



ДОВГОСТРОКОВЕ ПРОГНОЗУВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ВЕСНЯНОГО ВОДОПІЛЛЯ В БАСЕЙНІ Р. ПІВДЕННИЙ БУГ

Ж.Р. ШАКІРЗАНОВА, А.О. ДОКУС

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ЕКОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Ж.Р. ШАКІРЗАНОВА, А.О. ДОКУС

**ДОВГОСТРОКОВЕ ПРОГНОЗУВАННЯ
ХАРАКТЕРИСТИК ВЕСНЯНОГО ВОДОПІЛЛЯ
В БАСЕЙНІ Р.ПІВДЕННИЙ БУГ**

Монографія

Одеса
ФОП Бондаренко М.О.
2021

УДК 556.166.06

III 12

Рекомендовано до друку рішенням вченої ради Одеського державного екологічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол №6 від 30.06.2021 р.)

Р е ц е н з е н т и :

д-р геогр. наук, проф. **Гребінь В.В.**; д-р геогр. наук, проф. **Ющенко Ю.С.**;

канд. геогр. наук **Христюк Б.Ф.**

Шакірзанова Ж. Р.

III 12 Довгострокове прогнозування характеристик весняного водопілля в басейні р. Південний Буг: монографія. / Шакірзанова Ж. Р., Докус А. О. – Одеса: Бондаренко М. О., 2021. – 244 с.

ISBN 978-617-8005-42-9

В монографії вирішено наукове завдання по розробці регіональної методики довгострокового прогнозування характеристик стоку весняного водопілля в басейні р. Південний Буг. В основу наукових досліджень покладено комплексний підхід щодо формування максимального стоку весняного водопілля річок на основі використання операторної моделі формування типових гідрографів водопіль і паводків та прогностичного методу з урахуванням діагнозу типу водності майбутнього водопілля. Такий підхід дав змогу створення єдиної методичної бази нормування та прогнозування гідрологічних характеристик весняного водопілля (шарів стоку та максимальних витрат води) та визначення їх ймовірнісних величин настання у багаторічному періоді.

Монографія розрахована на широке коло науковців в області гідрологічних досліджень, а також студентів вищих навчальних закладів.

УДК 556.166.06

Shakirzanova Zh. R., Dokus A.O.

Long-term forecasting of spring flood characteristics in the Pivdenny Buh river basin: monograph / Odessa State Environmental University. Odessa: FOP Bondarenko M.O., 2021. 244 p.

The monograph solves the scientific problem of developing a regional method for long-term forecasting of spring flood characteristics in the Pivdenny Buh river basin. The research is based on a comprehensive approach to the formation of maximum runoff of spring flood based on the use of the operator model of typical hydrographs of spring flood and flood formation and the forecasting method taking into account the diagnosis of water type of future floods. This approach allows to create a single methodological basis for rationing and forecasting the hydrological characteristics of spring flood (runoff layers and maximum discharge) and to determine their probabilistic values in many years period.

The monograph is intended for a wide range of scientists in the field of hydrological research, as well as students of higher educational institutions.

ISBN 978-617-8005-42-9

© Шакірзанова Ж.Р., Докус А.О., 2021

© Одеський державний екологічний університет, 2021

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1 ФІЗИКО-ГЕОГРАФІЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА БАСЕЙНУ РІЧКИ ПІВДЕННИЙ БУГ В МЕЖАХ РАЙОНУВАННЯ ТЕРИТОРІЇ	10
1.1 Загальна характеристика та водогосподарське призначення басейну р. Південний Буг.....	10
1.2 Гідрометеорологічна мережа спостережень та вивченість території у межах басейну р. Південний Буг.....	12
1.3 Районування басейну р. Південний Буг за умовами формування весняного водопілля річок.....	20
1.3.1 Основні підходи до узагальнення річкового стоку та районування територій.....	21
1.3.2 Виявлення основних факторів формування максимального стоку весняного водопілля в басейні р. Південний Буг при використанні факторного аналізу.....	23
1.3.3 Гідрологічне районування басейну р. Південний Буг за умовами формування весняного водопілля річок при використанні кластерного аналізу.....	27
1.4 Природні умови формування весняних водопіль в межах районування басейну р. Південний Буг	31
1.4.1 Геологічні особливості умов формування рельєфу.....	31
1.4.2 Характеристика ґрунтового покриття	33
1.4.3 Рослинність, заболоченість, озерність	34
1.5 Кліматична характеристика басейну р. Південний Буг.....	37
1.5.1 Температура повітря, глибина промерзання ґрунтів, наявність відлиг.....	37
1.5.2 Атмосферні опади, характеристика снігового покриття та вологість ґрунтів.....	44
1.5.3 Вологість повітря та вітровий режим	49
1.6 Гідрологічний режим весняного водопілля р. Південний Буг.....	51
1.7 Сучасні кліматичні зміни у межах басейну р. Південний Буг.....	59
1.8 Дослідження часових тенденцій гідрометеорологічних характеристик в умовах сучасних кліматичних змін.....	60
1.9 Оцінка впливу зарегульованості річкового стоку в басейні р. Південний Буг на характеристики весняного водопілля.....	73

2	АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД МЕТОДІВ ТА МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ПРОГНОЗУВАННЯ ВЕСНЯНОГО СТОКУ РІЧОК.....	80
2.1	Розвиток довгострокового гідрологічного прогнозування характеристик стоку весняного водопілля річок	80
2.2	Науково-методичні підходи довгострокового прогнозування шарів стоку та максимальних витрат води весняного водопілля.....	83
2.2.1	Теоретичні основи прогнозування шарів стоку.....	83
2.2.2	Теоретичні основи прогнозування максимальних витрат води весняного водопілля.....	87
2.3	Огляд математичних моделей для прогнозування стоку річок.....	88
2.3.1	Сучасні математичні моделі короткострокових гідрологічних прогнозів гідрографу стоку.....	89
2.3.2	Огляд закордонних математичних моделей для прогнозування стоку річок.....	93
2.3.3	Сучасні математичні моделі довгострокових гідрологічних прогнозів.....	98
3	РОЗРОБКА МЕТОДИКИ ДОВГОСТРОКОВОГО ПРОГНОЗУВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ВЕСНЯНОГО ВОДОПІЛЛЯ В БАСЕЙНІ РІЧКИ ПІВДЕННИЙ БУГ.....	106
3.1	Основні теоретичні положення методики довгострокового прогнозування характеристик весняного водопілля в басейні р. Південний Буг.....	106
3.2	Теоретичні основи методу дискримінантного аналізу.....	108
3.3	Розробка методики довгострокового прогнозування характеристик весняного водопілля при врахуванні комплексу гідрометеорологічних чинників в басейні р. Південний Буг.....	111
3.3.1	Збір та первинна обробка гідрометеорологічної інформації.....	111
3.3.2	Врахування комплексу гідрометеорологічних чинників при прогнозуванні типу водності весняного водопілля в басейні р. Південний Буг та методика їх визначення.....	113
3.3.3	Визначення основних гідрометеорологічних чинників вектор-предиктору дискримінантної функції.....	114
3.3.4	Встановлення типу водності весняного водопілля в басейні р. Південний Буг.....	120
3.3.5	Побудова регіональних залежностей для довгострокового прогнозування шарів стоку та максимальних витрат води весняного водопілля в басейні р. Південний Буг.....	128

3.3.6	Визначення прогнозних величин очікуваних шарів стоку та максимальних витрат води весняного водопілля в басейні р. Південний Буг.....	128
3.4	Визначення прогнозних забезпеченостей характеристик весняного водопілля в басейні р. Південний Буг.....	133
3.5	Картографічна форма представлення прогностичної інформації.....	134
3.6	Перевірка ефективності методики довгострокових прогнозів характеристик весняного водопілля річок в басейні р. Південний Буг.....	138
3.7	Встановлення завчасності довгострокових прогнозів весняного водопілля в басейні р. Південний Буг.....	149
3.8	Автоматизований програмний комплекс «Південний Буг» для довгострокового прогнозування характеристик весняного водопілля в басейні р. Південний Буг.....	150
4	ОБҐРУНТУВАННЯ МЕТОДИКИ ДОВГОСТРОКОВИХ ПРОГНОЗІВ ХАРАКТЕРИСТИК ВЕСНЯНОГО ВОДОПІЛЛЯ ДЛЯ НЕВИВЧЕНИХ РІЧОК БАСЕЙНУ ПІВДЕННОГО БУГУ.....	156
4.1	Методичні підходи до довгострокового прогнозу характеристик весняного водопілля річок басейну р. Південний Буг для невивчених річок.....	156
4.2	Методика визначення середньобогаторічних величин характеристик максимального стоку весняного водопілля для невивчених річок басейну р. Південний Буг.....	157
4.2.1	Сучасний стан нормування розрахункових характеристик максимального стоку весняного водопілля річок.....	157
4.2.2	Використання операторної моделі формування стоку для визначення середньобогаторічних модулів максимальних витрат води весняного водопілля в басейні р. Південний Буг.....	162
4.2.2.1	Визначення середньобогаторічних максимальних запасів води в сніговому покриві, дощових опадів періоду весняного водопілля та коефіцієнту стоку весняного водопілля в басейні р. Південний Буг.....	163
4.2.2.2	Визначення коефіцієнтів часової нерівномірності схилового припливу.....	167
4.2.2.3	Визначення тривалості схилового припливу до руслової мережі.....	168

4.2.2.4	Визначення трансформації водопіль під впливом тривалості руслового добігання	171
4.2.2.5	Визначення коефіцієнту русло-заплавного регулювання.....	172
4.2.2.6	Визначення трансформації водопіль під впливом водойм проточного типу	173
4.2.2.7	Оцінка запропонованої методики.....	174
4.3	Обґрунтування регіональної методики довгострокових прогнозів характеристик максимального стоку весняного водопілля для невивчених річок басейну Південного Бугу.....	177
5	ОЦІНКА ХАРАКТЕРИСТИК ВЕСНЯНОГО ВОДОПІЛЛЯ В УМОВАХ ЗМІН КЛІМАТУ.....	185
5.1	Глобальні зміни клімату та можливі сценарії поведінки кліматичної системи	185
5.2	Оцінка можливих змін водності річок України за сценаріями глобального потепління.....	186
5.3	Можливість врахування змін клімату в методиці довгострокових прогнозів характеристик весняного водопілля в басейні р. Південний Буг.....	190
5.3.1	Методичний підхід щодо врахування впливу змін клімату на стік весняного водопілля.....	190
5.3.2	Визначення середньобогаторічних максимальних снігозапасів, опадів весняного водопілля та коефіцієнтів стоку в басейні р. Південний Буг за кліматичними моделями сценарію RCP 4.5.....	193
5.4	Виявлення впливу кліматичних змін на характеристики стоку весняного водопілля в басейні р. Південний Буг.....	198
5.5	Оцінка умов формування весняного водопілля у мабутньому в період 2021-2050 рр.....	201
	ВИСНОВКИ.....	206
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	210
	АНОТАЦІЯ.....	236
	SUMMARY.....	240

ВСТУП

В умовах інтеграції України у Європейський Союз при впровадженні основних положень Директиви 2007/60/ЄС Європейського Парламенту та Ради від 23 жовтня 2007 року про оцінку та управління ризиками затоплення (Directive 2007/60/EC of the European Parliament and of the Council, 2007) для забезпечення підготовки плану управління ризиками затоплення однією з важливих задач є створення методик попередньої оцінки ризиків затоплення, визначення зон можливих затоплень територій під час повені чи паводка, у тому числі затоплення річковими водами (річкове джерело затоплення) при проходженні високих рівнів води викликаних дощовими паводками та весняними водопіллями (Водний кодекс України, 1995, Методика попередньої оцінки ризиків затоплення, 2018).

В гідрологічному режимі більшості рівнинних річок України, зокрема басейну р. Південний Буг, саме весняне водопілля відноситься до характерної багатоводної фази, об'єми стоку якого на невеликих річках півдня сягають 60-70 % від річного. Весняне водопілля супроводжується підйомом рівнів води, виходом її на заплаву, а у багатоводні роки – призводить до підтоплень територій, які завдають значних збитків господарським об'єктам, населеним пунктам, об'єктам культурної спадщини. При цьому, максимальні витрати (рівні) води найбільш швидко формуються, зазвичай, на невеликих річках, на яких часто відсутні систематичні спостереження за річковим стоком.

Згідно з вимогами Водної Паводкової Директиви ЄС постає завдання встановлення ступеня гідрологічного ризику та зон можливого підтоплення при визначенні максимального стоку річок рідкісної ймовірності перевищення. Але не менш важливим питання є прогнозування максимальних витрат (рівнів) води, об'ємів стоку в режимі реального часу, встановлення прогностичної ймовірності настання очікуваного явища у багаторічному періоді, зокрема, весняного водопілля.

Для просторового прогностичного моніторингу необхідними є створення нових або удосконалення існуючих методів прогнозування гідрологічних характеристик весняного водопілля річок, строків його формування, що дозволяє передбачити виникнення можливого катастрофічного водопілля за 15-25 діб до настання явища. При цьому найбільш наочною є картографічна форма представлення прогнозних величин, що дає змогу надати кількісну просторову оцінку стокових величин весняного водопілля, частоти їх повторюваності у багаторічному періоді в

цілому для великих басейнів чи регіонів, включаючи річки, що не вивчені в гідрологічному відношенні.

В умовах змін клімату і водного режиму весняного водопілля річок постає завдання можливості оцінки характеристик максимального стоку у подальші роки в розрахункових і прогностичних методиках.

В такому разі, актуальною задачею, що вирішується в даному дослідженні, є розробка регіональної методики довгострокового прогнозування характеристик весняного водопілля, що дає змогу щорічного просторового моніторингу характеристик максимального стоку річок басейну Південного Бугу та їх прогнозованої забезпеченості настання в багаторічному періоді. Врахування у прогностичній схемі кліматичних змін здійснюється шляхом сценарної оцінки базових середньобаторічних характеристик весняного стоку.

Об'єктом дослідження є максимальний стік весняного водопілля річок басейну Південного Бугу.

Предмет дослідження – прогнозування характеристик максимального стоку весняного водопілля (шарів/об'ємів стоку, максимальних витрат/рівнів води) в басейні р. Південний Буг.

В основу наукових досліджень покладено комплексний підхід щодо формування максимального стоку весняного водопілля річок на основі використання операторної моделі формування типових гідрографів водопіль та паводків та прогностичного методу з урахуванням діагнозу типу водності майбутнього водопілля. Обґрунтування параметрів прогностичної схеми на сучасних гідрометеорологічних даних спостережень виконано при використанні методів комплексного географічного підходу до аналізу умов формування максимального стоку річок: теоретичного аналізу гідрологічних процесів і явищ; сучасних методів статистичного аналізу (факторний, кластерний та дискримінантний аналізи, статистичної обробки гідрологічних характеристик; географічному узагальненні гідрометеорологічних величин; числових методів при визначенні не вимірюваних величин (розрахункової тривалості припливу води зі схилів до руслової мережі, коефіцієнтів русло-заплавного регулювання та ін.), сучасних даних кліматичних моделей сценарію RCP 4.5 глобального кліматичного моделювання IPCC проєкту CORDEX.

З метою оперативного щорічного прогнозування характеристик максимального стоку річок, встановлення прогностичних забезпеченостей, передчасного визначення строків водопіль в басейні Південного Бугу авторами розроблений алгоритм для програмного прогностичного комплексу

«Південний Буг» з сучасним представленням прогностичної інформації у вигляді таблиць, діаграм, графіків, картосхем.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в розробці регіональної методики довгострокових прогнозів характеристик весняного водопілля в басейні р. Південний Буг, що базується на удосконаленні окремих положень наукових методів і математичних моделей в галузі гідрологічних прогнозів, а також створенні єдиної методичної бази нормування та прогнозування гідрологічних величин весняного стоку річок (шарів стоку, максимальних витрат води), зокрема, й для річок, по яких дані вимірювань витрат води відсутні.

Практична значущість одержаних результатів наукового дослідження для соціально-економічного розвитку країни в цілому, декількох суміжних галузей виробництва (охорони навколишнього середовища та ін.) полягає у завчасній оцінці та моніторингу прогностичних величин шарів стоку та максимальних витрат води, попередження про катастрофічні та небезпечні весняні водопілля населення та влади, при плануванні режиму роботи ГЕС в період проходження максимального весняного стоку річок.

Регіональна методика довгострокового прогнозування характеристик весняного водопілля в басейні р. Південний Буг використовується в Гідрометцентрі Чорного та Азовського морів (ГМЦ ЧАМ) у вигляді програмного комплексу «Південний Буг» для оперативного прогностичного забезпечення, буде запропонована до використання в басейнових управліннях водних ресурсів (м. Одеса, м. Вінниця).

Монографія розрахована на широке коло науковців в області гідрологічних досліджень, а також студентів вищих навчальних закладів.

Автори висловлюють подяку д-ру геогр. наук, проф. Є.Д. Гопченку, д-ру геогр. наук, проф. Н.С. Лободі, д-ру геогр. наук, доц. В.А. Овчарук, д-ру геогр. наук, проф. В.М. Хохлову за методичні консультації під час наукових досліджень.

Щіра вдячність рецензентам роботи д-ру геогр. наук, проф. В.В. Гребеню, д-ру геогр. наук, проф. Ю.С. Юценку, канд. геогр. наук Б.Ф. Христюку за цінні зауваження та поради під час рецензування монографії.

1 ФІЗИКО-ГЕОГРАФІЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА БАСЕЙНУ РІЧКИ ПІВДЕННИЙ БУГ В МЕЖАХ РАЙОНУВАННЯ ТЕРИТОРІЇ

1.1 Загальна характеристика та водогосподарське призначення басейну р. Південний Буг

Водозбірний басейн р. Південний Буг повністю розташований на території України, в південно-західній частині її території. Витік р. Південний Буг знаходиться поблизу с. Холодець Хмельницької області та утворюється з боліт Волино-Подільської височини, звідти річка тече на схід через м. Вінниця, поблизу якого змінює напрям на південно-східний і впадає в Бузький лиман, далі утворює з р. Дніпро Дніпро-Бузький лиман і впадає в Чорне море. Довжина річки становить 806 км, водозбірна площа річкового басейну становить 63,7 тис. км² [1]. Фізико-географічна карта та географічне положення басейну р. Південний Буг представлені на рис. 1.1.

Басейн р. Південний Буг характеризується високим рівнем водогосподарської освоєності території. Басейн знаходиться в межах 7 областей (Хмельницької, Вінницької, Київської, Черкаської, Одеської, Кіровоградської та Миколаївської) в яких проживає близько 4,1 млн осіб (у тому числі 2,4 млн міських та 1,7 млн сільських жителів) [2].

Басейн р. Південний Буг є одним з потужних аграрних регіонів України з високим рівнем промислового виробництва. Переважна частина басейну річки (74-90 % площ водозборів річок) перебуває під впливом сільськогосподарського виробництва. Найбільш освоєні басейни річок степової зони. Навіть в басейні р. Савранка, де розташований один з найбільших в Україні ландшафтний заповідник дубових лісів, сільськогосподарська освоєність території сягає 71 %. Розораність басейну р. Південний Буг складає близько 66 % [3]. За даними сучасних досліджень [3] різких змін зазнали лісові угіддя, на значній площі водозбірного басейну вони знищені.

Лісовкриті площі басейну, при цьому, становлять 9 %, а на півдні не перевищують 3-7 % [3]. Проте, на жаль, у сучасній літературі не надається залісеність по окремих водозборах в басейні Південного Бугу. Такі дані, які є застарілими, опубліковані лише у роботі [1].

Важливо зазначити, що басейн р. Південний Буг має значний енергетичний потенціал. На сьогодні в басейні р. Південний Буг побудовано 24 основних водосховищ, з яких 16 водосховищ (місткістю 316 млн м³) розташовані в руслі р. Південний Буг (рис. 1.2).

