa N., Ku C. Y., Liu C. Y. A GIS-Based Artificial Neural Network Model for Flood Susceptibility Assessment. *International journal of environmental research and public health*. 2021. No. 18(3).
37. Jajarmizadeh M. et al. A review on theoretical consideration and types of models in hydrology. *Journal of Environmental Science and Technology*. 2012. No. 5(5). P. 249-261.
38. Hydrologic Engineering Center, 1995. RD-41, A Comparison of the One-Dimensional Bridge Hydraulic Routines from: HEC-RAS, HEC-2, and WSPRO, U.S. Army Corps of Engineers, Davis CA., September 1995
39. USGS EarthExplorer corporate website : [сайт]. URL: <https://earthexplorer.usgs.gov> (дата звернення: 24 May 2023).
40. Wang L., Liu H. An efficient method for identifying and filling surface depressions in digital elevation models for hydrologic analysis and modelling. *International Journal of Geographical Information Science*. 2006. Vol. 20, No. 2. P. 193-213.
41. Bildirici IO, Ustun A, Ulugtekin N, Selvi HZ, Abbak RA, Bugdayci I, Dogru AO. SRTM Data In Turkey: Void Filling Strategy And Accuracy Assessment. *The 4th Middle East Spatial Technology (MEST) Conference & Exhibition*. Bahrain, 10-12 December 2007.
42. O'Callaghan J.F., Mark D.M. The extraction of drainage networks from digital elevation data. *Computer Vision, Graphics and Image Processing*. 1984. Vol. 28. P. 323-344.
43. Karwel A. K., Ewiak I. Estimation of the accuracy of the SRTM terrain model on the area of Poland. *The International Archives of the Photogrammetry*,

- Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Beijing, 2008. Vol. XXXVII, Part B7. P. 169-172.
44. Sherman L. K. The relation of hydrographs of runoff to size and character of drainage-basins, *Eos Trans. AGU*. 1932. No 13(1). P. 332-339.
45. Соколовский Д. Л. Речной сток. Ленинград : Гидрометеиздат, 1968. 538 с.
46. Определение расчетных гидрологических характеристик СНиП 2.01.14-83. М.: Госком СССР по делам строительства, 1983. 97 с.
47. Алексеев Г. А. О применении кривой распределения Гудрича к гидрологическим расчетам. *Тр. НИУ ГУГМС*. 1946. Сер. IV, Вып. 29. С. 91-112.
48. Кочерин Д. И. Вопросы инженерной гидрологии. Ленинград : Энергоиздат, 1932. 208 с.
49. Гопченко Є. Д., Авгайтис С. В. До проектування гідрографів паводків і водопіль рівнинних річок України. *Вісник ОДЕКУ*. 2007. Вип. 4. С. 266-273.
50. Martyniuk M. O., Ovcharuk V. A. Identification of areas with potential significant flood risk using specialized software in the Vistula river basin within Ukraine. *Acta Hydrologica Slovaca*. 2023. Vol. 24, No 1. P. 94-100.
51. Ovcharuk V. A., Martyniuk M. O. Determination of inundation zones during floods in the Western Bug sub-basin using HEC-RAS software. *Flood-drought chain disasters and water ecological degradation in a changing environment workshop* (Zhuhai/online, 9-12 December, 2022). Zhuhai, 2022.

ВИСНОВКИ

В результаті виконання дисертаційного дослідження виконана оцінка ризиків затоплення територій в українській частині басейну р. Вісла за даними про характеристики максимального стоку паводків різного генетичного походження рідкісної імовірності перевищення, визначеними за удосконаленою методикою розрахунку максимального стоку. На основі виконаних досліджень можна зробити наступні висновки:

- Аналіз зональних факторів, що впливають на максимальний стік річок басейну Вісли показав, що після 1991 р. відмічене збільшення середньомісячних температур повітря у порівнянні з попереднім періодом, а також більш рівномірний розподіл місячних сум опадів; за прогнозними сценаріями RCP 8.5 та RCP 2.6 моделюється подальше зростання приземної температури повітря та місячних сум опадів. Таке співвідношення основних кліматичних факторів може викликати зменшення водності річок в цілому та її перерозподіл по сезонах; як наслідок можливе підвищення ймовірності виникнення локальних високих паводків у теплу частину року;
- Оцінка впливу інразональних факторів на формування максимального стоку річок досліджуваної території показала, що найбільший вплив на його величини оказує заболоченість водозборів, незначно впливають також карст та залісеність, яка була уточнена за допомогою проведення класифікації супутникових знімків земної поверхні;
- Через недостатність спостережень за річковим стоком, а також зважаючи на нерівномірне розподілення гідрологічних постів саме в басейні р. Вісла в межах України, при розрахунках максимального стоку виникає необхідність застосовувати відповідні методи, що розроблені для використання при відсутності гідрологічних даних;
- Запропонована Є.Д Гопченко операторна модель дозволяє проведення розрахунків максимального стоку як весняних водопіль так і дощових

- паводків, використовуючи єдину наукову-методичну базу, що значно спрощує обґрунтування регіональних розрахункових параметрів;
- Перевірка статистичної однорідності рядів максимального стоку показала, що однорідними є 69% рядів даних весняного водопілля та 84 % рядів даних дощових паводків. Порівняно менша кількість однорідних рядів даних максимального стоку весняного водопілля може бути пояснена впливом кліматичних змін, які більше відображаються саме на величинах максимального стоку весняного водопілля;
 - На базі теоретичного трьох-параметричного гама-розподілу С.Н. Крицького та М.Ф. Менкеля отримані величини максимальних витрат води та шарів стоку ймовірністю перевищення 1 раз на 100 років. На відміну від закордонної практики, наявність окремих вихідних рядів даних дозволяє генетично розподіляти максимальний стік річок на стік весняного водопілля та дощових паводків та визначати розрахункові характеристики для цих фаз водності окремо;
 - Оцінка середньоквадратичних похибок визначення 1%-их квантилів максимального стоку річок басейну р. Вісла в межах України показала, що вони коливаються від $\pm 16,2\%$ (шари стоку весняного водопілля) до $\pm 25,1\%$ (шари стоку дощових паводків); середня точність вихідної інформації становить $\pm 20,5\%$, що відповідає точності вимірювання максимальних витрат води на стаціонарній гідрометеорологічній мережі України;
 - Територіальні узагальнення характеристик максимального стоку та обґрунтування основних параметрів операторної моделі формування максимального стоку річок басейну р. Вісла виконані із застосуванням всієї наявної гідрологічної інформації, а також із залучення даних по басейну р. Прип'ять;
 - В ході виконання роботи побудовані, з використанням програмного забезпечення QGIS, карти просторового розподілу шарів стоку з виключенням впливу заболоченості, карти тривалості схилового

- припливу та модулів схилового припливу рідкісної імовірності перевищення, за якими можна отримати відповідні характеристики у басейні р. Вісла в межах України за відсутності спостережень за стоком;
- Аналізуючи отриманий розподіл максимальних модулів схилового приливу $q'_{1\%}$, слід відмітити, що найбільші величини можна очікувати як для весняних водопіль, так й для дощових паводків у суббасейні Сяну. Високі весняні водопілля також можливі на півночі досліджуваного басейну наряду з окремими локальними дощовими паводками в центральній частині суббасейну Західного Бугу;
 - З метою врахування трансформації максимального схилового припливу у русловий стік, обґрунтовані регіональні формули для визначення трансформаційної функції, окремо для весняних водопіль та дощових паводків на річках досліджуваної території;
 - Ефекти русло-заплавного регулювання в рамках операторної моделі враховуються відповідним параметром ε_F , який добре описується експоненціальною функцією в залежності від площі водозборів річок басейну Вісли, з окремими показниками степеню для весняних водопіль та дощових паводків;
 - Для визначення максимальних модулів стоку рідкої ймовірності перевищення при відсутності спостережень за стоком на досліджуваній території пропонується два варіанти розрахунку – з використанням даних про заболоченість водозборів та окремі розрахунки всіх складових схилового припливу, або спрощений варіант – з визначенням максимального модуля схилового припливу безпосередньо з карти ізоліній;
 - Середня абсолютна похибка розрахунку максимального модуля стоку за наявності даних про заболоченість водозбору для весняного водопілля складає $\pm 8,84\%$, а для дощових паводків $\pm 18,3\%$, що знаходиться на рівні точності вихідної інформації, а отже дозволяє використовувати методику;

- При використанні спрощеної процедури розрахунку, точність визначення максимальних модулів декілька зменшується, але також дозволяє рекомендувати такий варіант розрахунку, наприклад, для попередньої оцінки максимально можливого припливу зі схилів під час проходження визначних весняних водопіль та дощових паводків на річках басейну Вісли в межах України;
- Для гідрологічного моделювання проходження максимального стоку паводків різного генетичного походження на досліджуваній території обране програмне забезпечення HEC-RAS при цьому створена ЦМР басейну р. Вісла в межах України, побудована з використанням SRTM знімків, отримані розрахункові гідрографи, визначені за нормативним методом, вдосконаленим Є.Д. Гопченко та С.В. Авгайтисом;
- Обґрунтована методика визначення зон затоплення за відсутності спостережень за стоком в басейні р. Вісла в межах України на базі операторної моделі формування стоку та гідрологічного моделювання з використанням програмного комплексу HEC-RAS;
- Проведена оцінка ризику затоплення в басейні р. Вісла в межах України на прикладі ТПЗРЗ р. Рата – с. Пристань з визначенням площі зони затоплення та об'єктів, що до неї потрапили, на основі розрахунків максимального стоку рідкісної імовірності перевищення за операторною структурою;
- Визначена величина ризику затоплення для ТПЗРЗ р. Рата – с. Пристань, який оцінений як помірний;
- Представлена методика може бути використана для інших річок басейну р. Вісла з метою визначення величина ризику затоплення ТПЗРЗ та рекомендується з метою подальшої імплементації Паводкової директиви ЄС в Україні та впровадження плану управління ризиками затоплення на окремих територіях у межах району басейну річки Вісла на 2023-2030 роки.

ДОДАТКИ

Додаток А

Таблиця А.1 – Основні гідрографічні характеристики річок басейну
р. Вісли в межах України

Код поста	Річка – пост	F , км ²	L , км	H , м	I ,‰	f_l %	f_b %	f_p %
79720	Вишня - с. Твіржа	562	54	260	1,2	5	6	30
79721	Шкло - м. Яворів	236	20	270	3,7	21	3	70
79723	Західний Буг - смт Сасів	107	14	330	3,6	6	10	40
79726	Західний Буг - м. Кам'янка-Бузька	2350	83	240*	1,0	15	9	40
79735	Західний Буг – м. Сокаль	6250	140	230*	0,5	12	6	-
79736	Золочевка - с. Золочевка	90	18	340	5,3	25	8	-
79397	Західний Буг - с. Литовеж	6740	187*	210*	0,8*	-	-	-
79747	Полтва - м. Буськ	1440	60	260	0,6	12	8	40
79749	стр. Кам'янка - м. Кам'янка-Бузька	141	37	240	1,2	10	9	35
79753	Рата - с. Волиця	1140	57	260*	1,4	17	8	40
79755	Рата - с. Межиріччя	1740	76	240	1,1	21	8	40
79757	Свиня - м. Жовква (м.Нестерів)	98,6	16	270	4,8	9	3	40
79758	Желдець - с. Лугове	246	40	220	0,8	22	14	35
79761	Солокія - м. Червоноград	931	86	240	0,9	11	10	50
79763	Луга - м. Володимир-Волинський	1270	64	220	0,6	10	7	75
79748	Полтва - с. Пельтев	725	40	260*	0,8	11	4	-
79744	Холоївка – х. Бирок	46	12	260	1,0	7	19	-

* - Гідрографічні характеристики річок, визначені за допомогою цифрової моделі рельєфу за даними USGS EarthExplorer [39]

Додаток Б

Таблиця Б.1 – Оцінка однорідності часових рядів максимальних витрат води весняного водопілля річок басейну р. Вісла (рівень значущості $\alpha=5\%$)

№ за/п	Річка - пост	Критерій			Висновок
		Фішера	Стьюдента	Вілкоксона	
1	Вишня - с. Твіржа	однорідні	однорідні	однорідні	однорідні
3	Західний Буг - смт Сасів	неоднорідні	однорідні	однорідні	однорідні
4	Західний Буг - м. Кам'янка-Бузька	однорідні	однорідні	однорідні	однорідні
5	Західний Буг - м. Сокаль	неоднорідні	неоднорідні	неоднорідні	неоднорідні
7	Західний Буг - с. Литовеж	однорідні	однорідні	однорідні	однорідні
8	Полтва - м. Буськ	неоднорідні	неоднорідні	неоднорідні	неоднорідні
10	Рата - с. Волиця	неоднорідні	неоднорідні	неоднорідні	неоднорідні
11	Рата - с. Межиріччя	неоднорідні	неоднорідні	неоднорідні	неоднорідні
12	Свиня - м. Жовква	неоднорідні	неоднорідні	неоднорідні	неоднорідні
13	Желдець - с. Лугове	однорідні	однорідні	однорідні	однорідні
14	р. Солокія - м. Червоноград	неоднорідні	однорідні	однорідні	однорідні
15	Луга - м. Володимир-Волинський	неоднорідні	однорідні	однорідні	однорідні
16	Полтва - с. Пельтев	однорідні	однорідні	однорідні	однорідні

Таблиця Б.2 – Оцінка однорідності часових рядів шарів стоку весняного водопілля річок басейну р. Вісла (рівень значущості $\alpha=5\%$)

№ за/п	Річка - пост	Критерій			Висновок
		Фішера	Стюдента	Вілкоксона	
1	Вишня – с. Твіржа	однорідні	однорідні	однорідні	однорідні
3	Західний Буг - смт Сасів	однорідні	однорідні	однорідні	однорідні
4	Західний Буг - м. Кам'янка-Бузька	однорідні	однорідні	однорідні	однорідні
5	Західний Буг - м. Сокаль	неоднорідні	неоднорідні	неоднорідні	неоднорідні
7	Західний Буг - с. Литовеж	неоднорідні	неоднорідні	однорідні	неоднорідні
8	Полтва - м. Буськ	однорідні	однорідні	однорідні	однорідні
10	Рата - с. Волиця	однорідні	однорідні	однорідні	однорідні
11	Рата - с. Межиріччя	однорідні	однорідні	однорідні	однорідні
12	Свиня - м. Жовква	однорідні	однорідні	однорідні	однорідні
13	Желдець - с. Лугове	неоднорідні	неоднорідні	неоднорідні	неоднорідні
14	Солокія - м. Червоноград	однорідні	однорідні	однорідні	однорідні
15	Луга - м. Володимир-Волинський	однорідні	однорідні	однорідні	однорідні
16	Полтва - с.Пельтев	однорідні	однорідні	однорідні	однорідні

Таблиця Б.3 – Оцінка однорідності часових рядів витрат води дощових паводків річок басейну р. Вісла (рівень значущості $\alpha=5\%$)

№ за/п	Річка - пост	Критерій			Висновок
		Фішера	Стюдента	Вілкоксона	
1	Вишня - с. Твіржа	однорідні	однорідні	однорідні	однорідні
3	Західний Буг - смт Сасів	неоднорідні	однорідні	однорідні	однорідні
4	Західний Буг - м. Кам'янка-Бузька	неоднорідні	однорідні	однорідні	однорідні
5	Західний Буг - м. Сокаль	неоднорідні	однорідні	однорідні	однорідні
7	Західний Буг - с. Литовеж	однорідні	однорідні	однорідні	однорідні
8	Полтва - м. Буськ	однорідні	однорідні	однорідні	однорідні
10	Рата - с. Волиця	неоднорідні	однорідні	однорідні	однорідні
11	Рата - с. Межиріччя	однорідні	однорідні	однорідні	однорідні
12	Свиня - м. Жовква	неоднорідні	неоднорідні	неоднорідні	неоднорідні
13	Желдець - с. Лугове	однорідні	однорідні	однорідні	однорідні
14	Солокія - м. Червоноград	однорідні	однорідні	однорідні	однорідні
15	Луга - м. Володимир-Волинський	неоднорідні	однорідні	однорідні	однорідні
16	Полтва- с. Пельтев	неоднорідні	неоднорідні	неоднорідні	неоднорідні