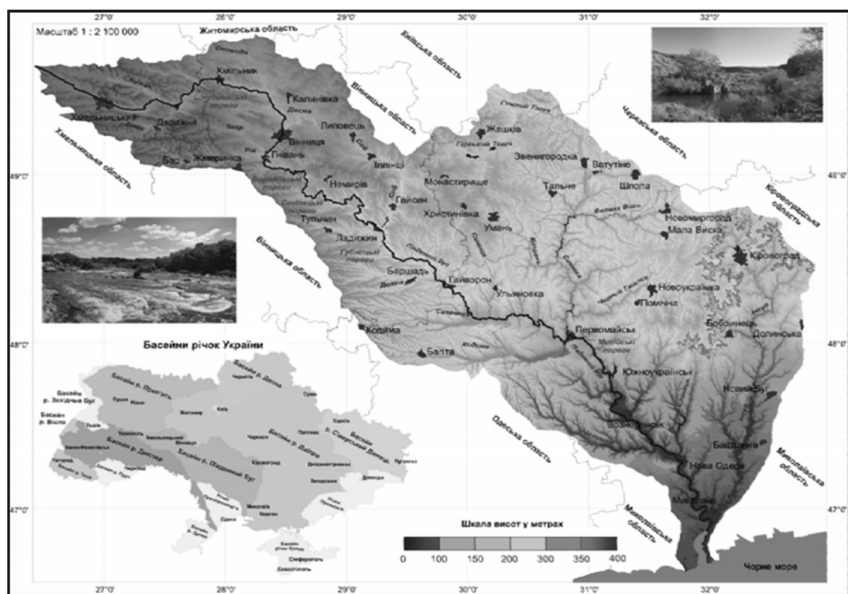


Рисунок 1.1 – Фізико-географічна карта та географічне положення басейну р. Південний Буг [2]

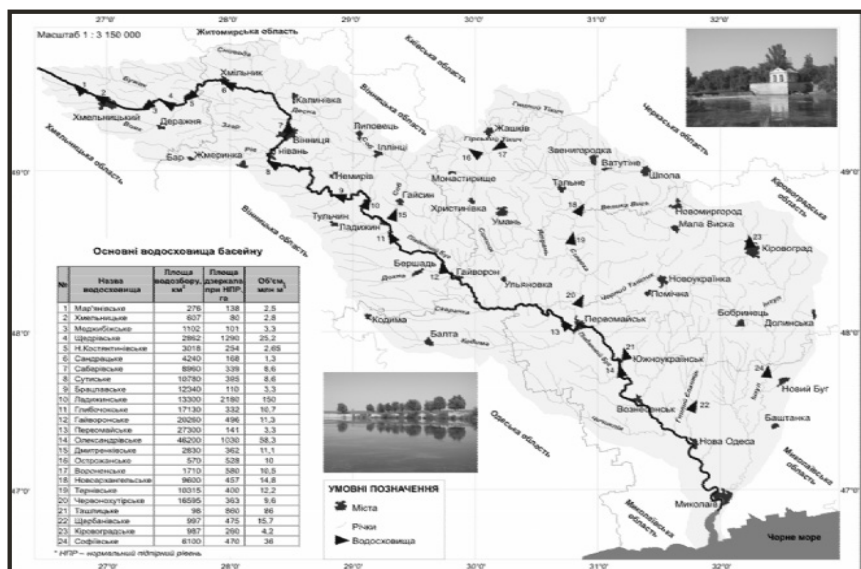


Рисунок 1.2 – Розташування основних водосховищ басейну р. Південний Буг [2]

Одні з перших на території України малі гідроелектростанції (ГЕС) були побудовані саме в басейні р. Південний Буг в с. Тиврів (в 1912 р.) та с. Сокилець (в 1913 р.) Вінницької області. В 1929 р. була введена в експлуатацію Бугська (р. Гірський Тікіч), Вознесенська та Сутинська (р. Південний Буг) гідроелектростанції. В 1935-1937 рр. в басейні р. Південний Буг на р. Сільниця введені в експлуатацію Березовська та Клебанська гідроелектростанції. У 50-60-х роках були побудовані Ладжинська, Глибочинська та інші малі ГЕС [4].

Деякі десятиліття потому характеризувалися припиненням розвитку малої гідроенергетики, проте, на початку ХХІ ст. гідроенергетика знов стала перспективним напрямом розвитку енергетичного потенціалу країни. Останні десятиліття активно ведеться відновлення старих та будівництво нових гідроелектростанцій в басейні р. Південний Буг [5], які використовуються для потреб гідроенергетики та водопостачання.

Велика зарегульованість річки є її характерною особливістю та виділяє р. Південний Буг з поміж інших великих річок України.

1.2 Гідрометеорологічна мережа спостережень та вивченість території у межах басейну р. Південний Буг

Гідрологічні спостереження на р. Південний Буг розпочаті в кінці ХІХ – на початку ХХ ст. і пов'язані з розвитком судноплавства в Україні. При дослідженнях русла було встановлено, що лише частина від м. Вознесенськ до гирла є судноплавною.

Грунтовні дослідження розвитку гідрометеорологічної мережі спостережень в басейні р. Південний Буг були здійснені в Українському гідрометеорологічному інституті – УкрГМІ ДСНС України та НАН України В.А. Манукалом [6].

Вперше витрати води на р. Південний Буг були виміряні у 1898 році. Активний розвиток мережі гідрологічних спостережень розпочався з 1910 року. Перші роботи, в яких було описано режим річки були виконані в середині 1920-х років: інженер В. Філатов описав характер режиму рівнів води р. Південний Буг за 1915-1925 рр. біля м. Вінниця; інженер В. Попов видав монографію «Режим річки Південний Буг», в якій узагальнив матеріали гідрологічних спостережень.

В 1929 році гідрологічна та метеорологічна служби об'єдналися та утворили Гідрометеорологічний комітет. Мережа гідрометеорологічних спостережень почала досить активно розширюватися, стали проводити

регулярні двохстрокові вимірювання рівнів води на річках басейну Південного Бугу. З 1930-х років розпочалося вивчення твердого стоку річок в басейні р. Південний Буг.

Розвиток гідрометеорологічної мережі зупинився під час Великої Вітчизняної війни та відновився лише в 1944-1946 роках та відзначився значним збільшенням кількості гідрологічних постів. Динаміка по роках зміни кількості гідрологічних постів (на 1 січня року) на яких вимірюють рівні води, витрати води та наносів в басейні р. Південний Буг представлена на рис. 1.3.

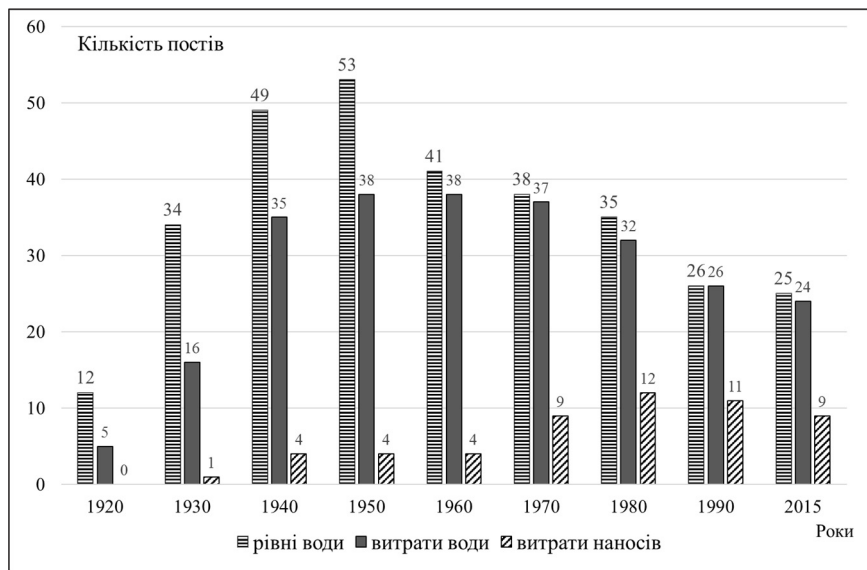


Рисунок 1.3 – Динаміка по роках зміни кількості гідрологічних постів (на 1 січня року), на яких вимірюють рівні води, витрати води та наносів в басейні р. Південний Буг (за даними [6])

У 1950-ті роки спостерігалась найбільша щільність гідрологічної мережі, що було викликано розвитком гідротехнічного будівництва, гідроенергетики, водного господарства, водного транспорту, іригації та водопостачання. В період з 1980 по 1990 рр. були закриті 9 гідрологічних постів [6].

Загалом в басейні р. Південний Буг налічується 6582 малі річки, загальною довжиною близько 20 тис. км, 11 середніх річок загальною

(р. Південний Буг – смт Олександрівка). Стан гідрометеорологічної мережі в басейні р. Південний Буг проаналізовано у роботі [7].

Згідно з рекомендаціями Всесвітньої метеорологічної організації [8] для річкових водозборів, розташованих у межах рівнинних територій, мінімальна щільність гідрометричних постів повинна становити – один пост на 1875 км². Згідно з цими рекомендаціями для басейну р. Південний Буг вище с. Селище один гідрологічний пост з вимірюванням витрат води припадає приблизно на 1800 км², для басейну річки вище с. Олександрівка – на 2700 км², для басейну річки до гирла – на 2900 км² [6].

Оскільки південна частина досліджуваної території є недостатньо вивченою у гідрологічному відношенні в даній роботі було залучено 4 гідрологічних постів річок між Дністром і Південним Бугом (рр. Великий Куяльник та Тилігул), з яких станом на 2015 р. діють два гідрологічних пости(рис. 1.4).

Важливим показником гідрологічної вивченості території є тривалість стокових спостережень на річках, яка змінюється в діапазоні від 7–9 років (рр. Гірський Тікіч – Юрпольська ГЕС, Південний Буг – с. Самчинці, Удич – с. Ягубець, Південний Буг – с. Селище, Сухий Ташлик – с. Липняжка, Чичиклія – с. Веселинове) до 94 (р. Рів – с. Демидівка) і 102 років (р. Південний Буг – смт Олександрівка). В цілому на досліджуваній території 22 пости (42 % від загальної кількості) мають тривалі ряди спостережень – понад 50 років; на 11 постах (20 %) гідрологічні ряди також достатньо тривалі та становлять 30–50 років. Ряди тривалістю 21-30 років є на 4 гідрологічних постах (8 %), а менше ніж 20 років – на 16 постах (20 %) [7].

Найбільша кількість гідрологічних постів (74 % від загального їх числа), мають величини площ водозборів річок в діапазоні до 5000 км². Кількість постів, розташованих на річках з площами водозборів 5001-10000 км² становить 6 %, 10001-20000 км² – 9 %, а з площами більше ніж 20000 км² – 11 % (табл. 1.1).

Спостереження за метеорологічними та агрометеорологічними характеристиками весняного водопілля (температурою повітря, опадами, запасами води в сніговому покриві, глибиною промерзання ґрунтів, запасами продуктивної вологи в метровому шарі ґрунту) здійснюють 25 метеорологічних та агрометеорологічних станцій рівномірно розташованих по території басейну (рис. 1.4).

В різні періоди гідрологічної науки гідрографічна класифікації річок здійснювалася як за довжинами річок [9]-[11], так і за площами їх водозборів [1], [10]-[16].

Таблиця 1.1 – Розподіл водозборів річок по тривалості спостережень і величині їх площ в басейні р. Південний Буг (станом на 2015 рік)

Площа водозбору, км ²	Кількість гідрологічних постів з періодом спостережень							
	≤10	11-20	21-30	31-40	41-50	> 50	Всього	%
≤100	-	1	2	-	-	1	4	8
101 – 1000	2	1	-	4	3	5	14	26
1001 – 5000	2	3	2	1	2	10	21	40
5001 – 10000	1	1	-	-	-	2	3	6
10001 – 20000	1	2	-	-	-	2	5	9
20001 – 50000	-	2	-	1	1	2	6	11
Всього	6	10	4	6	5	22	53	100
%	11	19	8	11	9	42	100	

Основним завданням раціонального управління, використання та охорони водних ресурсів нашої держави, враховуючи вимоги європейських стандартів та Водної Рамкової Директиви Європейського Союзу 2000/60/ЄС (БРД ЄС) від 23 жовтня 2000 року [12] і в рамках Угоди про асоціацію між Україною та Європейським Союзом та його державами-членами, яка була підписана у 2014 р. (http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/984_011/page10), основним завданням інтегрованого підходу до управління водними ресурсами за басейновим принципом є дослідження річкової мережі та облік водних об'єктів оснований на типології річок [17].

В роботі здійснено порівняльну характеристику класифікації річок за довжинами (табл. 1.2). Так, у 30-ті роки минулого сторіччя В.М. Родевичем [9] була запропонована класифікація за довжиною, яка складалася з 4-х категорій: найменші, малі, середні та великі річки. Така класифікація була покладена в основу першого Водного кадастру СРСР (1933 р.).

В роботі здійснено порівняльну характеристику класифікації річок за площею водозбору (табл. 1.3). Класифікація річок за площею водозбору – малі, середні та великі річки з'явилася з другої половини 60-х років минулого сторіччя у державному стандарті (ГОСТ 19179-73. «Гидрология суши. Термины и определения», 1973 р.).

Пізніше ця класифікація увійшла до Водного кодексу України [13] і Державного стандарту України ДСТУ 3517-97 «Гідрологія суші. Терміни та визначення основних понять» [16], які чинні на сьогодні.

Таблиця 1.2 – Порівняльна таблиця класифікацій річок за довжиною річки

Категорія річок	В.М. Родевич [9]	Р.А. Нежиховський[10]	Г.І. Швебс, М.І. Ігошин «Каталог річок і водойм України» [11]
найменші	менше 10 до 25 км	—	—
малі	26-100 км	від 10 до 100-150 км	10-100 км
невеликі	—	—	—
середні	101-500 км	100-150 км	>100 км
крупні	—	—	—
великі	від 501 км – понад 1000 км	>100-150 км	>1000 км

Подібна класифікація річок за площею водозбору та характеристика умов формування річкового стоку наведена в «Гидрологическом словаре» А.І. Чеботарьова [14], яка ділить річки на великі (площа водозбору більше 50 тис. км²), середні (площа від 2 тис. до 50 тис. км²) та малі (не більше 2 тис. км²). В методиці гідрографічного та водогосподарського районування території Російської Федерації (Методика гидрографического районирования территории Российской Федерации. Министерство природных ресурсов Российской Федерации. Приказ от 25 апреля 2007 года №112. URL: <http://base.garant.ru/12153715> (дата звернення: 22.05.2019) дотримуються класифікації річок за площею водозбору А.І. Чеботарьова.

Відома класифікація річок за площею А.В. Огієвського[18] за якою малі річки мають площу водозбору менше 200-300 км², а положення вододільної лінії їх водозборів визначається на основі детальних зйомок з проведенням нівелювання.

В нормативному документі СНіП 2.01.14-83 [15] для лісостепової і степової зон середніми річками вважаються річки з площею водозбору $F >> 200 \text{ км}^2$, при цьому за річки-аналоги слід приймати річки з площею не менше 100 км².

Таблиця 1.3 – Порівняльна таблиця класифікацій річок за площею водозбору у різних документах

Категорія річок	Водний кодекс України [13]; «Гидрологический словарь» А.И. Чеботарьова [14]; ДСТУ 3517-97 «Гідрологія суші. Терміни та визначення основних понять»[16]	СНіП 2.01.14-83 [15]	«Ресурсах поверхностных вод» [1]	Р.А. Нежиховський [10]	Г.І. Швебс, М.І. Ігошин «Каталог річок і водойм України» [11]	Водна Рамкова Директива ЄС [12]
дуже малі	–	–	менше 1-5 тис. км ²	–	–	–
малі	менше 2 тис. км ²	–	–	<100 км ²	<50 км ²	10- 100 км ²
середні	2–50 тис. км ²	>>200 км ² (100 км ² для річки- аналога)	–	від 100 тис. до 15 тис. км ²	від 2 тис. км ² до 50 тис. км ²	100 км ² - 1 тис. км ²
великі	понад 50 тис. км ²		12 тис.- 15 тис. км ² і навіть до 20- 25 тис. км ²	≥15 тис. км ²	>50 тис. км ²	1,0-10 тис. км ²
дуже великі	–	–	–	–	–	понад 10 тис. км ²

В «Ресурсах поверхностных вод» [1] для розрахунку характеристик максимального стоку невивчених у гідрологічному відношенні річок розрахунки ведуться, як для дуже малих водозборів з площею менше 1-5 км², так і для великих водозборів площею 12000-15000 км² і навіть до 20000-25000 км².

Р.А. Нежиховський [10] запропонував іншу схематизацію річкової мережі для підрахунку руслових запасів води. Для описання структури річкової мережі в його схемі використовують число створів, рівновіддалених від витоку річок. Всю руслову мережу поділяють на крупну, середню та мілку. До крупної річкової мережі зазвичай відносять ділянки річок, які обмежені гідрометричними створами, віддаленими на 100-150 км від витоку.

Для невеликих басейнів з площею водозбору менше 15000 км² краще використовувати граничні створи, віддалені на 50 км, а для великих басейнів ($F > 100000$ км²) – на 150 км.

За даними авторів Г.І. Швєбса та М.І. Ігошина «Каталог річок і водойм України» [11] існує інша класифікація річок за площею. За різними ознаками річки також розподіляються на великі (площа водозбору більше ніж 50000 км²), середні (площа водозбору від 2000 км² до 50000 км²) та малі (площа водозбору менше 50 км²).

Згідно вимог ВРД ЄС [12] за класифікацією річки поділяють на: малі річки з площею водозбору від 10 до 100 км², середні – від 100 км² до 1000 км², великі – від 1000 км² до 10000 км² та дуже великі – понад 10000 км².

Ретроспективний аналіз досліджень річкової мережі України та застосування типології річок, у тому числі водної Рамкової директиви ЄС, виконано авторами в роботі [17].

Згідно з класифікацією річок, виконаної авторами [11] р. Південний Буг (з довжиною 806 км) належить до середньої річки, а за площею водозбору (63700 км²) – класифікується як велика річка (за типологією річок Водного кодексу України [13]) або як дуже велика річка (за класифікацією річок у Водній Рамковій Директиві 2000/60/ЄС [12]).

З метою імплементації Водної Рамкової Директиви Європейського Союзу 2000/60/ЄС (ВРД ЄС) від 23 жовтня 2000 року [12] у всіх регіонах України важливим питанням є гідрографічне районування території України (у т. ч. басейну р. Південний Буг) за басейновим принципом, що має на меті покращення системи управління в галузі використання та охорони вод та відтворення водних ресурсів країни, у тому числі й малих річок.

В межах гідрографічного районування згідно з вимогами ВРД ЄС, що ґрунтується на гідрографо-географічному підході з межами, що проходять по вододілах річкових басейнів [19], район річкового басейну Південного Бугу відноситься до IV району, є цілісним і включає басейн річки та перехідні води (за визначенням [12]). В межах водогосподарського районування, що базується на гідрографо-географічному та економіко-географічному підходах до районування територій, в районі річкового басейну Південного Бугу визначено 11 водогосподарських ділянок, що дозволяє раціональніше використовувати водні ресурси річки (розробляти водогосподарські баланси, встановлювати ліміти забору водних ресурсів та інші параметри водокористування) [19].

В наступному пункті представлено районування басейну річки Південний Буг з урахування природних чинників формування річкового стоку, а саме весняного водопілля, як найбільш багатоводної, а в деяких випадках небезпечної фази водного режиму річок розглядуваної території.

1.3 Районування басейну р.Південний Буг за умовами формування весняного водопілля річок

Однією з головних задач гідрології є дослідження річкового стоку та його просторовий розподіл по території, що має теоретичне та практичне значення. Дослідження річкового стоку відбувається на основі даних спостережень гідрологічної та метеорологічної мережі в різних точках водозбору [8]. Проте вся інша територія, окрім пунктів виміру, залишається без наявності даних про характеристики стоку, потребує застосування методів географічних і гідрологічних узагальнень для узагальнень річкового стоку по всій території басейну. Розв'язання такої задачі можливе при побудові карт ізоліній (ліній рівних величин значень річкового стоку) або виділенні гідрологічних районів зі сталими значеннями прогнозних або розрахункових схем.

Автором [20] проаналізовано методики гідрологічного районування за умовами формування річкового стоку. Встановлено, що на початку ХХ ст. низкою радянських авторів було досить детально досліджено розподіл річкового стоку Європейської частини СРСР та складено перші карти районування стоку [21].

Сучасне гідрологічне районування територій знайшло широке відображення в роботах українських науковців при районуванні, як рівнинної території України [22]-[28], так і гірської [25], [27], [29], при застосуванні методів багатовимірної статистичного аналізу, основи яких

викладено в [30]-[36]. З метою довгострокового гідрологічного прогнозування характеристик стоку весняного водопілля рівнинних річок районування території виконано у роботах авторів [37], [38].

1.3.1 Основні підходи до узагальнення річкового стоку та районування території

Перші узагальнення у вигляді карти розподілу середньобаторічного річкового стоку було складено американським вченим Ф. Ньюеллом у 1892 р. [39] для рівнинних річок території Сполучених Штатів Америки (США), але, після її опублікування, тривалий час подібних карт не з'являлося. Перші роботи, які заклали основу для розвитку гідрологічного районування території були опубліковані в кінці XIX та на початку XX ст. російським геологом та ґрунтознавцем В.В. Докучаєвим [40]. У 1900 р. В.В. Докучаєвим на всесвітній виставці у Парижі було представлено першу карту ґрунтів північної півкулі. На основі його досліджень вперше був встановлений закон горизонтальної зональності та вертикальної поясності. Далі, на початку XX ст. його послідовниками, зокрема науковцем Л.С. Бергом (в [40]), було більш детально досліджено питання ландшафту, який відіграє важливу роль у формуванні стоку річок, і вже в 1913 р. було опубліковано перше його визначення.

У Радянському Союзі першу карту весняного стоку опублікував П.М. Лебедев у 1925 р. [41]. У 1927 р., маючи вже певні знання та накопичені дані по характеристиках стоку, Д.І. Кочеріним було вперше складено карту ізоліній середньобаторічного річного стоку Європейської частини СРСР [42].