Таблиця Б.4 – Оцінка однорідності часових рядів шарів стоку дощових паводків річок басейну р. Вісла (рівень значущості $\alpha=5\%$)

№ за/п	Річка - пост	Критерій			Висновок
		Фішера	Стюдента	Вілкоксона	
1	Вишня - с. Твіржа	однорідні	неоднорідні	неоднорідні	неоднорідні
3	Західний Буг - смт Сасів	неоднорідні	однорідні	однорідні	однорідні
4	Західний Буг - м. Кам'янка-Бузька	однорідні	однорідні	однорідні	однорідні
5	Західний Буг - м. Сокаль	неоднорідні	однорідні	однорідні	однорідні
7	Західний Буг - с. Литовеж	однорідні	однорідні	однорідні	однорідні
8	Полтва - м. Буськ	однорідні	однорідні	однорідні	однорідні
10	Рата - с. Волиця	однорідні	однорідні	однорідні	однорідні
11	Рата - с. Межиріччя	однорідні	однорідні	однорідні	однорідні
12	Свиня - м. Жовква	однорідні	однорідні	однорідні	однорідні
13	Желдець - с. Лугове	однорідні	однорідні	однорідні	однорідні
14	Солокія - м. Червоноград	неоднорідні	неоднорідні	неоднорідні	неоднорідні
15	Луга - м. Володимир-Волинський	однорідні	однорідні	однорідні	однорідні
16	Полтва- с. Пельтев	однорідні	однорідні	однорідні	однорідні

Таблиця Б.5 – Статистичні характеристики часових рядів максимальних витрат води весняного водопілля річок басейну р. Вісла

№ за/п	Річка-пост	F , км ²	\bar{Y}_m , мм	Метод моментів			Метод найбільшої правдоподібності	
				C_v	C_s	(R_I)	C_v	C_s/C_v
1	Вишня - с. Твіржа	562	34,8	0,75	0,70	0,295	0,76	1,0
2	Шкло - м. Яворів	236	9,83	0,79	1,13	0,069	0,82	1,8
3	Західний Буг - смт Сасів	107	6,19	1,03	4,36	0,013	1,13	6,0
4	Західний Буг - м. Кам'янка-Бузька	2350	75,3	0,64	0,84	0,211	0,64	1,4
5	Західний Буг - м. Сокаль	6250	153	0,75	1,77	0,545	0,76	3,1
6	Золочевка - с. Золочевка	90,0	2,22	0,85	2,09	-0,348	0,94	7,0
7	Західний Буг - с. Литовеж	6740	115	0,65	0,63	0,046	0,65	1,0
8	Полтва - м. Буськ	1440	41,4	0,61	1,03	0,487	0,61	1,8
9	стр. Кам'янка – м. Кам'янка-Бузька	141	9,08	0,52	0,13	0,355	0,53	0,5
10	Рата - с. Волиця	1140	43,5	0,85	1,32	0,421	0,86	1,7
11	Рата - с. Межиріччя	1740	61,0	0,85	1,15	0,460	0,86	1,5
12	Свиня - м. Жовква (м.Нестерів)	98,6	4,56	0,91	1,22	0,330	0,93	1,4
13	Желдець - с. Лугове	246	13,7	0,79	0,65	0,350	0,80	0,9
14	Солокія - м. Червоноград	931	21,2	0,89	2,23	0,491	0,91	3,1
15	Луга - м. Володимир-Волинський	1270	20,6	1,03	3,10	0,481	1,10	4,1
16	Полтва - с. Пельтев	725	31,1	0,46	0,40	0,471	0,46	1,0
17	Холоевка - х. Бирок	46,0	2,42	0,63	0,76	-0,035	0,64	1,5
$C_s/C_v = 2,0$								

Таблиця Б.6 – Статистичні характеристики часових рядів шарів стоку
весняного водопілля річок басейну р. Вісла

№ за/п	Річка-пост	F, км ²	\bar{Y}_m , мм	Метод моментів			Метод найбільшої правдоподібності	
				Cv	Cs	(R _l)	Cv	Cs/Cv
1	Вишня - с. Твіржа	562	49,0	0,70	0,99	0,357	0,70	1,5
2	Шкло - м. Яворів	236	27,8	0,55	0,84	0,275	0,56	1,8
3	Західний Буг - смт Сасів	107	64,3	0,56	1,04	0,289	0,56	2,0
4	Західний Буг - м. Кам'янка-Бузька	2350	48,9	0,54	1,31	0,221	0,54	2,6
5	Західний Буг - м. Сокаль	6250	44,5	0,77	2,17	0,327	0,81	3,9
6	Золочевка - с. Золочевка	90,0	43,5	0,43	0,67	0,155	0,44	2,1
7	Західний Буг - с. Литовеж	6740	39,1	0,61	1,62	0,090	0,62	3,3
8	Полтва - м. Буськ	1440	44,9	0,53	0,96	0,317	0,53	1,9
9	стр. Кам'янка - м. Кам'янка-Бузька	141	48,2	0,62	0,61	0,294	0,64	1,2
10	Рата - с. Волиця	1140	43,2	0,72	1,35	0,362	0,72	2,1
11	Рата - с. Межиріччя	1740	41,5	0,72	1,56	0,362	0,72	2,5
12	Свиня - м. Жовква (м.Нестерів)	98,6	31,6	0,75	1,26	0,301	0,75	1,8
13	Желдець - с. Лугове	246	37,9	0,77	1,19	0,384	0,78	1,8
14	Солокія - м. Червоноград	931	37,7	0,78	1,53	0,425	0,78	2,3
15	Луга - м. Володимир-Волинський	1270	26,9	0,66	1,15	0,300	0,67	1,9
16	Полтва - с. Пельтев	725	54,0	0,45	0,49	0,354	0,45	1,2
17	Холоевка - х. Бирок	46,0	49,2	0,49	0,20	-0,196	0,50	0,6
$\overline{Cs/Cv} = 1,5$								

Таблиця Б.7 – Статистичні характеристики часових рядів максимальних витрат води дощових паводків річок басейну р. Вісла

№ за /п	Річка-пост	F, км ²	\bar{Q}_m , м ³ /с	Метод моментів			Метод найбільшої правдоподібності		
				C _v	C _s	(R ₁)	C _v	C _s /C _v	
1	Вишня – с. Твіржа	562	28,4	0,82	1,20	0,265	0,82	1,6	
2	Шкло – м. Яворів	236	9,15	0,76	1,58	0,249	0,78	3,1	
3	Західний Буг - смт Сасів	107	5,92	1,16	4,10	-0,089	1,31	4,9	
4	Західний Буг - м. Кам'янка-Бузька	2350	50,5	0,81	1,76	-0,067	0,82	2,5	
5	Західний Буг - м. Сокаль	6250	86,9	0,94	3,34	0,107	1,16	5,7	
6	Золочевка - с. Золочевка	90,0	7,00	0,50	0,21	0,133	0,52	0,8	
7	Західний Буг - с. Литовеж	6740	81,8	0,69	1,48	-0,095	0,70	2,6	
8	Полтва - м. Буськ	1440	29,2	0,69	2,03	0,015	0,70	3,5	
9	стр. Кам'янка - м. Кам'янка-Бузька	141	5,62	0,93	1,40	0,092	1,00	2,4	
10	Рата - с. Волиця	1140	26,2	0,72	1,35	0,071	0,73	2,1	
11	Рата - с. Межиріччя	1740	37,0	0,90	1,94	0,077	0,92	2,6	
12	Свиня - м. Жовква (м.Нестерів)	98,6	3,71	0,80	1,37	0,217	0,81	1,9	
13	Желдець - с. Лугове	246	9,32	1,03	1,65	0,049	1,06	2,1	
14	Солокія - м. Червоноград	931	12,6	0,69	1,70	0,158	0,70	3,0	
15	Луга - м. Володимир-Волинський	1270	9,08	0,61	2,53	0,240	0,64	5,8	
16	Полтва - с. Пельтев	725	19,0	0,85	1,70	-0,164	0,88	3,0	
$C_s/C_v = 3,0$									

Таблиця Б.8 – Статистичні характеристики часових рядів шарів стоку дощових паводків річок басейну р. Вісла

№ за/п	Річка-пост	F , км ²	\bar{Y}_m , мм	Метод моментів			Метод найбільшої правдоподібності	
				C_v	C_s	(R_I)	C_v	C_s/C_v
1	Вишня - с. Твіржа	562	17,3	0,88	1,67	0,268	0,89	2,2
2	Шкло - м. Яворів	236	13,5	0,94	2,02	0,069	0,99	3,5
3	Західний Буг - смт Сасів	107	25,7	0,95	1,52	0,235	0,96	1,8
4	Західний Буг - м. Кам'янка-Бузька	2350	18,6	0,80	1,44	-0,072	0,81	2,0
5	Західний Буг - м. Сокаль	6250	15,5	1,41	3,83	0,056	1,74	4,7
6	Золочевка - с. Золочевка	90	11,6	0,69	0,51	-0,238	0,74	1,0
7	Західний Буг - с. Литовеж	6740	14,0	0,86	1,52	-0,032	0,88	2,1
8	Полтва - м. Буськ	1440	15,8	0,76	1,36	0,019	0,76	2,0
9	стр. Кам'янка - м. Кам'янка-Бузька	141	17,4	1,27	2,42	0,234	1,42	4,1
10	Рата - с. Волиця	1140	12,8	0,75	1,85	0,235	0,75	2,9
11	Рата - с. Межиріччя	1740	13,3	0,81	1,65	0,204	0,82	2,3
12	Свиня – м. Жовква (м.Нестерів)	98,6	9,12	0,92	2,36	0,075	0,96	3,1
13	Желдець – с. Лугове	246	14,1	1,10	2,21	0,065	1,14	2,9
14	Солокія – м. Червоноград	931	11,8	0,92	1,71	0,112	0,94	2,2
15	Луга – м. Володимир-Волинський	1270	9,22	0,84	1,32	-0,006	0,85	1,8
16	Полтва - с.Пельтев	725	12,3	0,88	1,65	-0,245	0,91	2,8
$C_s/C_v = 2,5$								

Додаток В

Таблиця В.1 – Розрахунок коефіцієнтів впливу залісеності і заболоченості на шари стоку рідкісної імовірності перевищення весняного водопілля

№ за/п	Річка – пост	F , км ²	$Y_{1\%}$, мм	f_l , %	f_b , %	$lg(f_l+1)$	$lg(f_b+1)$	K_l	K_b	$Y_{1\%f_b=0}$, мм
1	Вишня - с. Твіржа	562	152	5	6	0,78	0,85	0,77	2,18	69,8
2	Шкло - м. Яворів	236	72,8	21	3	1,34	0,60	0,60	1,84	39,5
3	Західний Буг - смт Сасів	107	168	6	10	0,85	1,04	0,75	2,46	68,5
4	Західний Буг - м. Кам'янка-Бузька	2350	125	15	9	1,20	1,00	0,64	2,40	52,2
5	Західний Буг - м. Сокаль	6250	157	10	6	1,04	0,85	0,69	2,19	71,9
8	Полтва - м. Буськ	1440	113	12	8	1,11	0,95	0,67	2,34	48,5
9	стр. Кам'янка - м. Кам'янка-Бузька	141	140	10	9	1,04	1,00	0,69	2,40	58,2
10	Рата - с. Волиця	1140	138	17	8	1,26	0,95	0,62	2,34	59,0
11	Рата - с. Межиріччя	1740	132	21	8	1,34	0,95	0,60	2,34	56,7
12	Свиня - м. Жовква (м.Нестерів)	98,6	104	9	3	1,00	0,60	0,70	1,84	56,6
13	Желдець - с. Лугове	246	129	22	14	1,36	1,18	0,59	2,65	48,8
14	Солокія - м. Червоноград	931	128	11	10	1,08	1,04	0,68	2,46	52,3
15	Луга - м. Володимир-Волинський	1270	80,8	10	7	1,04	0,90	0,69	2,26	35,7
18	Прип'ять - с. Річиця	2210	137	17	15	1,26	1,20	0,62	2,69	51,2
19	Вижівка - с. Руда	141	135	16	10	1,23	1,04	0,63	2,46	55,1
20	Вижівка – смт Стара Вижівка	722	140	21	9	1,34	1,00	0,60	2,40	58,3
21	Тур'я - с. Ягідне	502	109	18	7	1,28	0,90	0,62	2,26	48,3
22	Стохід - с. Малинівка	692	98,8	8	9	0,95	1,00	0,72	2,40	41,2

Таблиця В.2 – Розрахунок коефіцієнтів впливу залісеності і заболоченості на шари стоку рідкісної імовірності перевищення дощових паводків

№ за/п	Річка – пост	F , км ²	$Y_{1\%}$, мм	f_l , %	$f_{\bar{o}}$, %	$lg(f_l+1)$	$lg(f_{\bar{o}}+1)$	K_l	$K_{\bar{o}}$	$Y_{1\%f_{\bar{o}}=0}$, мм
1	Вишня - с. Твіржа	562	74,0	5	6	0,78	0,85	0,70	1,54	48,1
2	Шкло - м. Яворів	236	63,9	21	3	1,34	0,60	0,49	1,39	46,1
3	Західний Буг - смт Сасів	107	68,7	6	10	0,85	1,04	0,68	1,67	41,2
4	Західний Буг - м. Кам'янка-Бузька	2350	72,8	15	9	1,20	1,00	0,54	1,64	44,4
5	Західний Буг - м. Сокаль	6250	55,1	10	6	1,04	0,85	0,60	1,54	35,8
8	Полтва - м. Буськ	1440	58,4	12	8	1,11	0,95	0,58	1,61	36,2
10	Рата - с. Волиця	1140	46,4	17	8	1,26	0,95	0,52	1,61	28,8
11	Рата - с. Межиріччя	1740	52,8	21	8	1,34	0,95	0,49	1,61	32,8
12	Свиня - м. Жовква (м.Нестерів)	98,6	42,0	9	3	1,00	0,60	0,62	1,39	30,3
13	Желдець - с. Лугове	246	76,9	22	14	1,36	1,18	0,48	1,75	43,8
14	Солокія - м. Червоноград	931	53,0	11	10	1,08	1,04	0,59	1,67	31,8
15	Луга - м. Володимир-Волинський	1270	37,7	10	7	1,04	0,90	0,60	1,58	23,9
18	Прип'ять - с. Річиця	2210	62,6	17	15	1,26	1,20	0,52	1,77	35,4
19	Вижівка - с. Руда	141	62,4	16	10	1,23	1,04	0,53	1,67	37,4
20	Вижівка – смт Стара Вижівка	722	49,1	21	9	1,34	1,00	0,49	1,64	29,9
21	Тур'я - с. Ягідне	502	46,0	18	7	1,28	0,90	0,51	1,58	29,2
22	Стохід -с. Малинівка	692	38,6	8	9	0,95	1,00	0,64	1,64	23,5

Додаток Г

Таблиця Г.1 – Розрахунок коефіцієнтів нерівномірності руслового стоку
весняного водопілля на річках досліджуваної території

№ за/п	Річка-пост	F , км ²	\bar{Q}_m , м ³ /с	\bar{Y}_m , мм	T_n , діб	$(m+1)/m$
1	Вишня - с. Твіржа	562	34,8	49,0	39	4,25
3	Західний Буг – смт Сасів	107	6,19	64,3	38	2,92
4	Західний Буг - м. Кам'янка-Бузька	2350	75,3	49,0	47	2,64
7	Західний Буг - с.Литовеж	6740	115	39,1	49	1,85
8	Полтва - м. Буськ	1440	41,4	44,9	44	2,42
9	стр. Кам'янка - м. Кам'янка-Бузька	141	9,08	48,2	46	5,36
10	Рата - с.Волиця	1140	43,5	43,2	45	3,41
12	Свиня - м. Жовква (м.Нестерів)	98,6	4,56	31,6	38	4,81
13	Желдець - с. Лугове	246	13,7	37,9	42	5,30
14	Солокія - м. Червоноград	931	21,2	37,7	44	2,27
15	Луга - м. Володимир-Волинський	1270	20,6	26,9	44	2,29
18	Прип'ять - с. Річиця	2210	46,3	41,2	54	2,36
19	Вижівка - с. Руда	141	5,64	43,9	40	3,17
20	Вижівка - смт Стара Вижівка	722	32,6	45,4	47	4,00
21	Тур'я - с. Ягідне	502	14,4	32,3	44	3,36
22	Стохід - с. Малинівка	692	17,0	32,5	44	2,87