У сучасній практиці широко використовується комплексний метод географо-гідрологічних узагальнень запропонований В.Г. Глушковым у 1933 р. [43], який враховує ряд географічних чинників та умов формування річкового стоку. У 1937 р. Б.Д. Зайков та С.Ю. Белінков опублікували карту середньобаторічного річного стоку території СРСР [44]. Перша така карта стоку для всієї земної кулі опублікована у 1945 р. М.І. Львовичем [45]. Найбільш повно розподіл середньобаторічного річного стоку СРСР зображено на картах Б.Д. Зайкова [46], В.А. Троїцького [47], К.Г. Тихоцького [48], а також у Фізико-географічному атласі світу [49].

Значний внесок у розвиток гідрологічного районування зробив П.С. Кузін [50], який закрив основні принципи районування та виконав районування території колишнього Радянського Союзу. В основу робіт

П.С. Кузіна покладено кількісні показники лінійних залежностей стоку від чинників, що його визначають. У 1971 р. Т.М. Синайською та Ю.В. Швейкінім [51] вперше представлено результати синхронності коливань річного стоку та виконано районування території України по критерію асинхронності. Вже у 1985 р. Л.К. Вершиніною, О.І. Крестовським, І.Л. Калюжним та К.К. Павловою [52] виконано районування Європейської частини території колишнього СРСР та виділено райони з переважним впливом тих чи інших стокоформуючих чинників.

Питанню районування території за ознаками однорідності умов формування весняного стоку та встановлення меж таких районів присвячена робота А.В. Христофорова [53] та ін. У 1988 році О.Г. Ободовським було виконано районування території України за характером проходження руслоформуючих витрат води [54] на основі факторного та кластерного аналізів.

З тих часів в Україні більш активно почали застосовуватися методи багатовимірної статистичної аналізу для виконання гідрологічного районування територій. На сучасному етапі розвитку гідрологічного районування території України науковцями широко застосовуються методи багатовимірної статистичної аналізу [30]-[36], що дає можливість на основі сучасних даних спостережень та застосування автоматичних технологій обробки інформації, як уточнювати встановлені райони, так і районувати територію за новими чинниками [22]-[29].

Так, у роботі Н.С. Лободи [22] виконано районування території України за синхронністю коливань річного стоку річок із залученням методів багатовимірної статистичної аналізу, а саме Q -модифікації методу факторного аналізу, методу головних компонент та сумісного аналізу. Метод кластерного аналізу застосований Н.С. Лободою у співавторстві з С.В. Мельником в роботі [23] при районуванні басейну Верхнього Дністра за характером коливань річного стоку.

Авторами М.Г. Сербовим та С.Г. Кіріяк [24] виконано гідрологічне районування рівнинної території України за ландшафтно-гідрологічними характеристиками при застосуванні методу факторного аналізу (R -модифікації) та кластерного аналізів. Подібний методичний підхід до гідрологічного районування території застосував В.В. Гребінь [25], але для всієї території України (рівнинної та гірської) при дещо іншому наборі факторів формування максимального стоку весняного водопілля.

Л.О. Горбачовою у 2015 р. [26] виконано гідрологічне районування території України за типами внутрішньорічного розподілу водного стоку та у співавторстві з Б.Ф. Христюком у 2016 р. [27] за умовами формування річного стоку води на основі типізації кривих Ендрюса. Гідрологічне районування території рівнинної України за синхронністю коливань максимального стоку весняного водопілля опубліковано у роботі В.А. Овчарук [28]. Районування виконано при застосуванні сумісного послідовного гідролого-генетичного методу факторного аналізу (Q -модифікації) та кластерного аналізу.

З метою прогнозування максимальних витрат води весняного водопілля авторами Є.Д. Гопченко та Ж.Р. Шакірзановою [37] здійснене районування території басейнів річок Верхнього Дніпра, Західної Двіни (Daugava) та Німану заландшафтно-гідрологічними ознаками при застосуванні методів факторного (на основі R -модифікації) та кластерного (дистанційного) аналізів. У подальший період з метою обґрунтування методичної бази для територіального довгострокового прогнозування шарів стоку та максимальних витрат води весняного водопілля рівнинних річок України Ж.Р. Шакірзановою [38] було виконане галузево-прикладне районування за параметрами прогнозної методики (рівнянь дискримінантної функції та регіональних прогнозних залежностей).

Метою даного розділу дослідження є гідрологічне районування басейну р. Південний Буг з використанням методів факторного (R -модифікації) та кластерного аналізів, подібно роботам [24], [25], [37], з виділенням районів з однотипними умовами формування весняних водопіль за комплексом морфометричних характеристик річок та їх басейнів та середньобагаторічних гідрометеорологічних та агрометеорологічних чинників (осереднених станом на 2015 р.).

1.3.2 Виявлення основних факторів формування максимального стоку весняного водопілля в басейні р. Південний Буг при використанні факторного аналізу

Метод факторного аналізу дозволяє скоротити (стиснути) вихідну інформацію і використовувати факторні навантаження для вибору найбільш значущих на основі R або Q -модифікацій статистичної моделі факторного аналізу [30]-[36]. При проведенні факторного аналізу для вибору найбільш значущих гідрометеорологічних чинників формування весняного

водопілля в басейні р.Південний Буг автором використані басейнові характеристики та багаторічні гідрологічні та агрометеорологічні характеристики максимального стоку весняного водопілля по 43 гідрологічних постах басейну, які можна віднести до двох груп:

- перша група – постійні чинники: географічне положення басейнів (географічна довгота, λ , в долях град.сх.д.; географічна широта, φ^o , в долях град півн. ш.) та морфометричній гідрографічні характеристики річок та їх водозборів (довжина річки, L , км;похил річки, I , %;площа водозбору, F , км²; середня висота водозбору, $H_{сер}$, м; озерність (озера, водосховища, ставки), $f_{оз}$, %; заболоченість водозбору, $f_{б}$, %; залісеність водозбору, $f_{л}$, %).

- друга група – змінні гідрологічні та агрометеорологічні характеристики максимального стоку весняного водопілля осереднені в межах річкових водозборів (у вигляді їх середньобагаторічних величин): шари стоку періоду весняного водопілля, Y_0 , мм; величини запасів води в сніговому покриві, S_m , мм; опади періоду танення снігу, X_1 (опади від дати настання максимальних запасів води в сніговому покриві S_m до дати завершення сніготанення, що може бути встановлена по даті проходження максимальних витрат води весняного водопілля Q_m), мм; опади, що випали після сніготанення, X_2 (опади від дати проходження максимальних витрат води весняного водопілля Q_m до дати закінчення весняного водопілля), мм; максимальні глибини промерзання ґрунтів, L_m , см; запаси вологи в шарі ґрунту 0-100 см під озимими культурами, що виміряні наприкінці зими, W_{0-100} , см. Визначення перелічених характеристик здійснено за даними багаторічних спостережень Державної гідрометеорологічної мережі.

На першому етапі розрахунків було визначено величини дисперсії факторів та виконано процедуру їх обертання при використанні модульного блоку «FactorAnalysis» автоматизованої системи «Statistica» [55]. Факторний аналіз дозволив стиснути вхідну інформацію до двох узагальнених факторів представлених в табл. 1.4.

Таблиця 1.4 – Основні фактори формування максимального стоку весняного водопілля в басейні річки Південний Буг

№ з/п	Чинники	Фактор 1	Фактор 2
1.	Довгота λ в долях град сх. д.	-0,79	0,07
2.	Широта φ^0 в долях град півн. ш.	0,94	0,16
3.	Довжина річки L , в км	0,10	0,86
4.	Покил річки, I , в ‰	-0,13	-0,77
5.	Площа водозбору, F , км ²	0,14	0,86
6.	Середня висота водозбору, $H_{сер}$, в м БС	0,95	-0,02
7.	Озерність (озера, водосховища, пруди), $f_{оз}$, %	0,38	-0,20
8.	Заболоченість водозбору, $f_{б}$, %	0,70	0,10
9.	Залісеність водозбору, $f_{л}$, %	0,36	-0,15
10.	Величини запасів води в сніговому покриві, S_m , мм	0,90	0,24
11.	Опади періоду танення снігу, X_1 , мм	0,94	0,16
12.	Опади, що випали після сніготанення, X_2 , мм	-0,11	0,94
13.	Максимальні глибини промерзання ґрунтів, L_m , см	0,70	0,23
14.	Запаси вологи в шарі ґрунту 0-100 см під озимими культурами, що виміряні наприкінці зими, W_{0-100} , см	0,14	-0,13
15.	Середньобагаторічний шар стоку весняного водопілля річок, Y_0 , мм	0,70	0,08
Частка у загальній дисперсії:		0,38	0,21

Встановлені фактори описують 59 % сумарної дисперсії кореляційної матриці. Ефективне число перших факторів визначають з умови

$$\sum_{l=1}^p \sum_{j=1}^m \frac{r_{lj}^2}{m} > 70\text{-}80\%, \quad (1.1)$$

де $\frac{\sum_{j=1}^m r_{lj}^2}{m}$ – характеризує вклад l -го фактору в сумарну дисперсію вихідних даних;

p – ефективне число перших компонент;

m – число змінних.

Аналізуючи результати, представлені у табл. 1.4, можна зробити висновки:

- *перший фактор* показує, що середньобагаторічні шари стоку періоду весняного водопілля залежать головним чином від таких гідрометеорологічних чинників, як географічна широта центрів водозборів, середня висота водозборів, заболоченість, величини запасів води в сніговому покриві, опади періоду танення снігу та максимальні глибини промерзання ґрунтів. На перший фактор припадає 38% сумарної дисперсії всіх факторів;

- *другий фактор* показує тісний зв'язок між такими чинниками, як довжина річки, площа водозборів та кількість опадів, що випали після сніготанення. На другий фактор припадає 21% сумарної дисперсії усіх факторів.

Розрахунки виконувалися на основі R -модифікації статистичної моделі факторного аналізу, що дозволила виявити найбільш значущі чинники із сукупності ознак і використати факторні навантаження для подальшого угруповання басейнів із застосуванням методу кластерного аналізу [30]-[36]. При цьому, було виконано процедуру обертання факторів, при обраному Varimax-критерію – Varimax normalized. Оскільки, перший та другий фактори описують більше ніж 50 % загальної дисперсії предикторів, було побудовано графік, вісі якого представляють ці два фактори (рис. 1.5). При роботі з сильно корельованою сукупністю чинників етап побудови факторної моделі (рис.1.5) є досить корисним, оскільки полегшує інтерпретацію результатів.

В ідеалі при обертанні факторів бажано отримати такий їх вид, щоб точки (чинники) розташовувалися на кінцях факторних осей з невеликою кількістю точок близько нуля [36].

Виходячи з результатів факторних навантажень (табл.1.2) та виконаної процедури обертання факторів (рис. 1.5), *головними чинниками формування весняного водопілля* річок басейну Південного Бугу та малих річок між Дністром і Південним Бугом обрано: географічну широту центрів тяжіння водозборів, φ^o , середню висоту водозборів, $H_{сер}$, заболоченість, f_0 , величини запасів води в сніговому покриві S_m , опади періоду танення снігу, X_1 , та максимальні глибини промерзання ґрунтів L_m .

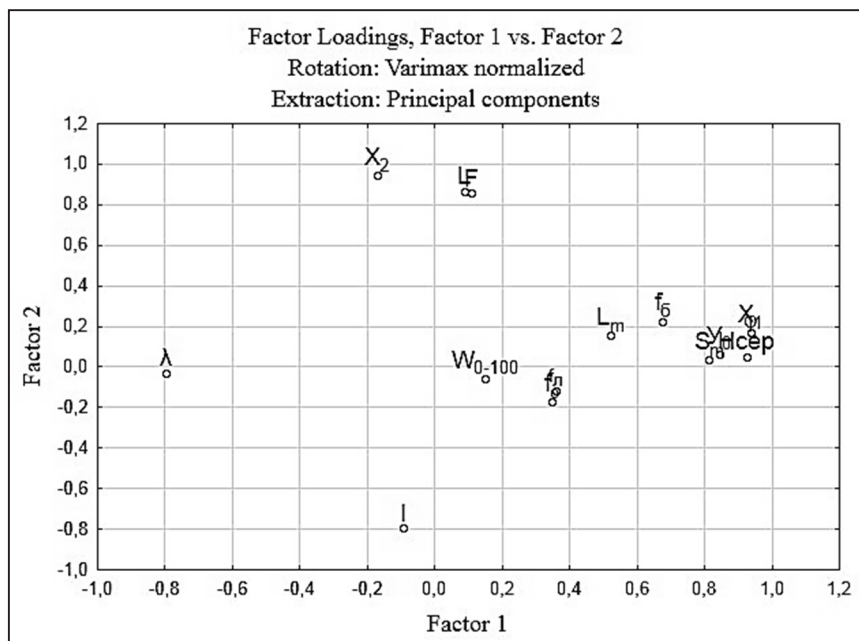


Рисунок 1.5 – Графічна схема кореляційної структури факторів формування весняного водопілля в басейні р. Південний Буг

1.3.3 Гідрологічне районування басейну р. Південний Буг за умовами формування весняного водопілля річок при використанні кластерного аналізу

Наступним етапом дослідження було отримання угруповань басейнів р. Південний Буг та малих річок між Дністром і Південним Бугом у вигляді деревоподібної структури для виділення окремих гідрологічних районів та підрайонів на основі встановлених головних факторів формування стоку. Угруповання проведено за допомогою автоматизованої системи «Statistica» [55], модульного блоку «Cluster Analysis».

За головними чинниками (факторами) формування весняного стоку, що фіксуються на гідрологічних постах, було здійснено їх об'єднання за допомогою алгоритму деревоподібної кластеризації у вигляді транспонованої матриці – дендрограми ієрархічної структури групування гідрологічних постів (рис. 1.6).

Дендрограма кластерного аналізу (рис. 1.6) об'єднала гідрологічні пости річкових басейнів у вигляді ієрархічної структури групування, які формують окремі гідрологічні райони та підрайони. Групування гідрологічних постів по приналежності до гідрологічного району за умовами формування весняного водопілля річок представлено в (табл. 1.5). В результаті районування території було виділено два гідрологічних райони з підрайонами.

Перший район охоплює територію від витoku до створу на р. Південний Буг – с. Тростянич. Нижче по течії та до гирла річки територія охоплює другий район, який поділився на три підрайони (рис. 1.7) [56].

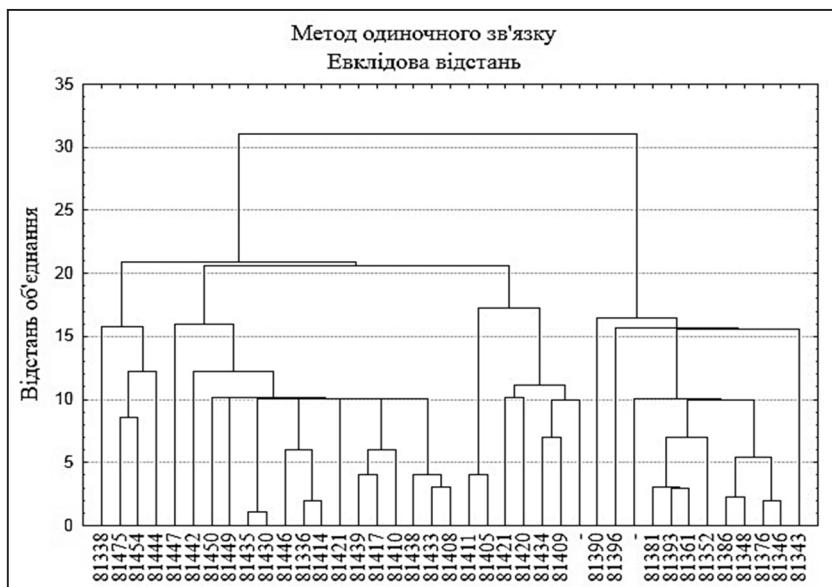


Рисунок 1.6 – Дендрограма ієрархічної структури групування гідрологічних постів в басейні р. Південний Буг

Відповідно [50], [51] жоден з методів районування території не дозволяє з достатнім ступенем точності провести межі виділених районів.

Межі гідрологічних районів, як правило, проводяться переважно по вододілах річок, що належать згідно з кластерним аналізом до однієї групи.

Таблиця 1.5 – Групування гідрологічних постів районів по приналежності до гідрологічного району за умовами формування весняного водопілля річок

Номер району	Індекс поста	Річка-пункт
Район I	81343	Південний Буг – с. Чорнява
	81346	Південний Буг – с. Пирогівці
	81348	Південний Буг – с. Лелітка
	81352	Південний Буг – с. Сабарів
	81- 01	Південний Буг – с. Самчинці
	81361	Південний Буг – с. Тростянчик
	81376	Бужок – смт Меджибож
	81381	Іква – смт Стара Синява
	81386	Згар – смт Літин
	81390	Десна – с. Сосонка
	81393	Рів – с. Демидівка
	81396	Соб – с. Зозів
Район II (підрайон Па)	81- 02	Удич – с. Ягубець
	81405	Дохна – с. Велика Кириївка
	81409	Синиця – смт Любашівка
	81411	Кодима – с. Обжила
	81420	Гірський Тікіч – с. Тальне
	81421	Маньківка – с. Кінашівка
	81434	Уманка – м. Умань
Район II (підрайон Пб)	81410	Синиця – с. Каменний Брід
	81408	Савранка – с. Осички
	81414	Кодима – с. Катеринка
	81417	Синюха – с. Синюхін Брід
	81421	Гнилий Тікіч – смт Лисянка
	81430	Велика Вись – с. Ямпіль
	81433	Ятрань – с. Покотилово
	81435	Циганка – с. Краснопілля
	81438	Чорний Ташлик – с. Тарасівка
	81439	Мертвовід – с. Крива Пустош
	81442	Чичиклія – с. Василівка

На сьогодні, вододіли річок визначаються при використанні топографічних карт побудованих за допомогою геоінформаційних систем (ГІС-технологій). При вимушеному перетині водозбору межами виділеного району (коли цілісний водозбір згідно з кластерним аналізом належить до різних районів) до аналізу залучають географічні карти орографії, рослинності, геології та ін.

Межі гідрологічних районів в басейні р. Південний Буг проведено по вододілах річок з залученням до аналізу карт ґрунтового покриття, рослинності території [57], [58] та враховуючи фізико-географічне районування території [59].

Здійснене у монографії гідрологічне районування басейну р. Південний Буг за умовами формування весняного водопілля річок (рис. 1.7) добре узгоджується з районуванням рівнинної території України [24], ландшафтно-гідрологічним районуванням України [25] та районуванням території рівнинної України за синхронністю коливань максимального стоку весняного водопілля [28]. Слід зазначити, що виконане у даній роботі районування дещо відрізняється від попереднього галузевого-прикладного районування рівнинної території України при довгостроковому прогнозуванні характеристик весняного водопілля рівнинних річок України, виконаного за даними по 2000 рік [38].

Застосування у даній роботі статистичних методів дозволило уточнити межі наявних районів [24], [25], [28], [38] та виділити нові підрайони в басейні р. Південний Буг. Дане гідрологічне районування буде покладено в основу узагальнення параметрів прогнозної методики довгострокового прогнозування характеристик весняного водопілля в басейні р. Південний Буг (розд. 3) із визначенням основних гідрометеорологічних чинників, що беруть участь у формуванні стоку річок, складанні вектор-предиктор у дискримінантної функції, регіональних прогностичних залежностей та узагальненні параметрів прогнозної методики.

1.4 Природні умови формування весняних водопіль в межах районування басейну р. Південний Буг

1.4.1 Геологічні особливості та рельєф

Водозбірний басейн р. Південний Буг розташований в межах давнього кристалічного фундаменту південно-західної частини Східноєвропейської платформи, де розповсюджені породи докембрійського, палеозойського,

Рельєф басейну р. Південний Буг формують глибокі яри, балки та пороги, оскільки Український кристалічний щит, на якому він розташований, є піднятою ділянкою платформи й складається з гірських порід, утворення яких датується докембрійським часом [1]-[3], [57]-[60]. Загалом басейн р. Південний Буг розташований на Східноєвропейській рівнині Правобережної частини території України. Басейни річок району I розташовані в межах Подільської височини, другий район, розташований в межах Придніпровської височини (підрайон Па) та Причорноморської низовини (підрайони Пб, Пв). Середня висота водозборів змінюється з північного заходу (район I) на південний схід (район II) від 396 до 100 м (рис. 1.8).