Таблиця Г.2 – Розрахунок коефіцієнтів нерівномірності руслового стоку дощових паводків на річках досліджуваної території

№ за/п	Річка-пост	F , км ²	\bar{Q}_m , м ³ /с	\bar{Y}_m , мм	T_n , діб	$(m+1)/m$
1	Вишня - с. Твіржа	562	28,4	17,3	11	2,70
3	Західний Буг - смт Сасів	107	5,92	15,4	8	2,37
4	Західний Буг - м. Кам'янка-Бузька	2350	50,5	18,6	15	1,52
7	Західний Буг - с. Литовеж	6740	81,8	14,0	18	1,32
8	Полтва - м. Буськ	1440	29,2	15,8	14	1,58
9	стр. Кам'янка - м. Кам'янка-Бузька	141	5,62	17,4	12	2,33
10	Рата - с.Волиця	1140	26,2	12,8	13	1,95
12	Свиня - м. Жовква (м.Нестерів)	98,6	3,71	9,12	9	3,18
13	Желдець - с. Лугове	246	9,32	14,1	13	2,90
14	Солокія - м. Червоноград	931	12,6	11,8	14	1,40
15	Луга - м. Володимир-Волинський	1270	9,08	9,22	19	1,27
18	Прип'ять - с. Річиця	2210	14,5	15,9	20	0,72
19	Вижівка - с. Руда	141	1,69	13,1	13	1,00
20	Вижівка - смт Стара Вижівка	722	5,29	12,8	16	0,78
21	Тур'я - с. Ягідне	502	6,78	11,7	12	1,15
22	Стохід - с. Малинівка	692	6,19	10,5	13	0,97

Додаток Д

Таблиця Д.1 – Визначення коефіцієнтів тривалості схилового припливу T_0 весняного водопілля на річках басейну р. Вісла в межах України за програмним забезпеченням “Сагуар”

№ за /п	Річка-пост	F , км ²	$\lg(F+1)$	L , км	I , ‰	$Y_{1\%}$ роз, мм	$q_{1\% \phi}$, м ³ /скм ²	t_p , ГОД	T_0 1 наближ, ГОД	V_d , км/ГОД	ϵ_F	T_0 2 наближ, ГОД
1	Вишня - с. Твіржа	562	2,75	54,0	1,2	152	0,22	19,0	769	2,84	0,31	159
3	Західний Буг - смт Сасів	107	2,03	14,0	3,6	168	0,30	4,02	738	3,48	0,42	265
4	Західний Буг - м. Кам'янка-Бузька	2350	3,37	83,0	1,0	125	0,10	26,6	1511	3,12	0,24	253
7	Західний Буг - с. Литовеж	6740	3,83	150	0,5	111	0,05	54,5	2409	2,75	0,20	327
8	Полтва - м. Буськ	1440	3,16	60,0	0,6	113	0,08	24,2	1620	2,48	0,26	331
9	стр. Кам'янка - м. Кам'янка-Бузька	141	2,15	37,0	1,2	140	0,17	15,1	976	2,44	0,40	337
10	Рата - с. Волиця	1140	3,06	57,0	1,4	138	0,15	17,6	1067	3,25	0,27	228
12	Свиня - м. Жовква (м.Нестерів)	98,6	2,00	16,0	4,8	104	0,20	4,19	673	3,82	0,43	252
13	Желдець - с. Лугове	246	2,39	40,0	1,4	129	0,21	14,6	721	2,74	0,36	217
14	Солокія - м. Червоноград	931	2,97	86,0	0,9	128	0,10	31,6	1542	2,72	0,28	337
15	Луга - м. Володимир-Волинський	1270	3,10	64,0	0,6	80,8	0,08	26,2	1123	2,44	0,27	224
18	Прип'ять - с. Річиця	2210	3,34	82,0	0,2	137	0,12	46,4	1202	1,77	0,24	204
19	Вижівка - с. Руда	141	2,15	10,0	1,5	135	0,18	3,79	1027	2,64	0,40	361
20	Вижівка - смт Стара Виживка	722	2,86	44,0	0,7	140	0,22	18,2	729	2,42	0,30	145
21	Тур'я - с. Ягідне	502	2,70	57,0	1,7	109	0,13	18,0	1028	3,17	0,32	250
22	Стохід - с. Малинівка	692	2,84	45,0	0,9	98,8	0,10	17,1	1166	2,63	0,30	265

Таблиця Д.2 – Визначення коефіцієнтів тривалості схилового припливу T_0 дощових паводків на річках басейну р. Вісла в межах України за програмним забезпеченням “Сагуар”

№ за/п	Річка-пост	F , км ²	$lg(F + 1)$	L , км	I , ‰	$Y_{1\%}$ роз, мм	$q_{1\% \phi}$, м ³ /скм ²	t_p , ГОД	T_0 <i>1</i> наближ., ГОД	V_d , км/ГОД	ϵ_F	T_0 <i>2</i> наближ., ГОД
1	Вишня - с. Твіржа	562	2,75	54,0	1,2	74,0	0,21	19,0	260	2,84	0,14	47,0
3	Західний Буг - смт Сасів	107	2,03	14,0	3,6	68,7	0,35	4,02	149	3,48	0,24	51,1
4	Західний Буг - м. Кам'янка-Бузька	2350	3,37	83,0	1,0	72,8	0,09	26,6	723	3,12	0,09	60,0
7	Західний Буг - с. Литовеж	6740	3,83	150	0,5	59,3	0,04	54,5	1209	2,75	0,07	59,1
8	Полтва - м. Буськ	1440	3,16	60,0	0,6	58,4	0,07	24,2	725	2,48	0,11	68,1
9	стр. Кам'янка - м. Кам'янка-Бузька	141	2,15	37,0	1,2	119	0,19	15,1	534	2,44	0,22	98,6
10	Рата - с. Волиця	1140	3,06	57,0	1,4	46,4	0,08	17,6	455	3,25	0,11	55,4
12	Свиня - м. Жовква (м.Нестерів)	98,6	2,00	16,0	4,8	42,0	0,15	4,19	240	3,82	0,24	67,0
13	Желдець - с. Лугове	246	2,39	40,0	1,4	76,8	0,20	14,6	326	2,74	0,18	62,7
14	Солокія - м. Червоноград	931	2,97	86,0	0,9	53,0	0,05	31,6	1000	2,72	0,12	89,6
15	Луга - м. Володимир-Волинський	1270	3,10	64,0	0,6	37,7	0,02	26,2	1514	2,44	0,11	114
18	Прип'ять - с. Річиця	2210	3,34	82,0	0,2	62,6	0,03	46,4	1860	1,77	0,09	107
19	Вижівка - с. Руда	141	2,15	10,0	1,5	62,4	0,04	3,79	1504	2,64	0,22	305
20	Вижівка - смт Стара Вижівка	722	2,86	44,0	0,7	49,1	0,03	18,2	1538	2,42	0,13	138
21	Тур'я - с. Ягідне	502	2,7	57,0	1,7	46,0	0,08	18,0	452	3,17	0,15	66,3
22	Стохід - с. Малинівка	692	2,84	45,0	0,9	38,6	0,03	17,1	1206	2,63	0,13	117

Додаток Е

Таблиця Е.1 – Розрахункові максимальні модулі схилового припливу рідкісної імовірності перевищення весняного водопілля на річках басейну р. Вісла в межах України

№ за/п	Річка-пост	F , км ²	$Y_{1\%}$, мм	T_0 , год	q'_m , м ³ /скм ²
1	Вишня - с. Твіржа	562	152	77	4,1
3	Західний Буг - смт Сасів	107	168	113	3,1
4	Західний Буг - м. Кам'янка-Бузька	2350	125	120	2,2
7	Західний Буг - с. Литовеж	6740	111	120	1,9
8	Полтва - м. Буськ	1440	113	136	1,7
9	стр. Кам'янка - м. Кам'янка-Бузька	141	140	115	2,5
10	Рата - с. Волиця	1140	138	86	3,2
12	Свиня - м. Жовква (м.Нестерів)	98,6	104	89	2,4
13	Желдець - с. Лугове	246	129	75	3,5
14	Солокія - м. Червоноград	931	128	104	2,6
15	Луга - м. Володимир-Волинський	1270	80,8	91	1,8
18	Прип'ять - с. Річиця	2210	137	75	3,8
19	Вижівка - с. Руда	141	135	123	2,3
20	Вижівка - смт Стара Вижівка	722	140	72	4,0
21	Тур'я - с. Ягідне	502	109	89	2,5
22	Стохід - с. Малинівка	692	98,8	104	2,0

Таблиця Е.2 – Розрахункові максимальні модулі схилового припливу рідкісної імовірності перевищення дощових паводків на річках басейну р. Вісла в межах України

№ за/п	Річка-пост	F , км ²	$Y_{1\%}$, мм	T_0 , год	q'_m , м ³ /скм ²
1	Вишня - с. Твіржа	562	74,0	44	1,87
3	Західний Буг - смт Сасів	107	68,7	64	1,19
4	Західний Буг - м. Кам'янка-Бузька	2350	72,8	60	1,34
7	Західний Буг - с. Литовеж	6740	59,3	55	1,20
8	Полтва - м. Буськ	1440	58,4	63	1,03
9	стр. Кам'янка - м. Кам'янка-Бузька	141	119	74	1,78
10	Рата - с. Волиця	1140	46,4	54	0,96
12	Свиня - м. Жовква (м.Нестерів)	98,6	41,9	58	0,80
13	Желдець - с. Лугове	246	76,9	58	1,46

Кінець таблиці Е.2

№ за/п	Річка-пост	F , км ²	$Y_{1\%}$, мм	T_0 , год	q'_m , м ³ /скм ²
14	Солокія - м. Червоноград	931	53,0	69	0,84
15	Луга - м. Володимир-Волинський	1270	37,7	93	0,45
18	Прип'ять - с. Річиця	2210	62,6	108	0,64
19	Вижівка - с. Руда	141	62,4	201	0,34
20	Вижівка - смт Стара Виживка	722	49,1	140	0,39
21	Тур'я - с. Ягідне	502	46,0	92	0,55
22	Стохід - с. Малинівка	692	38,6	103	0,41

Додаток Ж

Таблиця Ж.1 – Визначення редукції максимального модуля стоку весняного водопілля на річках басейну р. Вісла в межах України та окремих водозборах в басейні р. Прип'ять

№ за/п	Річка-пост	q'_m м ³ /скм ²	$q_{1\%}$ м ³ /скм ²	$\frac{q_{1\%}}{q'_m}$	$lg\left(\frac{q_{1\%}}{q'_m}\right)$
1	Вишня - с. Твіржа	4,1	0,22	0,05	-1,27
3	Західний Буг - смт Сасів	3,1	0,30	0,10	-1,01
4	Західний Буг - м. Кам'янка-Бузька	2,2	0,10	0,05	-1,35
7	Західний Буг - с. Литовеж	1,9	0,05	0,03	-1,56
8	Полтва - м. Буськ	1,7	0,08	0,05	-1,31
9	стр. Кам'янка - м. Кам'янка-Бузька	2,5	0,17	0,07	-1,17
10	Рата - с. Волиця	3,2	0,15	0,05	-1,33
12	Свиня - м. Жовква (м.Нестерів)	2,4	0,20	0,08	-1,09
13	Желдець - с. Лугове	3,5	0,21	0,06	-1,23
14	Солокія - м. Червоноград	2,6	0,10	0,04	-1,43
15	Луга - м. Володимир-Волинський	1,8	0,08	0,04	-1,35
18	Прип'ять - с. Річиця	3,8	0,12	0,03	-1,49
19	Вижівка - с. Руда	2,3	0,18	0,08	-1,10
20	Вижівка - смт Стара Вижівка	4,0	0,22	0,05	-1,27
21	Тур'я - с. Ягідне	2,5	0,13	0,05	-1,31
22	Стохід - с. Малинівка	2,0	0,10	0,05	-1,29

Таблиця Ж.2 – Визначення редукції максимального модуля стоку дощових паводків на річках басейну р. Вісла в межах України та окремих водозборах в басейні р. Прип'ять

№ за/п	Річка-пост	q'_m м ³ /скм ²	$q_{1\%}$ м ³ /скм ²	$\frac{q_{1\%}}{q'_m}$	$lg\left(\frac{q_{1\%}}{q'_m}\right)$
1	Вишня - с. Твіржа	1,87	0,20	0,11	-0,96
3	Західний Буг - смт Сасів	1,19	0,35	0,29	-0,53
4	Західний Буг - м. Кам'янка-Бузька	1,34	0,09	0,07	-1,19
7	Західний Буг - с. Литовеж	1,20	0,04	0,04	-1,45
8	Полтва - м. Буськ	1,03	0,07	0,07	-1,17
9	стр. Кам'янка - м. Кам'янка-Бузька	1,78	0,19	0,11	-0,96
10	Рата - с. Волиця	0,96	0,08	0,09	-1,06
12	Свиня - м. Жовква (м.Нестерів)	0,80	0,15	0,19	-0,72
13	Желдець - с. Лугове	1,46	0,20	0,13	-0,87
14	Солокія - м. Червоноград	0,84	0,05	0,06	-1,25
15	Луга - м. Володимир-Волинський	0,45	0,02	0,05	-1,29
18	Прип'ять - с. Річиця	0,64	0,03	0,05	-1,33
19	Вижівка - с. Руда	0,34	0,04	0,12	-0,91
20	Вижівка - смт Стара Вижівка	0,39	0,03	0,08	-1,11
21	Тур'я - с. Ягідне	0,55	0,08	0,15	-0,82
22	Стохід - с. Малинівка	0,41	0,03	0,07	-1,13

Додаток И

Таблиця И.1 – Розрахунок коефіцієнту русло-заплавного регулювання ε_F весняного водопілля в басейні р. Вісла в межах України та окремих водозборах в басейні р. Прип'ять

№ за/п	Річка-пост	F , км ²	q'_m , м ³ /скм ²	$Y_{1\%}$, мм	$\psi(t_p / T_0)$	ε_F розрах
1	Вишня - с. Твіржа	562	4,1	152	0,47	0,12
3	Західний Буг - смт Сасів	107	3,1	168	0,57	0,21
4	Західний Буг - м. Кам'янка-Бузька	2350	2,2	125	0,39	0,08
7	Західний Буг - с. Литовеж	6740	1,9	111	0,34	0,05
8	Полтва - м. Буськ	1440	1,7	113	0,42	0,09
9	стр. Кам'янка - м. Кам'янка-Бузька	141	2,5	140	0,55	0,20
10	Рата - с. Волиця	1140	3,2	138	0,43	0,10
12	Свиня - м. Жовква (м.Нестерів)	98,6	2,4	104	0,57	0,22
13	Желдець - с. Лугове	246	3,5	129	0,51	0,16
14	Солокія - м. Червоноград	931	2,6	128	0,44	0,11
15	Луга - м. Володимир-Волинський	1270	1,8	80,8	0,42	0,10
18	Прип'ять - с. Річиця	2210	3,8	137	0,39	0,08
19	Вижівка - с. Руда	141	2,3	135	0,55	0,20
20	Вижівка - смт Стара Вижівка	722	4,0	140	0,45	0,11
21	Тур'я - с. Ягідне	502	2,5	109	0,47	0,13
22	Стохід - с. Малинівка	692	2,0	98,8	0,45	0,12

Таблиця И.2 – Розрахунок коефіцієнту русло-заплавного регулювання ε_F дощових паводків в басейні р. Вісла в межах України та окремих водозборах в басейні р. Прип'ять