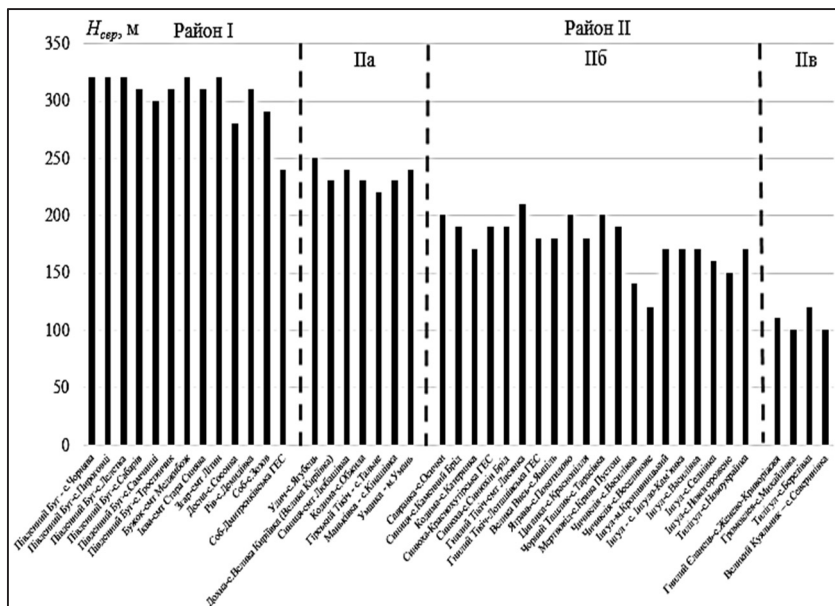


Рисунок 1.8 – Динаміка середньої висоти водозборів
в басейні р. Південний Буг

Для району I та підрайону Па характерним є чергування розвинутих підвищених ландшафтів з рівнинно-хвилястим рельєфом місцевості, добре розвинута річкова мережа (0,43-0,48 км/км²), невеликі похили річок (0,5-2,0 м/км). Підрайон Пб характеризується поширенням хвилястих рівнин і лесових височин, розвинутою яружно-балковою мережею при зменшенні з півночі на південь густоти річкової мережі та ухилів водозборів. Підрайон Пв розташований на площах з плоским рівнинним рельєфом, який часто порушується великими замкненими пониженнями – блюдцями та подами. Річкова мережа слабо розвинута, а долини річок врізані на глибину лише 10-15 м. При плоских вододілах схили берегів перерізані яруго-балковою мережею.

1.4.2 Характеристика ґрунтового покриву

В межах басейну р. Південний Буг ґрунтовий покрив сформувався під впливом взаємодії низки факторів – рельєфу, клімату, рослинного покриву, сільськогосподарської діяльності та ін. [1], [2].

В ґрунтово-кліматичному відношенні басейн р. Південний Буг належить до південної частини Правобережної лісостепової та рівнинної території степової зон.

Ґрунти представлені переважно чорноземами серед яких виділяються наступні головні підтипи: чорноземи типові, чорноземи звичайні та чорноземи південні, які послідовно змінюють один одного з півночі на південь. Серед древніх відкладень переважають піски та алювій, переважно суглинисті. У заплавах р. Південний Буг значне поширення мають піщані та супіщані алювіальні відкладення [1], [2], [57]-[60]. В межах району I та підрайону Па басейну р. Південний Буг ґрунти представлені переважно світло-сірими суглинками, в підрайоні Пб – переважно малогумусними чорноземами, на підвищених місцях рельєфу залягають опідзолені чорноземи. Світло-сірі ґрунти найбільш опідзолені та найменш гумусовані серед лісостепових опідзолених ґрунтів. Гумусо-елювіальний горизонт чорноземів опідзолених ґрунтів сягає лише 35 см.

Найпоширенішими ґрунтами в межах підрайону Пв є чорноземи південні. Карбонатність ґрунтоутворюючих порід в умовах непромивного водного режиму зумовили високу насиченість чорноземів кальцієм. На крайньому півдні підрайону Пв простягнулися темно-каштанові ґрунти. Дана місцевість характеризується рівнинно-плоским слабкодренуючим рельєфом.

В пониззі басейну р.Південний Буг ґрунти переходять в чорноземи слабкосолонцюваті та каштанові. Карта ґрунтового покриву басейну р. Південний Буг представлена на рис. 1.9.

1.4.3 Рослинність, заболоченість, озерність

Басейн р.Південний Буг розташований у межах трьох природних фізико-географічних зон: широколистяних лісів, лісостепової та степової зони, які своєю чергою діляться на підзони [1], [2], [57]-[60].

За геоботанічним районуванням [57] територія відноситься до Південнопольсько-Західноподільської підпровінції широколистяних лісів (букових, грабово-дубових і дубових лісів), справжніх та остепнених луків, лучних степів та евтрофних боліт (рис. 1.10).

Частина басейну р. Південний Буг (в межах району І) розташована в зоні мішаних лісів та (разом з підрайоном ІІа) в лісостеповій недостатньо зволоженій теплій зоні в межах Східноєвропейської лісостепової провінції дубових лісів, остепнених луків та лучних степів. Рослинність представлена переважно грабово-дубовими та дубовими лісами, суходільними та остепненими луками, а також лучними степами.

Підрайони ІІб та ІІв знаходяться в межах степової зони, яка поділена на три підзони: Північностепову, Середньостепову та Південну сухостепову. Степова рослинність в межах підрайонів ІІб та ІІв представлена засушливими бобово-злаковими різнотравними асоціаціями. Значна частина басейну р. Південний Буг зайнята орними землями, на яких вирощують культурні види рослин [60].

Залісеність в басейні р. Південний Буг не перевищує 19 % (рис. 1.11). В південно-західній частині басейну в межах району І залісеність водозборів коливається в межах 1-13 %, в центральній частині басейну – районах ІІа та ІІб залісеність становить 1-19 % і найменша залісеність спостерігається на півдні досліджуваної території в районі ІІв – 1-5 % [1].

Заболоченість території незначна і лише в межах району І її значення досягають 11 % (р. Згар – смт Літин). В межах району ІІ заболоченість майже відсутня, значення в середньому не перевищують 1 % і лише на р. Савранка – с. Осички та на р. Кодима – с. Обжила становлять 2 % (рис. 1.12). Озерність на досліджуваному басейні майже відсутня. Середньозважена озерність в басейні р. Південний Буг не перевищує 1 % і лише на деяких малих річках (р. Соб – с. Зозів та р. Згар – смт Літин) досягає 2-3 % відповідно [1].

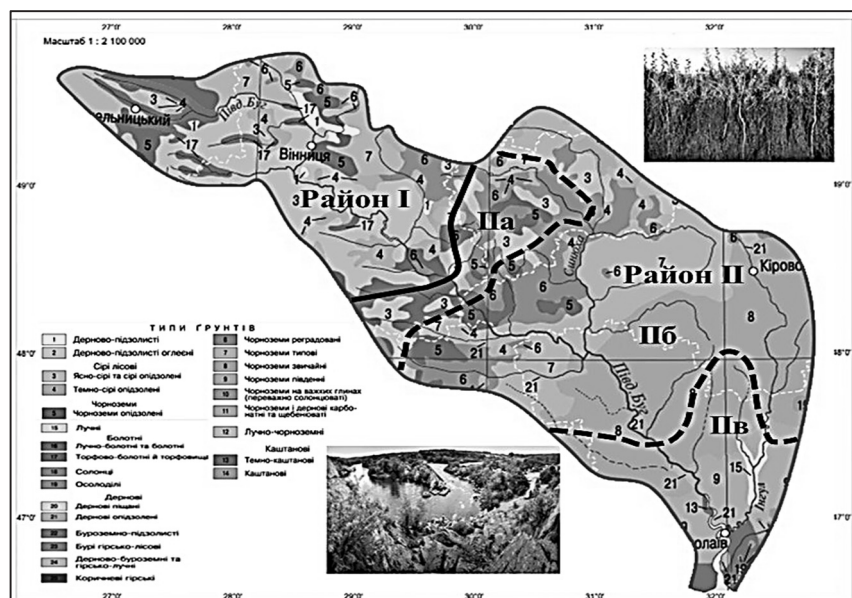


Рисунок 1.9 – Карта ґрунтового покритву басейну р. Південний Буг [59]

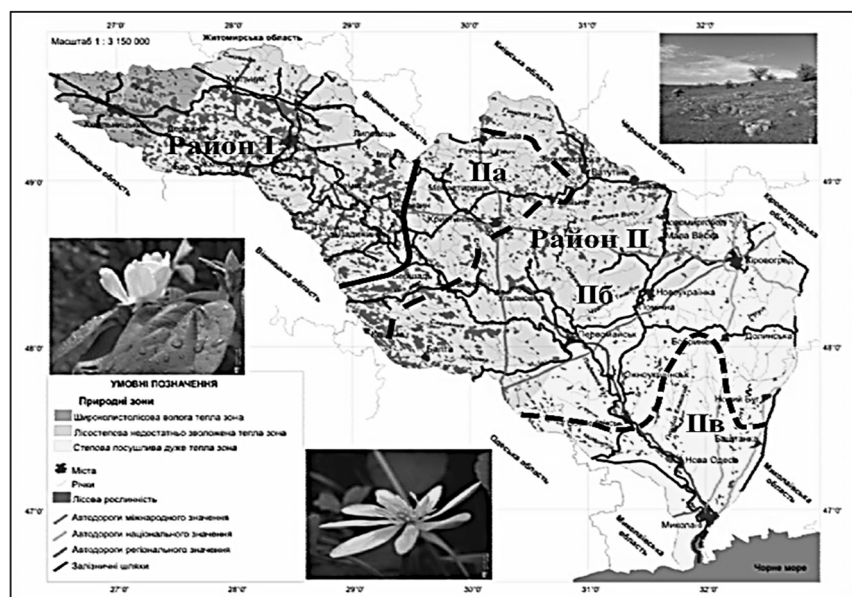


Рисунок 1.10 – Карта рослинності басейну р. Південний Буг [2]

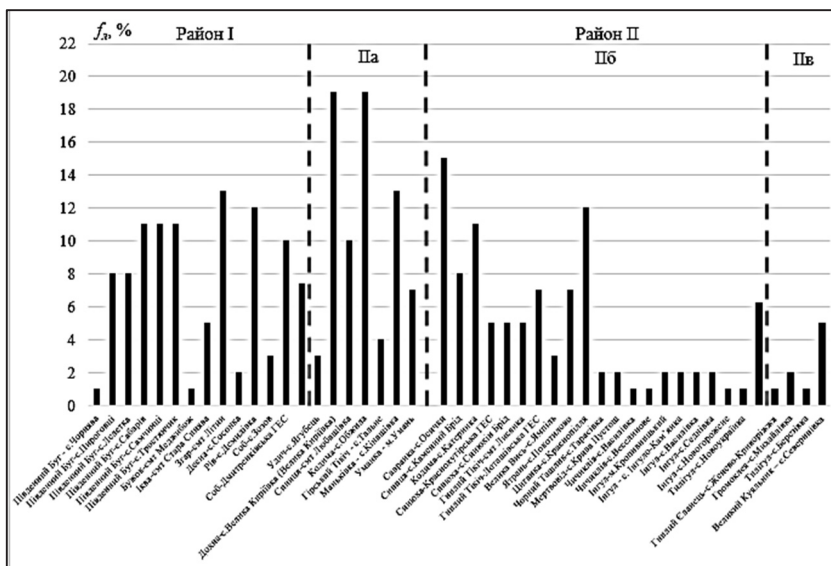


Рисунок 1.11 – Залісеність водозборів в басейні р. Південний Буг, у відсотках від загальної площі басейну

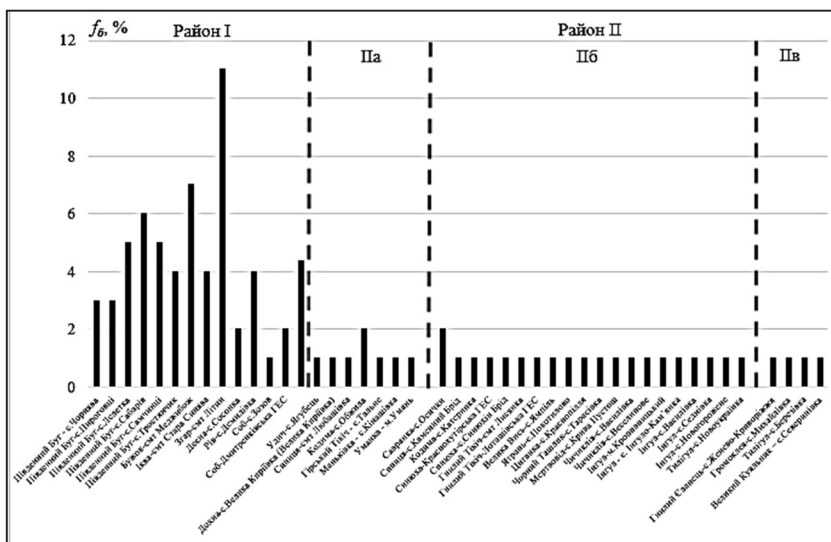


Рисунок 1.12 – Заболоченість водозборів в басейні р. Південний Буг,
у відсотках від загальної площі басейну

1.5 Кліматична характеристика басейну р. Південний Буг

Основні риси клімату описуваної території формуються під впливом загальних і місцевих кліматоутворюючих факторів. Властивості різних повітряних мас, які надходять з Атлантики, Арктичного басейну або з великих континентальних територій Євразії визначають часту мінливість погоди, характерну для України. При надходженні континентального повітря погода відрізняється сухістю, високими температурами в теплу пору року, низькими - у холодну.

Атлантичне повітря звичайно насичене вологою: взимку воно приносить потепління, влітку – дощі та прохолоду. Найчастіше атлантичні повітряні маси спостерігаються на північному заході території, рідше – на південному сході. Маси арктичного повітря надходять з півночі та північного сходу і звичайно приносять похолодання. Іноді це сухе холодне повітря, просуваючись на південь, швидко прогрівається і сприяє розвитку суховіїв [1], [61]. Кліматична характеристика басейну р. Південний Буг виконана за літературними джерелами [1], [61]-[63], середньобагаторічними метеорологічними та агрометеорологічними характеристиками – [64]-[67] та даними Українського гідрометеорологічного центру Державної служби України з надзвичайних ситуацій (УкрГМЦ) [68].

1.5.1 Температура повітря, глибина промерзання ґрунтів, наявність відлиг

Температурний режим залежить від радіаційних чинників і властивостей повітряних потоків, які надходять на дану територію. Суттєву роль відіграє підстильна поверхня, рослинний і сніговий покрив.

Середньорічна температура повітря для більшої частини території складає 7,1-8,0 °С, на півдні – 8,3-10,1 °С. Внутрішньорічний хід середньомісячних, середньомісячних максимальних і мінімальних температур повітря (°С) (осереднених за період з 1899 по 2018 рік [68]) на метеорологічних станціях, що рівномірно охоплюють територію басейну р. Південний Буг (Хмельницький, Умань, Вознесенськ), наведено на рис. 1.13.

Найбільш холодна частина зими збігається з переходом температури повітря через -5°С, що зазвичай відбувається в першій декаді січня [61]. Тому в річному ході температури повітря найхолоднішим місяцем є січень.

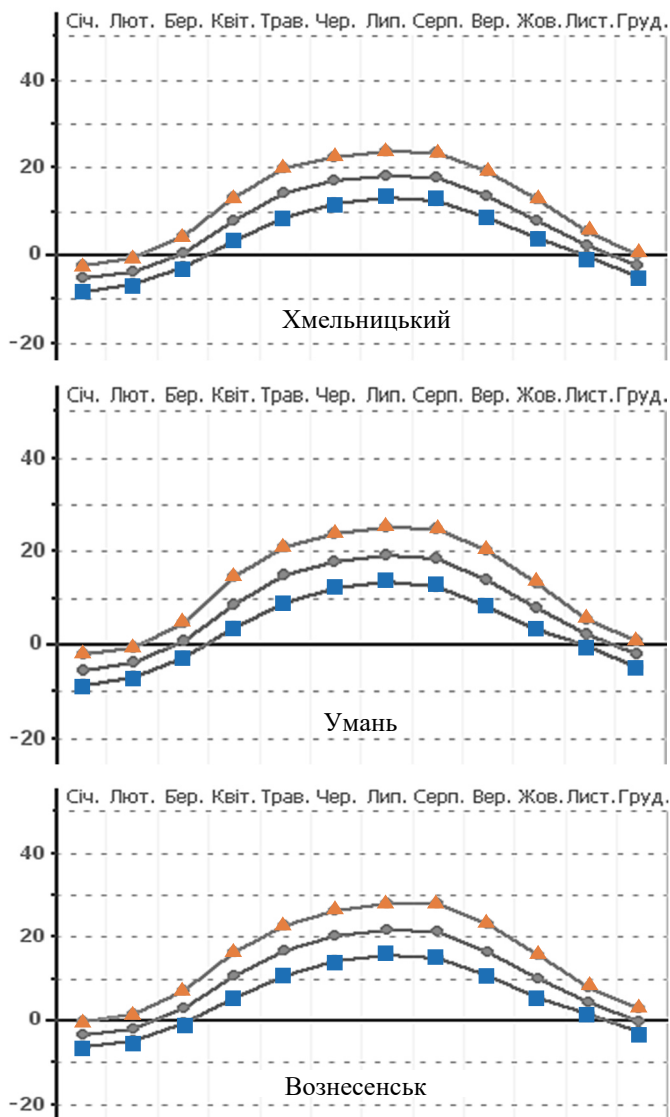


Рисунок 1.13 – Внутрішньорічний хід температур повітря ($^{\circ}\text{C}$) на метеорологічних станціях в басейні р. Південний Буг (у період 1899-2018 рр. за даними [68])

Умовні позначення:

● – середньомісячні температури повітря;
 ▲ – максимальні і ■ – мінімальні середньомісячні температури повітря;

Температура повітря в січні по території басейну коливається від -6°C до -3°C , що ілюструє рис. 1.14.

В холодний період року температура повітря на розглядуваній території характеризується значною нестійкістю внаслідок суттєвої ролі циркуляційних процесів. Для зимового сезону характерні похмура погода, тумани та відлиги, при яких добова температура підвищується до 5°C і вище.

Кліматична весна починається з переходу температури повітря через 0°C і руйнування стійкого снігового покриву.

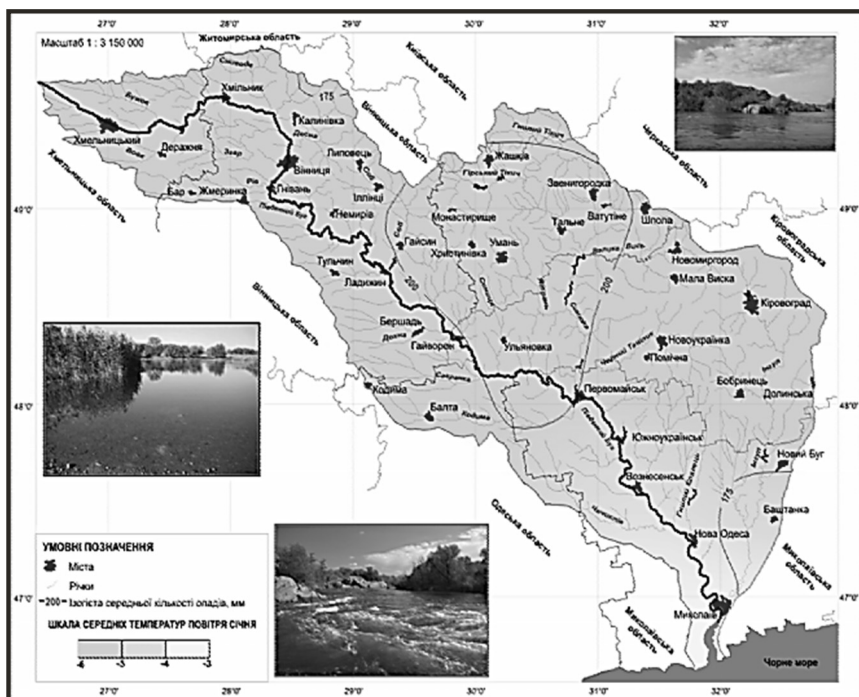


Рисунок 1.14 – Середня температура повітря січня та кількість опадів за холодний період року (листопад-березень) в басейні р. Південний Буг [2]

Дати стійкого переходу середньодобової температури повітря через 0°C весною (1986-2005 рр.) представлено у табл. 1.6 [69].

Таблиця 1.6 – Дати стійкого переходу середньодобової температури повітря через 0°C весною (1986-2005 рр.) [69]

Метеорологічні станції	Найраніша дата	Рік	Середня дата	Найпізніша дата	Рік
Хмельницький	10.I	1989	15.III	1.IV	1996
Умань	10.I	1989	12.III	28.III	1987, 1996
Вінниця	11.I	1990	14.III	28.III	1996
Кіровоград	11.I	1990	13.III	28.III	1987, 1996
Баштанка	10.I	1989, 1990	7.III	25.III	2003

Середні дати переходу температури повітря через 0°C весною в середньому припадають на 12-15 березня, а на крайньому півдні – на 7 березня (ст. Баштанка). Найраніша дата відмічалася 10-11 січня (у 1989, 1990 рр.), найпізніша – 25 березня-1 квітня (у 1987, 1996, 2003 рр.).

В останні десятиліття перехід температури повітря через 0°C весною відбувається раніше [63], [69]. Так, у роботі [69] порівнюючи середні дати стійкого переходу середньої добової температури повітря через 0°C весною у період 1991–2005 рр. з кліматичною стандартною нормою (1961–1990 рр.) отримано, що різниця цих дат становить 12-14 днів в бік більш ранніх.

У теплий період року до території надходить тропічне повітря, його вторгнення сприяє настанню жаркої погоди. Найтеплішим місяцем є липень. Температура повітря в липні по території басейну коливається від 18°C до 22°C (рис. 1.15).

Початок осені пов'язаний з переходом температури повітря через 10°C в сторону зниження. Триває осінь 2-3 місяці. У другій половині осіннього періоду можливі потепління. Для пізньої осені характерна волога, похмура погода. Перші заморозки в середньому спостерігаються 10-15 жовтня, але їх дати коливаються від 8 вересня до 20 листопада [64].

Протягом другої половини листопада осінь змінюється періодом передзим'я з нестійкою погодою, частими туманами, ожеледцями й короткочасними утвореннями сніжного покриву. В середньому цей період триває протягом місяця. У рідких випадках зима встановлюється відразу й перехідного періоду майже не буває [61].

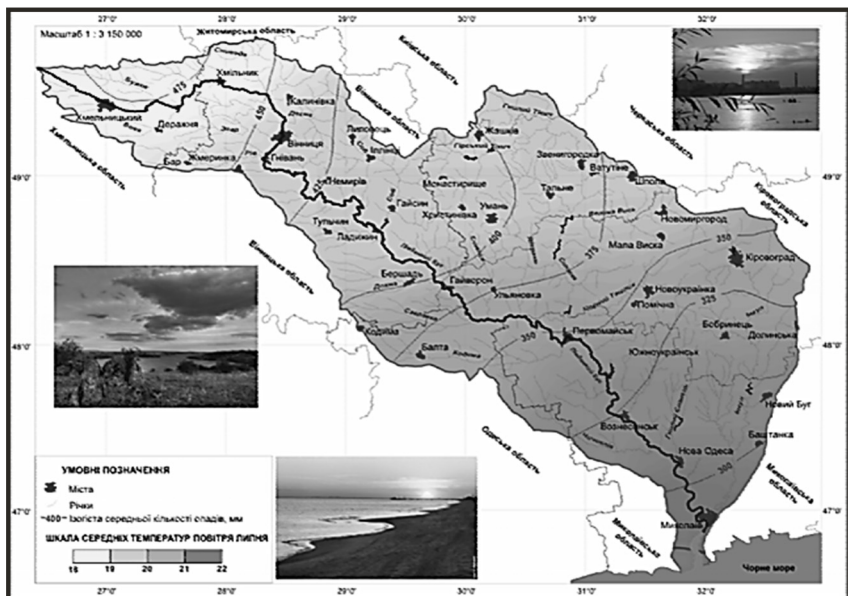


Рисунок 1.15 – Середня температура повітря липня та кількість опадів за теплий період року (квітень-жовтень) в басейні р. Південний Буг [2]

В басейні р. Південний Буг спостерігаються часті *зимові відлиги*, які призводять протягом зими до часткового, а іноді й до повного танення снігу на басейнах та формуванню зимових паводків.

В північно-західній та центральній частинах басейну р. Південний Буг середня кількість днів із відлигою (за грудень-лютий) становить 48-51, на півдні – 52-60 днів (як середня за період 1986-2005 рр. [65]-[67]) (табл. 1.7).

Найбільша кількість днів із відлигою за холодний період досягала 72-79. У періоди зимових відлиг на поверхні ґрунту часто утворюється крижана кірка, що зменшує водопроникність ґрунтів річкового басейну.

Температурний режим холодного періоду значно впливає на *глибину промерзання ґрунтів*, яка є одним з основних чинників водопоглинаючої спроможності ґрунтів, тобто втрат талих вод на інфільтрацію в період формування весняного водопілля.

Глибина промерзання ґрунтів визначається, головним чином, тривалістю морозного періоду і мінімальними мінусовими значеннями температур повітря і ґрунту. Іноді, промерзання ґрунтів в басейні р. Південний Буг спостерігається вже в листопаді.

Таблиця 1.7 – Кількість днів із відлигою в басейні р. Південний Буг (як середня за період 1986-2005 рр. за даними [65]-[67])

Показник	ХІІ	І	ІІ	За період ХІІ–ІІ
Хмільник				
Середня	16	15	17	48
Найбільша	28	27	28	72
Рік	1994	1994	2002	1988-1989
Жмеринка				
Середня	15	15	18	48
Найбільша	26	25	28	73
Рік	1994	1994	2002	1993-1994
Гайсин				
Середня	17	16	18	51
Найбільша	27	29	28	76
Рік	1994	1994	2002	1988-1989
Любашівка				
Середня	18	16	18	52
Найбільша	28	29	28	75
Рік	1993	1994	2002	1988-1989
Сербка				
Середня	21	18	21	60
Найбільша	29	30	28	79
Рік	2004	1994	2002	1993-1994

Проте на більшості території, особливо на півдні, промерзання ґрунтів починається тільки в грудні (для періоду 1986-2005 рр.) [65]-[67] (рис. 1.16).

Теплі зими в останні десятиліття суттєво впливають на температурні умови промерзання ґрунтів. Воно стає слабкішим протягом всього холодного періоду. Тривалість днів зі стійким промерзанням зменшується в широтному напрямку – з півночі на південь і в середньому в басейні р. Південний Буг становить 50-100 днів. У більш теплі зими число днів зі стійким промерзанням ґрунтів скорочується до 30 днів [61]. На більшій частині території басейну р. Південний Буг найбільша з середніх глибина промерзання ґрунтів спостерігалася у лютому і становила порядку 28-32 см (рис. 1.16).

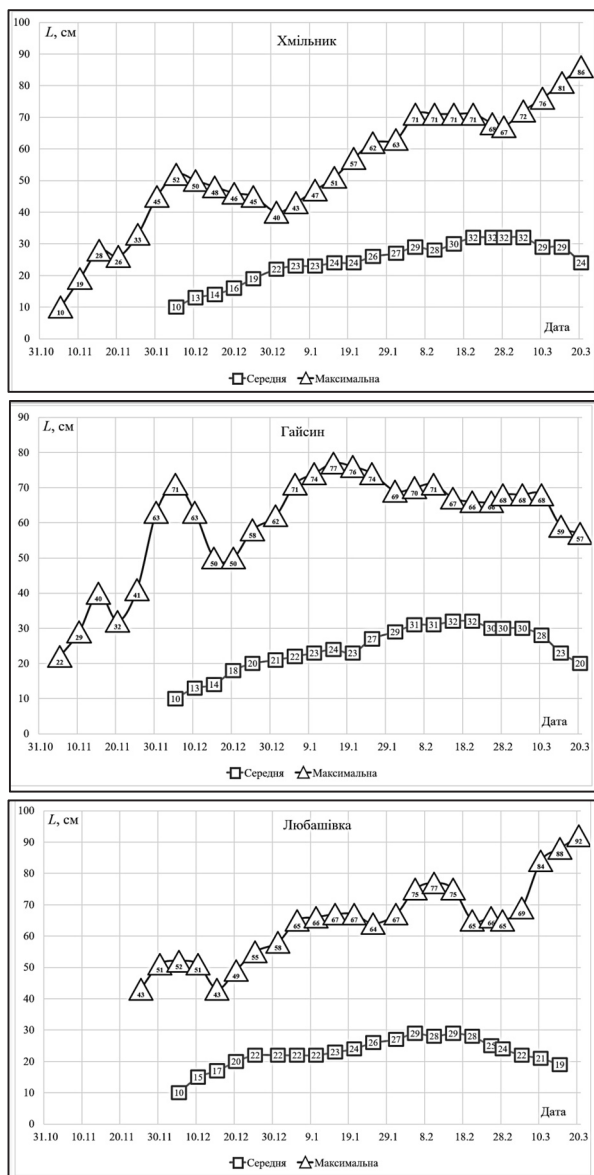


Рисунок 1.16 – Глибина промерзання ґрунтів (см) на полях з озимими зерновими культурами в басейні р. Південний Буг (у період 1986-2005 рр. за даними [65], [67])

Головним чинником втрат талих вод на інфільтрацію в період формування весняного водопілля є *максимальна* глибина промерзання ґрунту. На рис. 1.16 показані максимальні глибини промерзання ґрунтів, які досягають 75-90 см. Відтанення ґрунтів починається після руйнування снігового покриву або після переходу температури повітря через 0° С в сторону збільшення і триває переважно декілька тижнів. Найбільш ранні строки відтанення відмічені на початку лютого, найбільш пізні – у першій декаді квітня [64].

Таким чином, температурний режим повітря зимово-весняного сезону на розглядуваній території басейну р. Південний Буг характеризується нестійкими зимами, що викликає не значне промерзання ґрунтів, несталі умови накопичення снігу взимку та його танення навесні. Теплі зими на розглядуваній території призводять до виникнення відлиг, часткового танення снігу, його перерозподілу по басейну, відтанення ґрунтів, що викликає складні умови формування стоку весняного водопілля в басейні р. Південний Буг.

1.5.2 Атмосферні опади, характеристика снігового покриву та вологість ґрунтів

Однією з головних складових формування гідрологічного режиму весняного водопілля річок в басейні р. Південний Буг є *атмосферні опади*, які випадають на поверхню водозбору у вигляді снігу та дощів [1].

Середньобагаторічна кількість річних атмосферних опадів зменшується з півночі (від 650 мм) на південь (до 450 мм) [61] території. Внутрішньорічний хід середньомісячної та максимальної кількості опадів (мм) з поправками на змочування (осереднених за період з 1899 по 2018 рр. [68]) на метеорологічних станціях в басейні р. Південний Буг наведено на рис. 1.17. Середня кількість опадів за холодний період року (листопад-березень) в басейні р. Південний Буг змінюється від 175-200 мм у верхній північно-західній та центральній частинах басейну, а на крайньому півдні становить 175 мм, що ілюструє рис. 1.14. За теплий період року (квітень-жовтень) середня кількість опадів змінюється у верхній частині басейну від 400-350 мм, в центральній – 400-435 мм та 350-300 мм на півдні досліджуваної території (рис. 1.15).

Запаси води в сніговому покриві. В період весняного водопілля основним джерелом живлення річок басейну Південного Бугу є запаси води в сніговому покриві, які накопичилися наприкінці зими [70], [71].

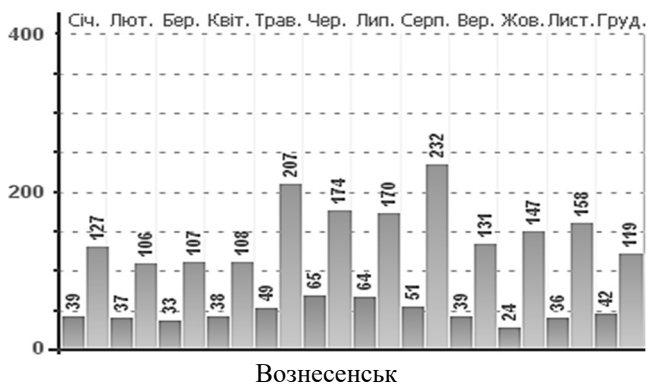
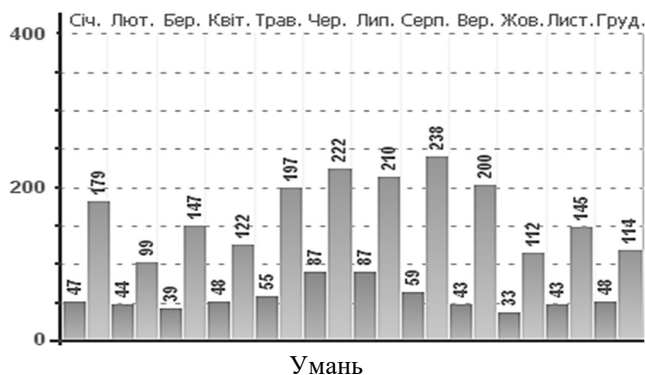
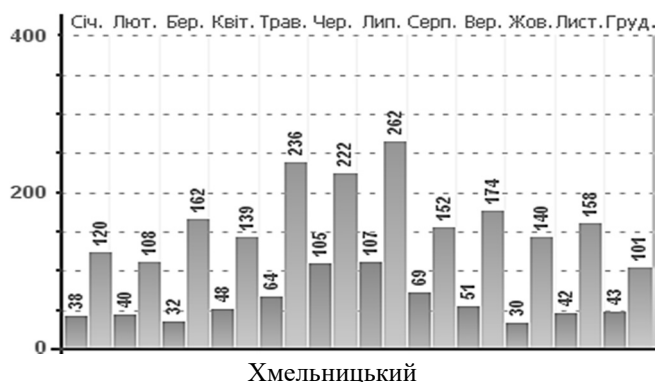


Рисунок 1.17 – Внутрішньорічний хід кількості опадів (мм) з поправками на змочування (у період 1899-2018 рр. за даними [68])

Умовні позначення:

■ – середньомісячна кількість опадів; ■ – максимальна кількість опадів

Сніговий покрив у межах досліджуваної території характеризується значною нестійкістю. Строки випадіння і сходу снігового покриву та тривалість його накопичення значною мірою залежать від погодних умов і з року в рік можуть сильно варіювати, помітно відрізняючись від середньобаторічних їх значень [1], [61].

Перший випавший сніг лише в окремі роки, при сталому морозному періоді, зберігається всю зиму; найчастіше він сходить повністю, а потім утворюється новий. В північно-західній частині басейну сніговий покрив частіше з'являється в листопаді, в центральній та південній частинах басейну – в першій декаді грудня. Стійкий сніговий покрив, на більшій частині території басейну утворюється 26-28 грудня. На півдні території стійкий сніговий покрив спостерігається менше як у 25 % зим [61].

Середня кількість днів зі сніговим покривом за зиму (за період 1986-2005 рр.) поступово зменшується від 76-71 днів на півночі та північному заході басейну до 60 днів в центрі та 30-25 днів – на крайньому півдні [65]-[67].

В окремі роки найбільша кількість днів зі сніговим покривом може досягати 135 днів на півночі басейну (1995-1996 р., ст. Вінниця) та 122 дні на півдні (1995-1996 р., ст. Любашівка), а найменша кількість днів зі сніговим покривом становила 39 днів на півночі (1989-1990 р., ст. Вінниця) та 8 днів на півдні території (1993-1994 р., ст. Любашівка).

Висота снігового покриву (см) на останній день декади взимку в басейні р. Південний Буг представлена на рис. 1.18. Найбільша вона у січні-лютому (досягає 39-54 см), а середні величини коливаються в межах 10 см (як середня за період 1986-2005 рр. [65]-[67]).

При переході температури повітря через 0°C навесні починається сніготанення. Дати початку сніготанення на півночі території припадають на кінець першої-другої декади березня, а на півдні – на початок березня.

Руйнування стійкого снігового покриву в середньому по території відбувається 1-5 березня, хоча в окремі роки ці дати можуть коливатися від 14 січня до 2 квітня [64].

Для прогнозу характеристик весняного водопілля річок найбільш важливим фактором надходження води на водозбір є *максимальні* перед початком весняного сніготанення запаси води в сніговому покриві, які визначаються за даними снігомірних зйомок.

Зміна методики снігомірних зйомок з зими 1965-1966 рр. обумовила для багатьох областей Європейської частини території колишнього СРСР порушення однорідності рядів снігомірних спостережень.

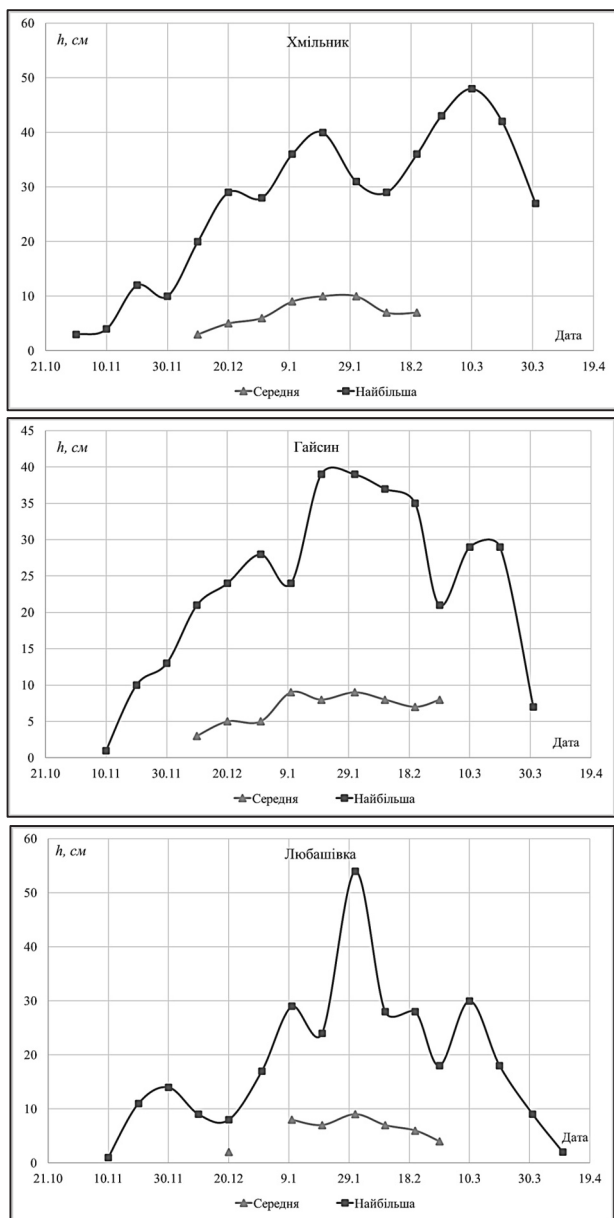


Рисунок 1.18 – Висота снігового покриву (см) на останній день декади за даними спостережень на метеорологічному майданчику (у період 1986-2005 рр. за даними [65], [67])

За новою методикою снігомірних зйомок вимірювані снігозапаси стали дещо більші [52], тому при аналізі формування снігу на басейнах необхідно враховувати зміну методики його виміру.

Дослідження [70] розподілу снігу на поверхні водозбору показує, що він має вкрай нерівномірний характер і безперечно залежить від типу підстильної поверхні та метеорологічних умов періоду снігонакопичення в кожному конкретному році. Протягом останніх десятиріч (1988-1992, 2008, 2009, 2015, 2018 рр.) спостерігаються несталі умови снігонакопичення, а в деякі роки сніг на водозборі майже відсутній (2019, 2020 рр.). При цьому найбільші за величиною запаси води в сніговому покриві можуть спостерігатися й перед зимовою відлигою. Тому, при прогнозі характеристик весняного водопілля важливо приймати максимальні запаси води в сніговому покриві (з урахуванням запасів води в льодяній кірці) безпосередньо перед весняним водопіллям.

Вологість ґрунтів. Атмосферні опади, які випадають на поверхню водозбору восени та танення снігу під час зимових відлиг сприяють додатковому зволоженню ґрунтів в цей період, що зменшує втрати води на інфільтрацію у весняний період року.

Як показник зволоження ґрунтів приймають запаси продуктивної вологи у метровому шарі ґрунту (W_{0-100}), які вимірюються на полях з озимими культурами (табл. 1.8). Так, спостерігається збільшення запасів вологи в ґрунті внаслідок випадіння опадів (наприклад, у листопаді до 20-60 мм), та до кінця зими внаслідок відлиг – до 15-29 мм (табл. 1.8).

Таблиця 1.8 – Середньобогаторічні запаси продуктивної вологи (мм) в метровому шарі ґрунту (W_{0-100}) на полях з озимими культурами в басейні р. Південний Буг (як середня за період 1986-2005 рр. за даними [65]-[67])

Шар ґрунту, см	XI			II	III		IV		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Хмільник									
Ґрунт - чорнозем глибокий малогумусний середньосуглинковий									
0 - 100	155	167	173	185		185	189	174	174
Жмеринка									
Ґрунт - сірий опідзолений слабозмитий середньосуглинковий									
0 - 100	130	155		188		184	179	172	170

Кінець таблиці 1.8

Шар ґрунту, см	XI			II	III		IV		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Гайсин									
Ґрунт - сірий лісовий опідзолений середньосуглинковий									
0 - 100	122	124	128			157	153	152	159
Любашівка									
Чорнозем глибокий легкоглинистий									
0 - 100	93	113	114		129	129	129	128	125
Сербка									
Чорнозем звичайний легкоглинистий									
0 - 100	82	134	143		142	145	141	143	131

Таким чином, атмосферні опади у вигляді снігового покриву та дощів є основними чинниками у формуванні весняного водопілля в басейні р. Південний Буг. Проте, зимові відлиги негативно впливають головний чинник весняного стоку – максимальні запаси води в сніговому покриві.

Так, максимальні снігозапаси можуть спостерігатися перед відлигою і, тому, вони безпосередньо не впливають на формування стоку весняного водопілля. Але, зимові відлиги та опади значною мірою визначають збільшення запасів вологи в ґрунті взимку, що зменшує втрати води на інфільтрацію під час формування весняного стоку річок.

1.5.3 Вологість повітря та вітровий режим

Важливу роль у формуванні клімату України відіграє *вологість повітря*, яка залежить від температурних та циркуляційних особливостей території, фізико-географічних умов місцевості, пори року, стану ґрунту, наявності джерел випаровування та інших чинників [1], [61].

Від вологості повітря залежить інтенсивність випаровування з поверхні снігу та ґрунту, що впливає на втрати талої води в період формування весняного водопілля [1]. Основна частина вологи, що надходить в Україну міститься в повітрі, яке поступає із Середземного моря та Атлантичного

океану. Низький вміст вологи містять повітряні маси, що надходять з Арктики [1], [61]. Значний вплив на вологість повітря має рельєф місцевості та наявність моря. У зв'язку з цим вологість повітря в басейні р. Південний Буг змінюється з північного заходу на південь.