№ за/п	Річка-пост	F , км ²	q'_m , м ³ /скм ²	$Y1\%$, мм	$\psi(t_p / T_0)$	ε_F розрах
1	Вишня - с. Твіржа	562	1,87	74,0	0,43	0,21
3	Західний Буг - смт Сасів	107	1,19	68,7	0,54	0,31
4	Західний Буг - м. Кам'янка-Бузька	2350	1,34	72,8	0,36	0,15
7	Західний Буг - с. Литовеж	6740	1,20	59,3	0,31	0,11
8	Полтва - м. Буськ	1440	1,03	58,4	0,38	0,17
9	стр. Кам'янка - м. Кам'янка-Бузька	141	1,78	119	0,52	0,29
10	Рата - с. Волиця	1140	0,96	46,4	0,39	0,18
12	Свиня - м. Жовква (м.Нестерів)	98,6	0,80	41,9	0,54	0,32
13	Желдець - с. Лугове	246	1,46	76,9	0,48	0,26
14	Солокія - м. Червоноград	931	0,84	53,0	0,40	0,18
15	Луга - м. Володимир-Волинський	1270	0,45	37,7	0,39	0,17
18	Прип'ять - с. Річиця	2210	0,64	62,6	0,36	0,15
19	Вижівка - с. Руда	141	0,34	62,4	0,52	0,29
20	Вижівка - смт Стара Вижівка	722	0,39	49,1	0,42	0,20
21	Тур'я - с. Ягідне	502	0,55	46,0	0,44	0,21
22	Стохід - с. Малинівка	692	0,41	38,6	0,42	0,20

Додаток К

Таблиця К.1 – Перевірочні розрахунки максимального модуля стоку річок під час весняного водопілля в басейні р. Вісла в межах України та окремих водозборах басейну р. Прип'ять при наявності інформації щодо заболоченості водозбору

№ за/п	Річка - пост	F , км ²	$lg(F+1)$	$lg(f_0+1)$	K_0	$Y_{1\%f_0=0}$ карт мм	$Y_{1\%}$ роз, мм	T_0 карт, ГОД	$\psi(t_p / T_0)$	ε_F	$q'_{1\%роз}$, М ³ /СКМ ²	$q_{1\%ф}$, М ³ /СКМ ²	$q_{1\%роз}$, М ³ /СКМ ²	$ \Delta $, %
1	Вишня - с. Твіржа	562	2,75	0,85	2,18	68	148	160	0,43	0,29	1,91	0,22	0,24	8,66
3	Західний Буг - смт Сасів	107	2,03	1,04	2,46	60	147	270	0,59	0,40	1,13	0,30	0,27	11,1
4	Західний Буг - м. Кам'янка-Бузька	2350	3,37	1,00	2,40	50	120	260	0,44	0,22	0,95	0,10	0,09	6,99
7	Західний Буг - с. Литовеж	6740	3,83	1,00	2,40	50	120	320	0,40	0,18	0,77	0,05	0,05	9,93
8	Полтва - м. Буськ	1440	3,16	0,95	2,34	50	117	320	0,47	0,24	0,76	0,08	0,09	7,27
9	стр. Кам'янка - м. Кам'янка-Бузька	141	2,15	1,00	2,40	64	154	320	0,51	0,38	0,99	0,17	0,19	13,0
10	Рата - с. Волиця	1140	3,06	0,95	2,34	55	128	240	0,47	0,25	1,10	0,15	0,13	12,1
12	Свиня - м. Жовква (м.Нестерів)	98,6	2,00	0,60	1,84	59	109	250	0,58	0,41	0,90	0,20	0,21	7,06
13	Желдець - с. Лугове	246	2,39	1,18	2,65	50	132	220	0,48	0,34	1,24	0,21	0,20	3,10
14	Солокія - м. Червоноград	931	2,97	1,04	2,46	50	123	320	0,45	0,26	0,79	0,10	0,09	6,57

Кінець таблиці К.1

№ за/п	Річка - пост	F , км ²	$lg(F+1)$	$lg(f_{\bar{\sigma}}+1)$	$K_{\bar{\sigma}}$	$Y_{1\%f_{\bar{\sigma}}=0}$ карт ММ	$Y_{1\%}$ роз, ММ	T_0 карт, ГОД	$\psi(t_p / T_0)$	ε_F	$q_{1\% роз}$, М ³ /СКМ ²	$q_{1\% ф}$, М ³ /СКМ ²	$q_{1\% роз, 2}$, М ³ /СКМ ²	$ \Delta $, %
15	Луга - м. Володимир-Волинський	1270	3,10	0,90	2,26	40	90,6	240	0,43	0,25	0,78	0,08	0,08	5,80
18	Прип'ять - с. Річиця	2210	3,34	1,20	2,69	50	134	200	0,37	0,22	1,38	0,12	0,11	6,07
19	Вижівка - с. Руда	141	2,15	1,04	2,46	50	123	350	0,61	0,38	0,73	0,18	0,17	6,24
19	Вижівка - с. Руда	722	2,86	1,00	2,40	60	144	140	0,43	0,28	2,13	0,22	0,25	12,9
20	Вижівка - смт Стара Вижівка	502	2,70	0,90	2,26	55	125	250	0,48	0,30	1,03	0,13	0,15	12,0
21	Тур'я - с. Ягідне	692	2,84	1,00	2,40	44	106	260	0,48	0,28	0,84	0,10	0,11	12,8
$\overline{\Delta q_{1\%}} \pm 8,84\%$														

Таблиця К.2 – Перевірочні розрахунки максимального модуля стоку річок під час дощових паводків в басейні р. Вісла в межах України та окремих водозборах басейну р. Прип'ять при наявності інформації щодо заболоченості водозбору

№ за/п	Річка - пост	F, км ²	$lg(F+1)$	$lg(f_{\bar{\sigma}}+1)$	$K_{\bar{\sigma}}$	$Y_{1\%f_{\bar{\sigma}}=0}$ карт мм	$Y_{1\%}$ роз, мм	T_0 карт, ГОД	$\psi(t_p / T_0)$	ϵ_F	$q^{1\% роз},$ м ³ /скм ²	$q^{1\% ф},$ м ³ /скм ²	$q^{1\% роз},$ м ³ /скм ²	$ \Delta ,$ %
1	Вишня - с. Твіржа	562	2,75	0,85	1,54	46	70,9	50	0,54	0,17	1,57	0,20	0,15	29,0
3	Західний Буг - смт Сасів	107	2,03	1,04	1,67	40	66,7	60	0,74	0,27	1,23	0,35	0,25	28,5
4	Західний Буг - м. Кам'янка-Бузька	2350	3,37	1,00	1,64	39	64,0	65	0,53	0,12	1,09	0,09	0,07	23,8
7	Західний Буг - с. Литовеж	6740	3,83	1,00	1,64	22	58,1	60	0,38	0,09	1,07	0,04	0,04	17,6
8	Полтва - м. Буськ	1440	3,16	0,95	1,61	33	53,2	69	0,55	0,13	0,85	0,07	0,06	11,7
9	стр. Кам'янка - м. Кам'янка-Бузька	141	2,15	1,00	1,64	47	77,1	90	0,65	0,25	0,94	0,19	0,15	20,1
10	Рата - с. Волиця	1140	3,06	0,95	1,61	31	49,8	60	0,58	0,14	0,92	0,08	0,08	10,3
12	Свиня - м. Жовква (м.Нестерів)	98,6	2,00	0,60	1,39	33	45,7	64	0,75	0,28	0,79	0,15	0,16	9,47
13	Желдець - с. Лугове	246	2,39	1,18	1,75	42	73,6	68	0,62	0,22	1,20	0,20	0,16	17,4
14	Солокія - м. Червоноград	931	2,97	1,04	1,67	30	50,0	80	0,53	0,15	0,69	0,05	0,05	16,2