Вологість повітря характеризується парціальним тиском водяної пари (абсолютною вологістю), відносною вологістю, тобто відношенням абсолютної вологості до її максимального значення при заданій температурі та дефіцитом вологості повітря [61]. Взимку відмічається найменша мінливість відносної вологості повітря в басейні р. Південний Буг – 1-2 %. При цьому, середньомісячні її значення досягають найбільших значень і становлять близько 84-87 % за зимовий сезон.

У зимовий період року на досліджуваній території майже повністю відсутнє випаровування, що пояснюється значною хмарністю та опадами, повітря в цей період близьке до стану насичення. Весною спостерігається підвищення температури повітря і дефіцит насичення водяної пари швидко зростає, особливо вдень [61], [72].

Парціальний тиск водяної пари в басейні р. Південний Буг в середньому за рік змінюється незначно. Взимку середньомісячні значення парціального тиску водяної пари становлять в північно-західній частині басейну – 4,0-5,0 гПа, в центральній – 4,0-5,0 гПа та південній – 4,7-5,6 гПа. Весною підвищення температури повітря зумовлює збільшення випаровування з вологого після зими ґрунту, що призводить до підвищення парціального тиску водяної пари. В період з лютого по березень парціальний тиск збільшується на 1,2 гПа; з березня по квітень на 2,4 гПа; з квітня по травень на 3 гПа [72].

В період формування весняного водопілля втрати талої води на випаровування з поверхні снігу, що тане, за оцінками авторів [73], з врахуванням конденсації, яка зростає при збільшенні температури та відносної вологості повітря, не велике і складає усього декілька міліметрів. В період танення снігу, при підвищенні температури повітря, опираючись на дані експедиційних досліджень авторів [74], випаровування з поверхні снігу, що тане складає 5-20 мм.

Вплив *вітрового режиму* в зимовий період проявляється під час перерозподілу снігового покриву у яри, балки, річки, на підвітряні схили тане враховується маршрутними снігомірними зйомками. Режим вітру, який характеризують за напрямом і швидкістю, визначається умовами загальної циркуляції атмосфери, особливостями рельєфу та

характеристиками підстильної поверхні водозбору (лісом, наявністю водойм та ін.) [61].

Середньорічна швидкість вітру становить від 3,0 до 4,4 м/с, а максимальна досягає 34-40 м/с. Внутрішньорічна мінливість середньомісячної швидкості вітру (м/с) (у період 1899-2018 рр. за даними [68]) представлена (рис. 1.19). На північному заході басейну р. Південний Буг переважає західний напрям вітру. В центральній частині басейну та на півдні напрямками вітру, що переважають являються північний та північно-східний [68]. Добова амплітуда швидкості вітру у січні коливається у межах від 0,2 до 1,0 м/с [75].

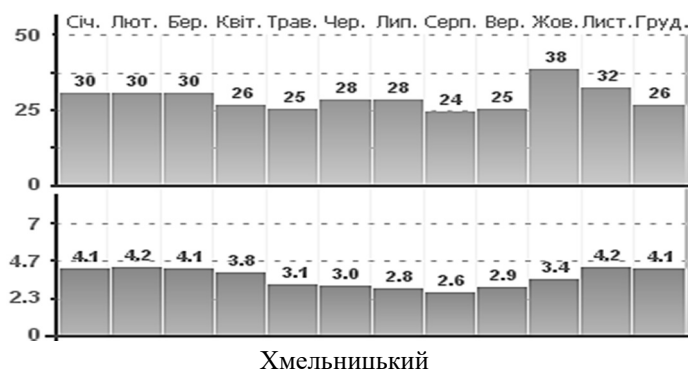
Таким чином, вітровий режим та вологість повітря визначають умови залягання снігового покриву, його перерозподіл по території та ступінь випаровування з поверхні снігу та ґрунту. В цілому можна сказати, що розглянуті кліматичні умови в басейні р. Південний Буг характеризують не сталі та складні умови формування весняного водопілля і водний режим річок в цей період.

1.6 Гідрологічний режим весняного водопілля р. Південний Буг

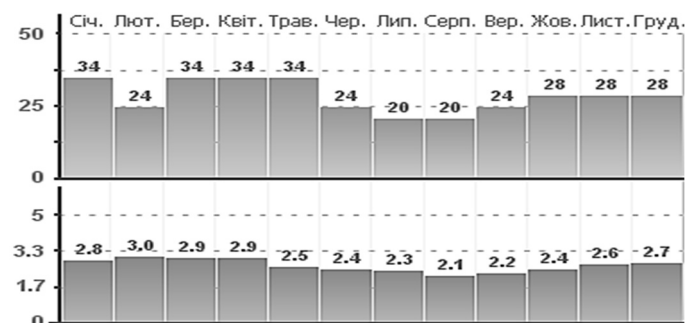
Водний режим річок визначається кліматичними, гідрогеологічними, орографічними та гідрографічними особливостями території [1], [24].

Аналіз характеристик максимального стоку весняного водопілля річок басейну р. Південний Буг виконано при залученні сучасних матеріалів спостережень станом на 2015 р., опублікованих в режимному виданні «Державний водний кадастр. Багаторічні дані про режим та ресурси поверхневих вод суші (за 2011-2015 рр. та весь період спостережень)» [76], а також даних гідрологічних спостережень у подальший період з бази даних Українського гідрометеорологічного центру Державної служби України з надзвичайних ситуацій (УкрГМЦ) [68] та даних Гідрометеорологічного центру Чорного та Азовського морів [77], що сформовані в автоматизованій системі АРМ-гідро [78].

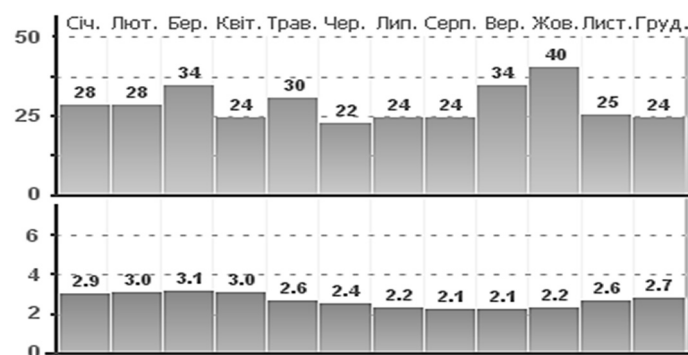
Для річок басейну р. Південний Буг весняне водопілля є характерною фазою в річному режимі стоку річок. Річки верхньої частини басейну р. Південний Буг (район І), у багаторічному розрізі, характеризуються вираженим весняним водопіллям і низькою меженню, яка у різних ступенях порушується літніми та зимовими паводками внаслідок випадіння дощів влітку і танення снігу під час відлиг взимку.



Хмельницький



Умань



Вознесенськ

Рисунок 1.19 – Внутрішньорічна мінливість швидкості вітру (м/с)
(у період 1899-2018 рр. за даними [68])

Умовні позначення:

- – середньої швидкості вітру;
- – максимальна середньомісячна швидкість вітру

Головним джерелом живлення річок у весняний період року є сніготанення та дощові опади [1], [24].

Частка весняного стоку [76] на річках у верхній частині басейну (в районі І) становить від 20 % (р. Південний Буг – с. Пирогівці) до 39 % (р. Згар – смт Літин) від річного стоку. Весняне водопілля для річок розглядуваної території в середньому за багаторічний період починається 1-6 березня. В деякі роки дати початку весняних водопіль на річках спостерігалися вже у січні (1948, 1955, 2002, 2013, 2014, 2015 рр.), а найбільш пізні – в першій декаді квітня (1980, 1996 рр.).

Гідрографи водопіль та хід рівнів води на річках у верхній частині басейну р. Південний Буг (район І) в багатоводні роки (наприклад, 1932, 1937, 1940, 1942, 1947, 1956-1958, 1969, 1970, 1980, 1998, 2003, 2006 рр.) мають добре виражену одномодальну форму. Проте, у зв'язку з зимовими відлигами, які призводять до часткового або повного танення снігу, формуються зимові паводки різної інтенсивності та водності, при цьому хід рівнів води в зимово-весняний період має багатoverшинну форму, а водопілля менш виражені (1930, 1936, 1944, 1948, 1954, 1959, 1961, 1964, 1975, 1982, 1983, 1990 рр.), особливо в останні десятиріччя (2002, 2004, 2007, 2008, 2009 рр.) [70].

Гідрографи весняного стоку для річки верхньої частини басейну (район І) (наприклад, р. Південний Буг – с. Лелітка) наведені для багатоводного 2003 р. (рис. 1.20) та маловодного 2014 р. (рис. 1.21) [68], [78].

Середньобагаторічні шари стоку весняних водопіль на річках верхньої частини басейну р. Південний Буг (в районі І) коливаються від 26 мм (р. Південний Буг – с. Селище) до 38 мм (р. Південний Буг – с. Лелітка), при найбільших значеннях до 109-136 мм (1940, 1942, 1943, 1956, 1969, 2003 рр.), а найменших 3,7-10 мм – у 1936, 1974, 1990, 1994, 2008, 2011, 2012, 2015 роках.

При цьому у 1982, 1989, 1990, 1991, 1992, 1994, 1995, 2007, 2009 роки, на низці річок, відзначено, що «Повінь не виражена».

Проходження максимальних витрат води в районі І в середньому спостерігається в другій-третьій декадах березня – 16-22 березня.

Триває водопілля на річках району І, у середньому за багаторічний період, від 40-44 до 50-58 діб. Закінчення весняного водопілля залежить від площ водозборів річок, але в середньому припадає на другу-третю декади квітня – 13-24 квітня.

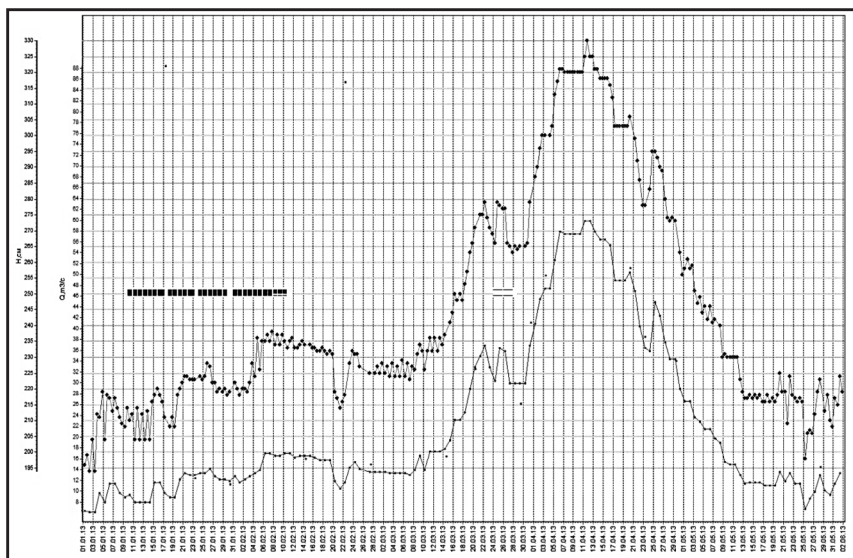


Рисунок 1.20 – Хід рівнів води та гідрограф стоку весняного водопілля у 2003 р. на р. Південний Буг – с. Лелітка (район І) [68], [78]

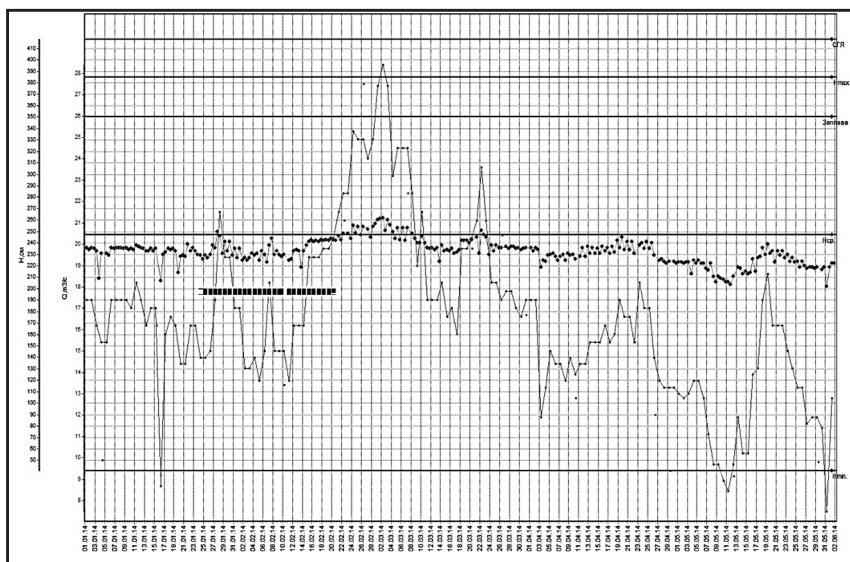


Рисунок 1.21 – Хід рівнів води та гідрограф стоку весняного водопілля у 2014 р. на р. Південний Буг – с. Лелітка (район І) [68], [78]

Річки середньої частини басейну р. Південний Буг (підрайони Па та Пб) характеризуються недостатнім зволоженням та нестійким сніговим покривом (у зв'язку з частими відлигами), які призводять до часткового або повного танення снігу і формування зимових паводків різної інтенсивності та водності [24].

Весняне водопілля нерідко проходить декількома хвилями. У періоди зимових відлиг спостерігаються паводки висотою до 1,5 м і більше. Багатоводні роки для річок підрайонів ПатаПб(1941, 1942, 1947, 1950, 1963, 1970, 1978, 1980, 1985, 1996, 2003, 2006 рр.) спостерігаються частіше, ніж маловодні. Частка весняного стоку в річному коливається у межах від 35 % на постах р. Південний Буг – с. Підгір'я та р. Ятрань – с. Покотилове до 55 % на р. Мертвовід – с. Крива Пустош. Весняне водопілля для річок розглядуваної території в середньому за багаторічний період починається 24-28 лютого. Триває водопілля на річках підрайону Пб, у середньому за багаторічний період, від 40-44 до 59-60 діб. Лише в замикальному створі на р. Південний Буг – смт Олександрівка тривалість весняного водопілля в середньому продовжується до 68 діб. Пік весняного водопілля в середньому припадає на 11-20 березня. Гідрографи весняного стоку для річки середньої частини басейну (підрайон Пб) (наприклад, р. Південний Буг – с. Підгір'я) наведені для багатоводного 2003 р. (рис. 1.22) та маловодного 2017 р. (рис. 1.23) [68], [78].

Річки нижньої частини басейну р. Південний Буг та малі річки між Дністром і Південним Бугом (підрайон Пв) характеризуються періодичним стоком під час весняного сніготанення та випаданням інтенсивних дощів. Частка його у річному стоці становить 58-61 % і, навіть, 90 % (на р. Гнилий Єланець – с. Женево-Криворіжжя).

Початок водопілля на річках припадає в середньому на першу декаду березня – 5-9 березня, а максимальні витрати води спостерігаються найчастіше в другій-третьій декаді березня – 16-26 березня. Тривалість весняного водопілля на річках розглядуваної території становить 40-45 діб, але в окремі роки може досягати 53 доби. Шари стоку весняного водопілля в підрайоні Пв в середньому коливаються в межах 2-6 мм.

Після проходження весняного водопілля малі річки, зазвичай, пересихають і відновлюють стік лише при наступному сніготаненні.

Гідрологічні пости в північно-західній частині Причорноморської низовини (включаючи деякі притоки нижньої течії басейну р. Південний Буг та малі річки між Дністром і Південним Бугом) переважно не функціонують з 1988 р.

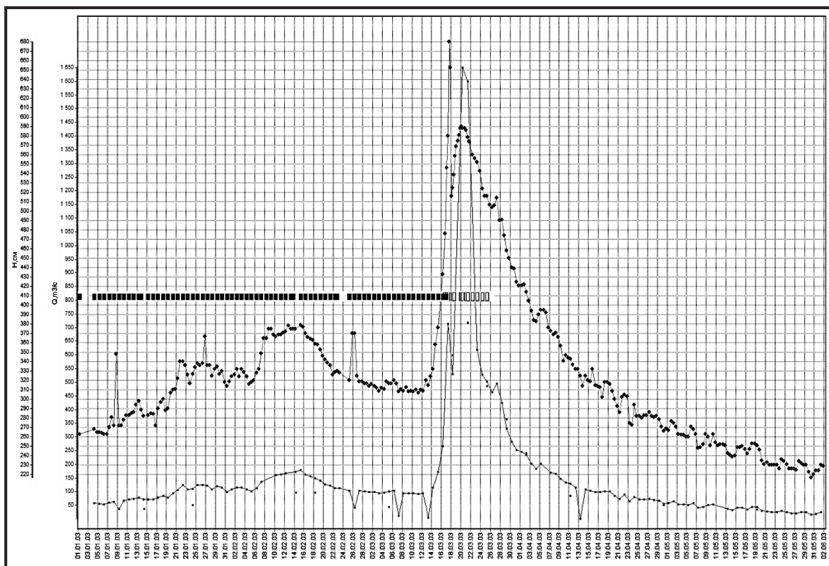


Рисунок 1.22 – Хід рівнів води та гідрограф стоку весняного водопілля у 2003 р. на р. Південний Буг – с. Підгір'я (район П6) [68], [78]

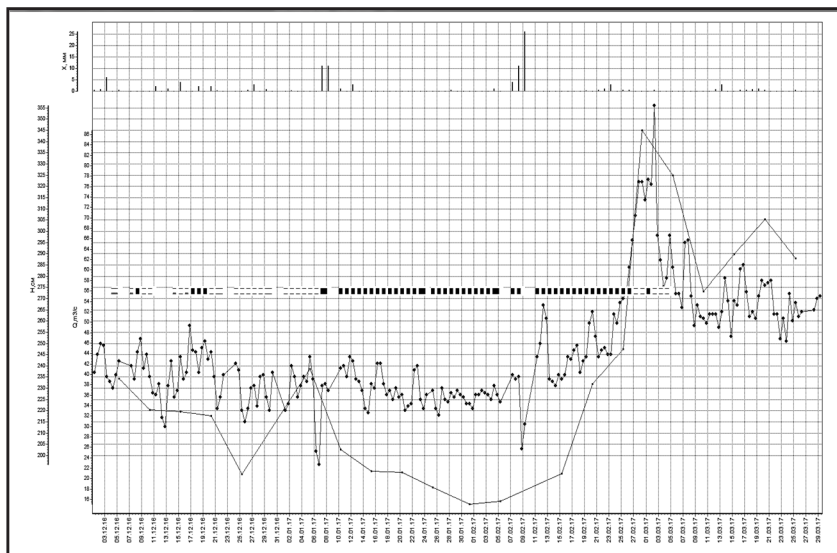


Рисунок 1.23 – Комплексний графік весняного водопілля у 2017 р. на р. Південний Буг – с. Підгір'я (район П6) [68], [78]

Під час проходження весняних водопіль, в окремі роки, можуть спостерігатися катастрофічні підйоми максимальних рівнів води на річках – від 2 до 5 м і більше (рис. 1.24), які можуть спричинити людські жертви, переселення жителів, екологічні небезпеки та фінансові збитки.

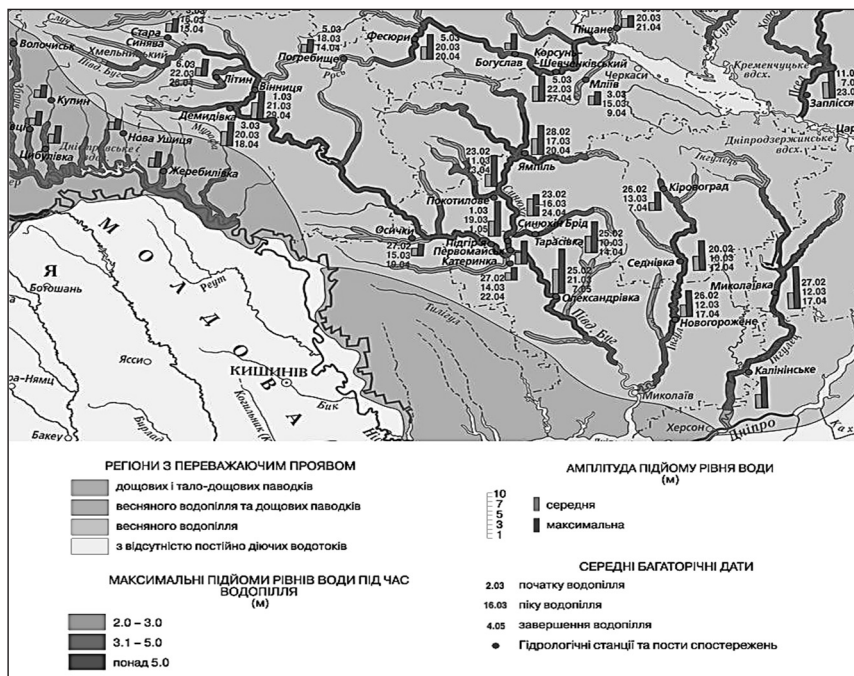


Рисунок 1.24 – Весняні водопілля та паводки в басейні р. Південний Буг [58]

Від розмірів характеристик стоку (шарів стоку, максимальних витрат та рівнів води) багато в чому залежить безпека функціонування об'єктів господарювання, населених пунктів, шосейних та залізничних шляхів сполучення, гідротехнічних споруд тощо. Основні положення Водної Паводкової Директиви (ВПД) 2007/60/ЄС Європейського Парламенту та Ради від 23 жовтня 2007 року про оцінку та управління ризиками затоплень [79], [80] спрямовані на запобігання, захист і зменшення негативного впливу повеней на здоров'я людей, довкілля, культурну

спадщину та господарську діяльність та в рамках Угоди про асоціацію між Україною та Європейським Союзом і його державами-членами [81].

У роботі виконано аналіз територій можливого підтоплення в басейні р. Південний Буг за даними автоматизованої системи АРМ-гідро [78]. Так, авторами [82] виконано огляд катастрофічних весняних водопіль за весь ретроспективний період гідрологічних спостережень в басейні р. Південний Буг, при яких спостерігалися небезпечні явища (НЯ) та стихійні гідрологічні явища (СГЯ) (рис. 1.25).

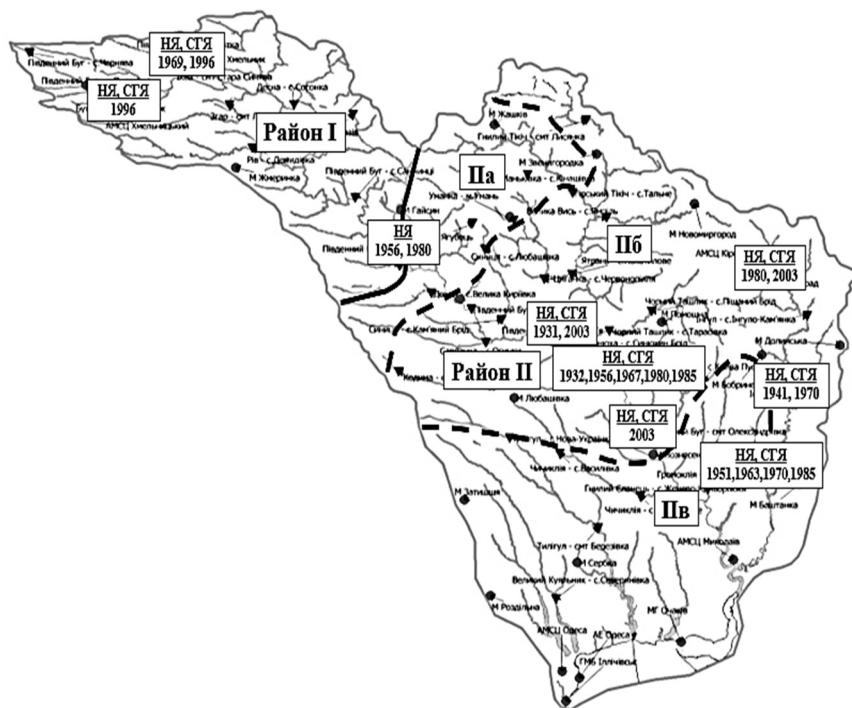


Рисунок 1.25 – Перевищення позначок НЯ та СГЯ в басейні р. Південний Буг (з початку спостережень по 2020 р.) [82]

Встановлено, що в окремі роки (1931, 1932, 1956, 1967, 1969, 1979, 1980, 1985, 1996, 2003) в різних частинах басейну р. Південний Буг спостерігалися максимальні рівні води весняного водопілля, що досягали

позначок НЯ та СГЯ і спричиняли затоплення будинків, заводів, мостів, автодоріг, зупинку роботи ГЕС та ін.

Тож, виконаний аналіз показав, що в басейні є території, які при проходженні високих весняних водопіль піддаються ризику затоплення річковими водами й тому, доцільним є застосування територіальних методів прогнозу характеристик весняного водопілля з метою попередження високих весняних водопіль, які можуть спричинити негативні наслідки на значних територіях.

1.7 Сучасні кліматичні зміни у межах басейну р. Південний Буг

На сьогодні, дослідження змін клімату України ведуться посиленими темпами, а результати цих досліджень стають все більш актуальними та потрібними [61], [63], [83]-[89]. Вони пов'язані з тривалим позитивним трендом температури повітря по всій території країни [85], збільшенням повторюваності небезпечних метеорологічних явищ у різних областях України [86], [87] і їх наслідками для погодозалежних галузей економіки, таких як, водогосподарський комплекс, аграрний сектор, транспортна, енергетична та інші галузі [5], [83], [84]. Найбільш достовірними вихідними даними для аналізу зміни клімату прийнято вважати матеріали інструментальних вимірювань на гідрометеорологічній мережі спостережень [68].

Кожного року кліматологи фіксують кліматичні рекорди, які супроводжуються аномально теплими зимами та зміщенням сезонів [87], [88]. Спостерігається перерозподіл опадів у часі та просторі [86]. Відмічається, що за останні 30 років на рівнинній території України спостерігається зменшення середньої швидкості вітру на 10-30 % [63]. Але, в окремі роки в басейні р. Південний Буг зафіксовано швидкість вітру, що перевищує 40 м/с [75].

Дослідження авторів [90] вказують, що в останні десятиріччя внаслідок підвищення температури повітря спостерігається тенденція до підвищення абсолютної вологості та, своєю чергою, зниження відносної вологості, що впливає на величину випаровування з поверхні водозборів і водойм.

Зміни клімату України яскраво відображаються і в аграрному секторі – почали вирощувати теплолюбні культури, які характерні для південних широт [83], [84]. Спостерігається зміщення меж природно-кліматичних зон країни на 100-150 км на північ [89]. Значний вплив кліматичних змін

проявляється й у гідрологічному режимі річок України [24], [90]. Підвищення температури повітря [61], [85], [87], [91], особливо у холодний період року, негативно впливає на умови формування та накопичення снігового покриву, який є основним чинником формування весняного стоку.

Автори [24], [91] відмічають багаторічну тенденцію зменшення висоти снігового покриву, запасів води в снігу, що обумовлено зростанням зимових температур повітря і повторюваності відлиг. При цьому, як об'єми, так і максимальні витрати води весняного водопілля мають тенденцію до їх зменшення для переважної більшості басейнів річок України. Слід зазначити, що автором [24] встановлено початок суттєвого впливу змін клімату на водний режим річок України, який припадає на 1989 рік.

Не виключенням є й басейн р. Південний Буг, де у холодний період року частішими стали зимові паводки, часто не виражені весняні водопілля, зміщення стоків проходження водопіль [24], [70], [91], [92]. Виконаний у роботі [93] аналіз часових тенденцій максимального річкового стоку та дат настання річкових повеней на території Європи, показує, що спостерігається тенденція до зміщення строків настання весняних водопіль через зміни великомасштабних атмосферних процесів, з якими пов'язані різниці в часі танення снігу, максимумів вологості ґрунту та ін. Так, на території правобережної України (відносно р. Дніпро), де розташований басейн р. Південний Буг спостерігається тенденція до формування зимових паводків на річках і майже не виражених весняних водопіль, тобто формування максимумів зсувається до більш ранніх зимових дат їх настання.

З метою дослідження сучасних кліматичних змін та їх вплив на формування максимального стоку весняного водопілля, у межах досліджуваної території басейну р. Південний Буг, автором у наступному пункті виконано ретроспективний (станом на 2015 р.) аналіз часових рядів гідрометеорологічних чинників і характеристик стоку весняних водопіль річок басейну р. Південний Буг.

1.8 Дослідження часових тенденцій гідрометеорологічних характеристик в умовах сучасних кліматичних змін

Різноманітність поєднання гідрометеорологічних чинників у кожному році впливають на формування весняного водопілля [38], [70], яке може бути, як екстремально високим, так і слабо вираженим. Особливо

актуальним є дослідження цих чинників в умовах коливань клімату, коли зими стали теплішими, а опади перерозподіляються у часі та просторі. Весняне водопілля у кожному році характеризується сполученням гідрометеорологічних чинників, що визначають вигляд і форму повеневої хвилі, а також максимальні витрати води.

У монографії досліджено багаторічні ряди метеорологічних та агрометеорологічних чинників та їх вплив на формування весняного стоку в басейні р. Південний Буг [70], [94]. Автори дослідили температурні умови зимово-весняного сезону у вигляді хронологічних графіків (трирічних ковзних) середньомісячних температур повітря за лютий (рис. 1.26) та березень (рис. 1.27) за багаторічний період спостережень (станом на 2015 р.), які вказують на наявність вираженої тенденції до підвищення температур повітря в ці місяці (при значущому коефіцієнті кореляції $r=0,33-0,37$), що безумовно впливає й на умови снігонакопичення на річкових водозборах.

Лінійний тренд було віднесено до значущого у випадку виконання умови $r > 2\sigma_r$, де середня квадратична похибка розрахунку коефіцієнта кореляції σ_r визначається як [95]

$$\sigma_r = \frac{1 - r^2}{\sqrt{n - 1}}, \quad (1.2)$$

де n – число років вибірки.

Так, у багаторічному розрізі (1945-2015 рр.) зміна дат настання максимальних снігозапасів (трирічні ковзні) має тенденцію до більш ранніх дат (при значущих коефіцієнтах кореляції $r=0,18-0,27$) (рис. 1.28).

Що стосується величин максимальних запасів води в сніговому покриві, то хронологічні графіки (з трирічним згладжуванням) вказують на незначну тенденцію до їх зменшення (рис. 1.29).

Водночас різницеві інтегральні криві максимальних запасів води в сніговому покриві по окремих пунктах снігомірних зйомок, які рівномірно розташовані по басейну р. Південний Буг (рис. 1.30), вказують на циклічний характер їх часових змін: з 1945 по 1960 роки спостерігається їх зменшення, надалі до 1970 року снігозапаси збільшувалися, а починаючи з 90-х років минулого сторіччя до 2015 р. знову спостерігається їх зменшення. Дослідження часових рядів снігозапасів в басейні р. Південний Буг показали, що мають місце направлені багаторічні тенденції та циклічність в їх ході.

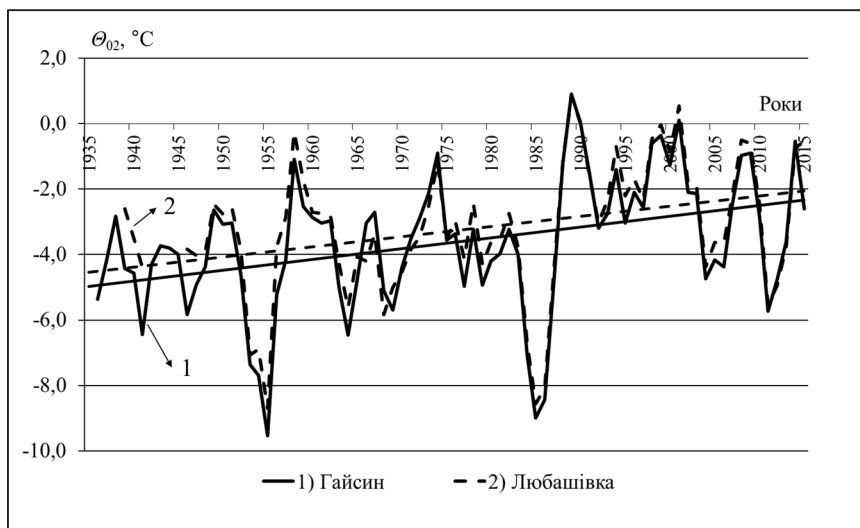


Рисунок 1.26 – Хронологічний графік (у вигляді трирічних ковзних) середньомісячних температур повітря за лютий в басейні р. Південний Буг

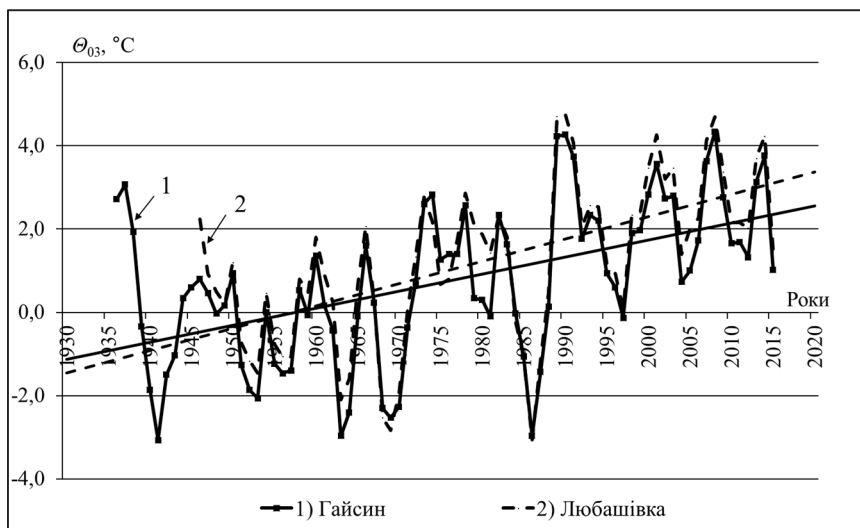


Рисунок 1.27 – Хронологічний графік (у вигляді трирічних ковзних) середньомісячних температур повітря за березень в басейні р. Південний Буг

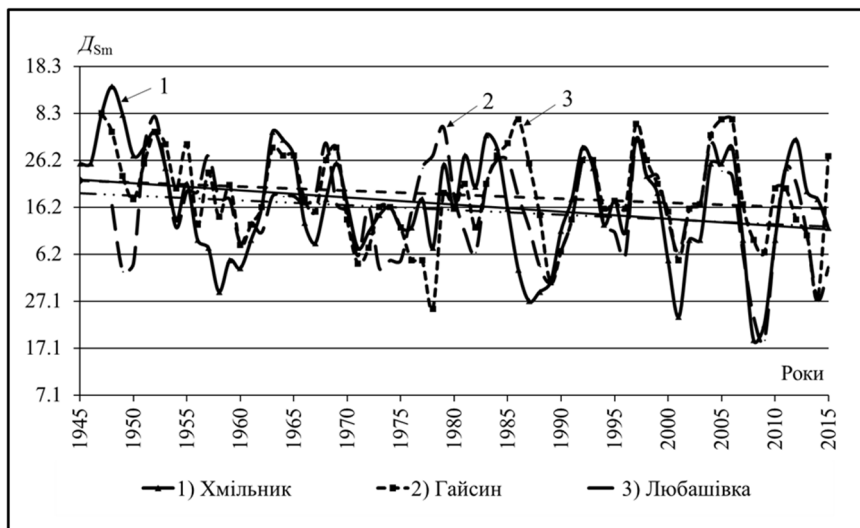


Рисунок 1.28 – Хронологічний графік (у вигляді трирічних ковзних) дат максимальних запасів води в сніговому покриві в басейні р. Південний Буг

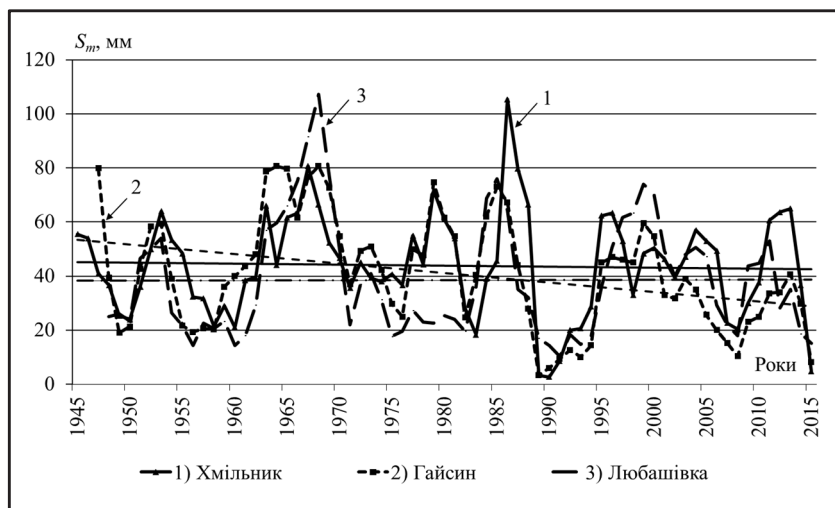


Рисунок 1.29 – Хронологічний графік (у вигляді трирічних ковзних) максимальних запасів води в сніговому покриві в басейні р. Південний Буг

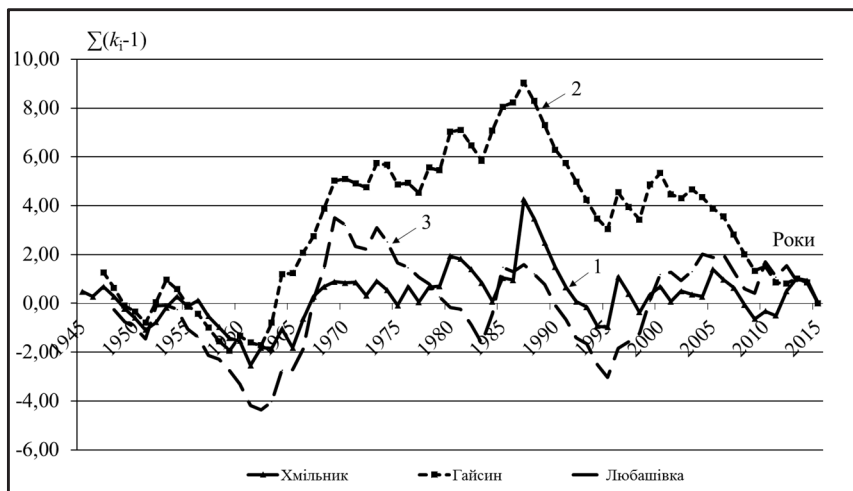


Рисунок 1.30 – Різницеви інтегральні криві максимальних запасів води в сніговому покриві басейні р. Південний Буг

Багаторічні часові ряди опадів періоду весняного водопілля річок, також як і для снігозапасів, мають циклічний характер при тенденції до їх зменшення (при значущих коефіцієнтах кореляції $r = 0,18 - 0,27$ для опадів X_1 та переважно не значущих – для опадів X_2 , окрім ст. Любашівка, де коефіцієнт кореляції значущий, $r = 0,21$). Зменшення опадів X_1 , що випадають на поверхню снігу спостерігається з початку 80-х років (рис. 1.31 та 1.32), а опадів X_2 , що випадають в більш пізній період (на поверхню водозбору після сходу снігу на басейнах) – з 1989 року минулого сторіччя (рис. 1.33 та 1.34).

У роботі, також, досліджені часові ряди характеристик втрат талої та дощової води періоду весняного водопілля на водозборі р. Південний Буг. При цьому, хронологічні графіки максимальних перед початком весняного водопілля глибин промерзання ґрунтів (у вигляді трирічних ковзних) для деяких метеорологічних станцій (рис. 1.35) вказують на виражений убутний тренд (при значущих коефіцієнтах кореляції $r = 0,43 - 0,63$).

Різницеви інтегральні криві максимальних перед початком весняного водопілля глибин промерзання ґрунтів свідчать про їх циклічний характер – з середини 60-х років минулого сторіччя глибини промерзання ґрунтів зростали, а з кінця вісімдесятих спостерігається тенденція до їх зменшення. Найбільш відчутним зменшення глибини промерзання ґрунтів в басейні спостерігається в період з 1989 р. до 2015 р. (рис. 1.36).