Кінець таблиці К.2

№ за/п	Річка - пост	F, км ²	$lg(F+1)$	$lg(f_0+1)$	K_0	$Y_{1\%f_0=0}$ карт мм	$Y_{1\%}$ роз, мм	T_0 карт, ГОД	$\psi(t_p / T_0)$	ϵ_F	$q_{1\% роз},$ М ³ /СКМ ²	$q_{1\% ф},$ М ³ /СКМ ²	$q_{1\% роз},$ М ³ /СКМ ²	$ \Delta ,$ %
15	Луґа - м. Володимир- Волинський	1270	3,10	0,90	1,58	20	31,6	110	0,61	0,14	0,32	0,02	0,03	13,7
18	Прип'ять - с. Річиця	2210	3,34	1,20	1,77	33	58,4	105	0,52	0,12	0,61	0,03	0,04	25,0
20	Вижівка - смт Стара Вижівка	722	2,86	1,00	1,64	25	41,0	135	0,68	0,16	0,34	0,03	0,04	21,4
21	Тур'я - с.Ягідне	502	2,70	0,90	1,58	33	52,1	65	0,59	0,18	0,88	0,08	0,09	8,75
22	Стохід - с.Малинівка	692	2,84	1,00	1,64	22	36,1	115	0,67	0,16	0,35	0,03	0,04	22,3
													$\overline{\Delta q_{1\%}} \pm 18,3\%$	

Додаток Л

Таблиця Л.1 – Перевірочні розрахунки максимального модуля стоку річок під час весняного водопілля в басейні р. Вісла в межах України та окремих водозборах басейну р. Прип'ять при відсутності інформації щодо заболоченості водозбору

№ за/п	Річка - пост	F , км ²	$lg(F + 1)$	L , км	I , ‰	V_d , км/ГОД	t_p , ГОД	T_0 карт, ГОД	$\psi(t_p / T_0)$	ϵ_F	$q'_{1\%}$ карт, м ³ /СКМ ²	$q_{1\% \phi}$, м ³ /СКМ ²	$q_{1\% роз}$, м ³ /СКМ ²	$ \Delta $, %
1	Вишня - с. Твіржа	562	2,75	54,0	1,2	2,84	19,0	160	0,43	0,29	1,9	0,22	0,24	7,71
3	Західний Буг – смт Сасів	107	2,03	14,0	3,6	3,48	4,02	270	0,59	0,40	1,3	0,30	0,31	2,39
4	Західний Буг - м. Кам'янка-Бузька	2350	3,37	83,0	1,0	3,12	26,6	260	0,44	0,22	1,0	0,10	0,10	3,48
7	Західний Буг - с. Литовеж	6740	3,83	150	0,5	2,75	54,5	320	0,40	0,18	0,8	0,05	0,06	14,3
8	Полтва - м. Буськ	1440	3,16	60,0	0,6	2,48	24,2	320	0,47	0,24	0,8	0,08	0,09	13,5
9	стр. Кам'янка - м. Кам'янка-Бузька	141	2,15	37,0	1,2	2,44	15,1	320	0,51	0,38	1,0	0,17	0,19	13,9
10	Рата - с. Волиця	1140	3,06	57,0	1,4	3,25	17,6	240	0,47	0,25	1,2	0,15	0,14	5,01
12	Свиня - м. Жовква (м.Нестерів)	98,6	2,00	16,0	4,8	3,82	4,19	250	0,58	0,41	0,9	0,20	0,21	6,20
13	Желдець - с. Лугове	246	2,39	40,0	1,4	2,74	14,6	220	0,48	0,34	1,2	0,21	0,20	6,55
14	Солокія - м. Червоноград	931	2,97	86,0	0,9	2,72	31,6	320	0,45	0,26	0,8	0,10	0,09	11,3

Кінець таблиці Л.1

№ за/п	Річка - пост	F , км ²	$lg(F + I)$	L , км	I , ‰	V_d , км/ГОД	t_p , ГОД	T_0 карт, ГОД	$\psi(t_p / T_0)$	ε_F	$q'_{1\%}$ карт, м ³ /СКМ ²	$q_{1\% \phi}$, м ³ /СКМ ²	$q_{1\% роз}$, м ³ /СКМ ²	$ \Delta $, %
15	Луґа - м. Володимир-Волинський	1270	3,10	64,0	0,6	2,44	26,2	240	0,43	0,25	0,8	0,08	0,09	6,37
18	Прип'ять - с. Річиця	2210	3,34	82,0	0,2	1,77	46,4	200	0,37	0,22	1,3	0,12	0,11	11,0
19	Вижівка - с. Руда	141	2,15	10,0	1,5	2,64	3,79	350	0,61	0,38	0,9	0,18	0,20	9,36
20	Вижівка - смт Стара Вижівка	722	2,86	44,0	0,7	2,42	18,2	140	0,43	0,28	1,7	0,22	0,20	8,22
21	Тур'я - с. Ягідне	502	2,70	57,0	1,7	3,17	18,0	250	0,48	0,30	1,0	0,13	0,14	9,48
22	Стохід - с. Малинівка	692	2,84	45,0	0,9	2,63	17,1	260	0,48	0,28	0,9	0,10	0,11	15,0
$\Delta q_{1\%} \pm 9,00\%$														

Таблиця Л.2 – Перевірочні розрахунки максимального модуля стоку річок під час дощових паводків в басейні р. Вісла в межах України та окремих водозборах басейну р. Прип'ять при відсутності інформації щодо заболоченості водозбору

№ за/п	Річка - пост	F , км ²	$lg(F + I)$	L , км	I , ‰	V_d , км/ГОД	t_p , ГОД	T_0 карт, ГОД	$\psi(t_p / T_0)$	ε_F	$q'_{1\%}$ карт, м ³ /СКМ ²	$q_{1\% \phi}$, м ³ /СКМ ²	$q_{1\% роз}$, м ³ /СКМ ²	$ \Delta $, %
1	Вишня - с. Твіржа	562	2,75	54,0	1,2	2,84	19,0	50	0,54	0,17	1,7	0,20	0,16	21,1
3	Західний Буг - смт Сасів	107	2,03	14,0	3,6	3,48	4,02	60	0,74	0,27	1,4	0,35	0,28	18,9

Кінець таблиці Л.2

№ за/п	Річка - пост	F , км ²	$lg(F + I)$	L , км	I , ‰	V_{∂} , км/ГОД	t_p , ГОД	T_0 карт, ГОД	$\psi(t_p / T_0)$	ϵ_F	$q'_{1\%}$ карт, М ³ /СКМ ²	$q_{1\% \phi}$, М ³ /СКМ ²	$q_{1\% \rho z}$, М ³ /СКМ ²	$ \Delta $, %
4	Західний Буг - м. Кам'янка-Бузька	2350	3,37	83,0	1,0	3,12	26,6	65	0,53	0,12	1,3	0,09	0,08	11,9
7	Західний Буг - с. Литовеж	6740	3,83	150	0,5	2,75	54,5	60	0,38	0,09	1,05	0,04	0,03	13,8
8	Полтва - м. Буськ	1440	3,16	60,0	0,6	2,48	24,2	69	0,55	0,13	1	0,07	0,07	4,40
9	стр. Кам'янка - м. Кам'янка-Бузька	141	2,15	37,0	1,2	2,44	15,1	90	0,65	0,25	1,3	0,19	0,21	12,3
10	Рата - с. Волиця	1140	3,06	57,0	1,4	3,25	17,6	60	0,58	0,14	0,9	0,08	0,07	8,00
12	Свиня - м. Жовква (м.Нестерів)	98,6	2,00	16,0	4,8	3,82	4,19	64	0,75	0,28	0,8	0,15	0,17	10,8
13	Желдець - с. Лугове	246	2,39	40,0	1,4	2,74	14,6	68	0,62	0,22	1,3	0,20	0,17	12,7
14	Солокія - м. Червоноград	931	2,97	86,0	0,9	2,72	31,6	80	0,53	0,15	0,7	0,05	0,06	11,6
15	Луга - м. Володимир-Волинський	1270	3,10	64,0	0,6	2,44	26,2	110	0,61	0,14	0,3	0,02	0,02	24,9
18	Прип'ять - с. Річиця	2210	3,34	82,0	0,2	1,77	46,4	105	0,52	0,12	0,6	0,03	0,04	21,1
20	Вижівка - смт Стара Вижівка	722	2,86	44,0	0,7	2,42	18,2	135	0,68	0,16	0,4	0,03	0,04	44,7
21	Тур'я - с. Ягідне	502	2,70	57,0	1,7	3,17	18,0	65	0,59	0,18	0,5	0,08	0,05	34,9
22	Стохід - с. Малинівка	692	2,84	45,0	0,9	2,63	17,1	115	0,67	0,16	0,35	0,03	0,04	26,0
													$\overline{\Delta q_{1\%}} \pm 18,5\%$	