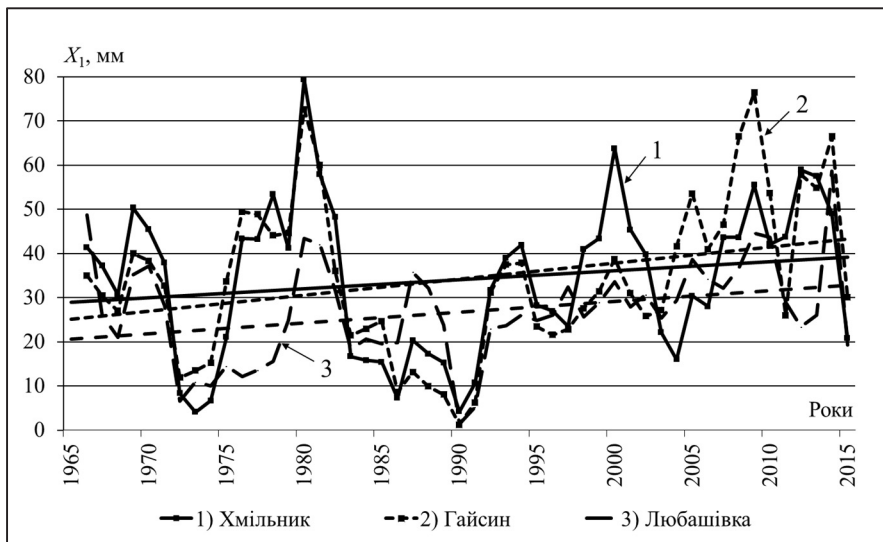


Рисунок 1.31 – Хронологічний графік (у вигляді трирічних ковзних) опадів періоду танення снігу X_1 в басейні р. Південний Буг

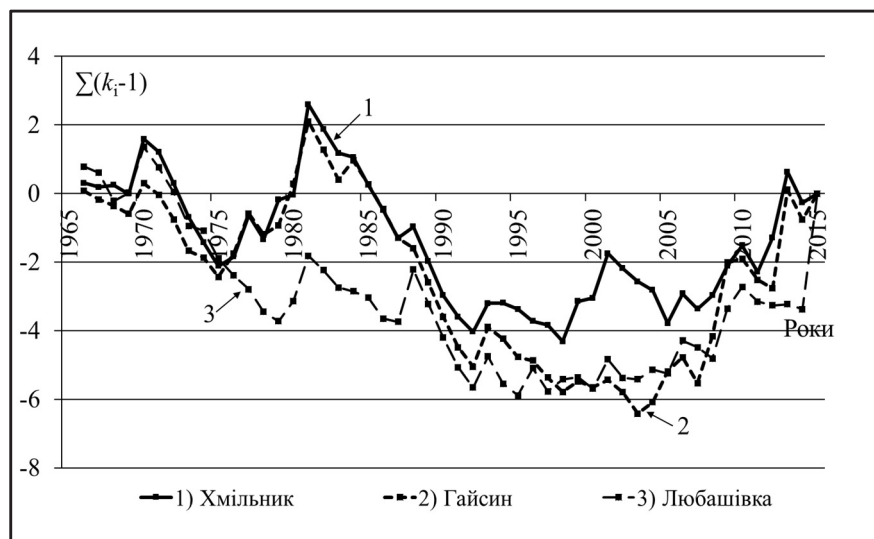


Рисунок 1.32 – Різницеви інтегральні криві опадів періоду танення снігу X_1 в басейні р. Південний Буг

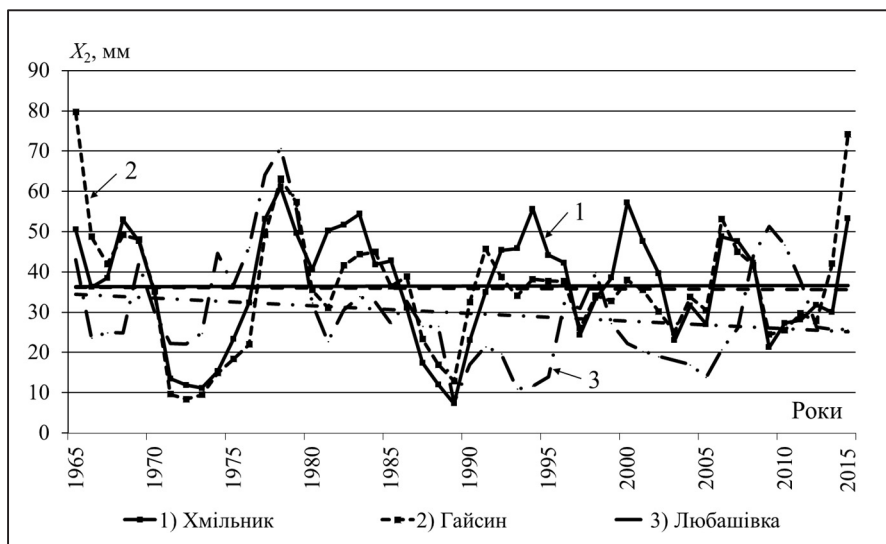


Рисунок 1.33 – Хронологічний графік (у вигляді трирічних ковзних) опадів періоду спаду весняного водопілля X_2 в басейні р. Південний Буг

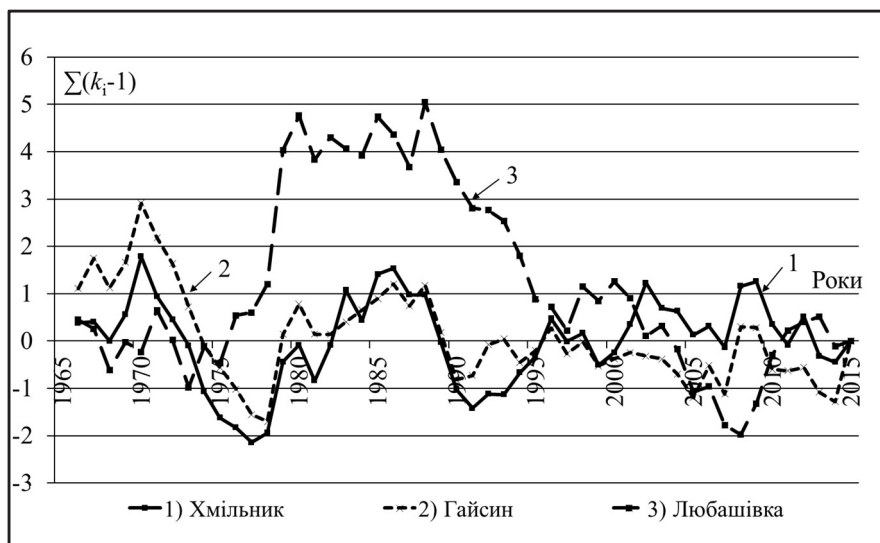


Рисунок 1.34 – Різницево-інтегральні криві опадів періоду спаду весняного водопілля X_2 в басейні р. Південний Буг

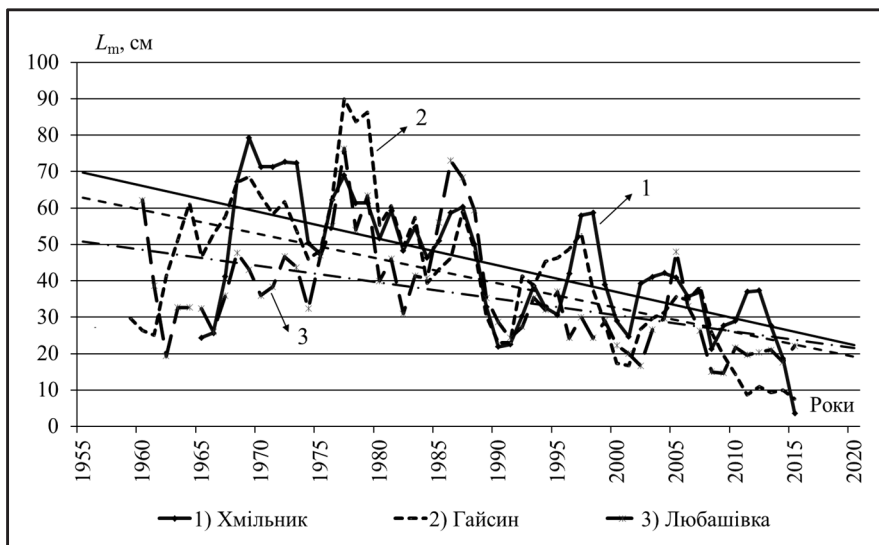


Рисунок 1.35 – Хронологічний графік (у вигляді трирічних ковзних) максимальних глибин промерзання ґрунтів в басейні р. Південний Буг

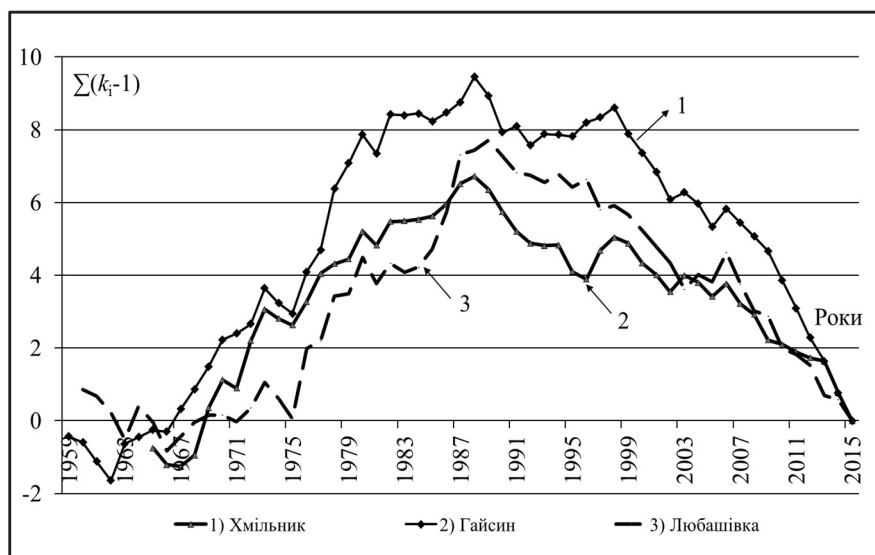


Рисунок 1.36 – Різницеви інтегральні криві максимальних глибин промерзання ґрунтів в басейні р. Південний Буг

Аналіз хронологічних графіків запасів вологи в метровому шарі ґрунту перед початком весняного водопілля показав, що спостерігаються різнонаправлені тенденції до їх змін (при значущих коефіцієнтах кореляції $r = 0,26 - 0,37$), що може бути пов'язане з типами та механічним складом ґрунтів (рис. 1.37).

В цілому, за різницевиими інтегральними кривими запасів вологи в метровому шарі ґрунту перед початком весняного водопілля з 1966 по 1989 р. спостерігалось їх зменшення, а з 90-х років до 2015 р. – збільшення, що може бути пов'язано з частими зимовими відлигами, які сприяють підвищенню вологості ґрунтів наприкінці зими (рис. 1.38).

Після виконаного аналізу основних метеорологічних та агрометеорологічних чинників формування весняного стоку річок було доцільним проаналізувати часові тенденції у гідрологічному режимі весняного водопілля річок басейну Південного Бугу (станом на 2015 р.) [70], [94], [96]. Так, строки проходження весняних водопіль, а саме дати їх початку вказують на те, що вони мають тенденції до більш ранніх строків [97]. Ці висновки підтверджуються й дослідженнями [91]-[93].

Побудовані хронологічні графіки гідрологічних характеристик весняного водопілля на річках басейну р. Південний Буг показують, що як для шарів стоку (рис. 1.39), так і для максимальних витрат води весняних водопіль (рис. 1.40) спостерігається тенденція до суттєвого зменшення досліджуваних величин (при значущих коефіцієнтах кореляції $r = 0,55 - 0,70$).

Побудовані різницеві інтегральні криві (рис. 1.41 та рис. 1.42) вказують на наявність циклічності в коливаннях стоку весняного водопілля річок досліджуваної території – підвищення стоку до 40-х років минулого століття, стабілізація його до 80-х років, а після – стрімке зменшення до 2015 р.

Побудовані сумарні криві для характеристик річкового стоку (шарів стоку та максимальних витрат води) вказують на те, що для всіх річок басейну Південного Бугу однорідність рядів порушена в час початку суттєвих впливів змін клімату на режим весняного водопілля річок території (тобто у період з кінця 1980-х років по 2015 р.). Приклад таких кривих представлено для р. Південний Буг – с. Підгір'я (рис. 1.43 та рис. 1.44).

Такі висновки досліджень часових рядів збігаються з результатами досліджень авторів [91], [99]-[101], які встановили, що для більшості рівнинних річок України часові ряди максимальних витрати води та шарів стоку весняного водопілля є неоднорідними, за циклічністю коливань є синхронними, а з кінця 80-х рр. минулого сторіччя до 2015 р. на річках спостерігається маловодна фаза (у т.ч. в басейні р. Південний Буг).

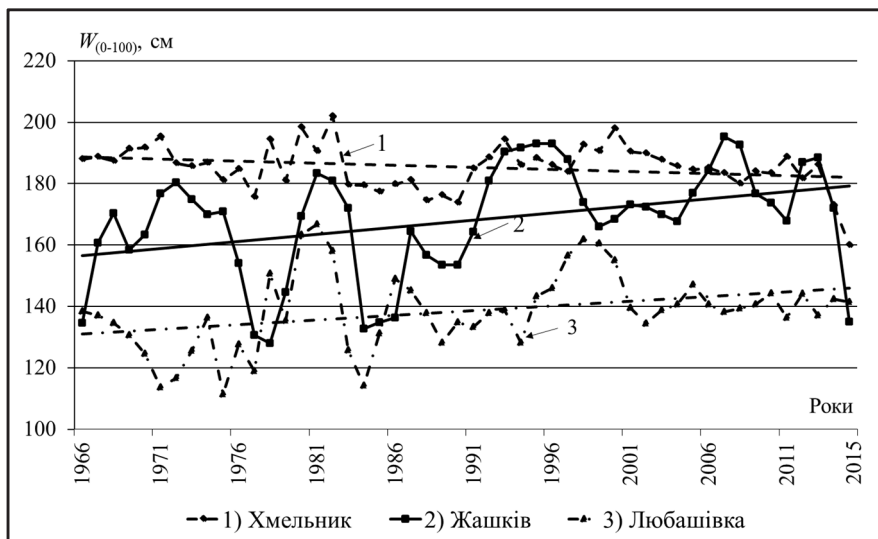


Рисунок 1.37 – Хронологічний графік (у вигляді трирічних ковзних) запасів
 вологи в метровому шарі ґрунту перед початком весняного водопілля
 в басейні р. Південний Буг

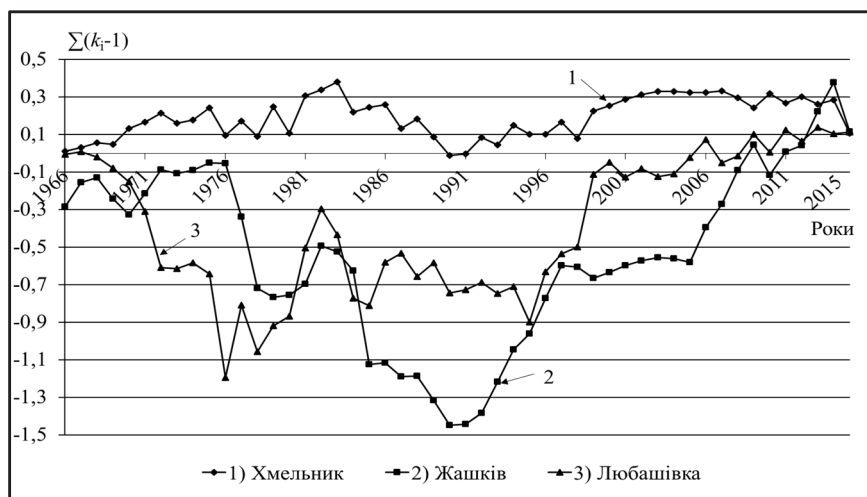


Рисунок 1.38 – Різницево-інтегральні криві запасів води в метровому шарі
 ґрунту перед початком весняного водопілля в басейні р. Південний Буг

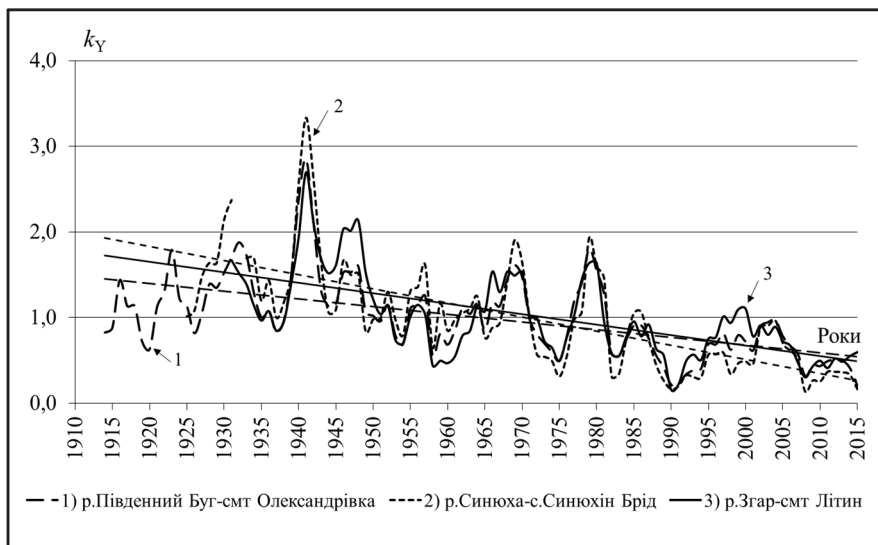


Рисунок 1.39 – Хронологічний графік (у вигляді трирічних ковзних) шарів стоку весняного водопілля у відносних величинах (по відношенню до середньобаторічної величини) в басейні р. Південний Буг (станом на 2015 р.)

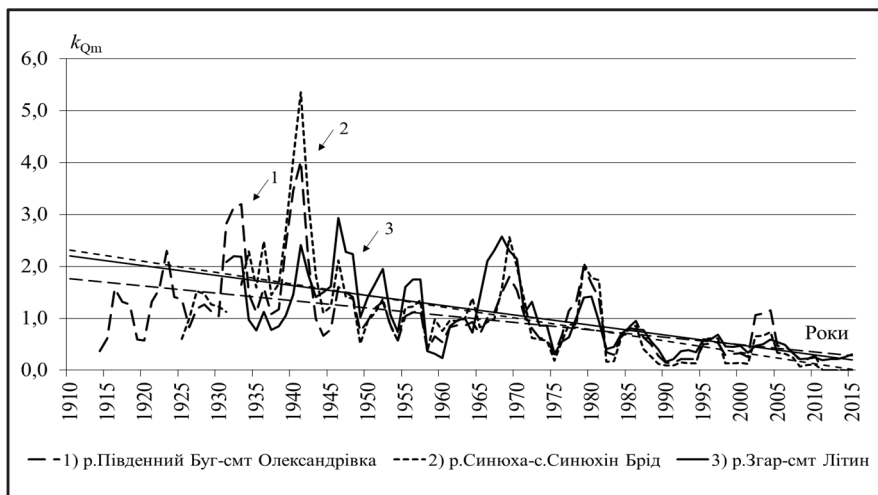


Рисунок 1.40 – Хронологічний графік (у вигляді трирічних ковзних) максимальних витрат води весняного водопілля у відносних величинах (по відношенню до середньобаторічної величини) в басейні р. Південний Буг (станом на 2015 р.)

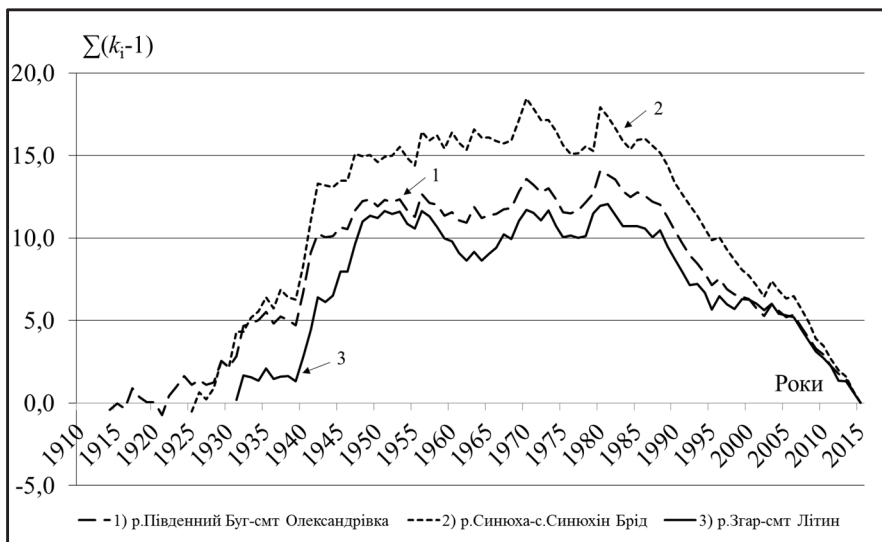


Рисунок 1.41 – Різницеви інтегральні криві шарів стоку весняного водопілля в басейні р. Південний Буг (станом на 2015 р.)

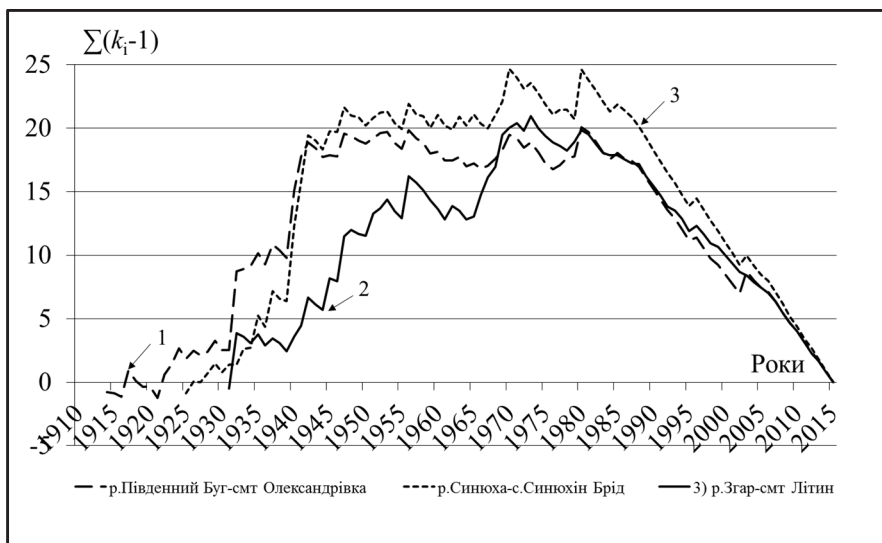


Рисунок 1.42 – Різницеви інтегральні криві максимальних витрат води весняного водопілля в басейні р. Південний Буг(станом на 2015 р.)

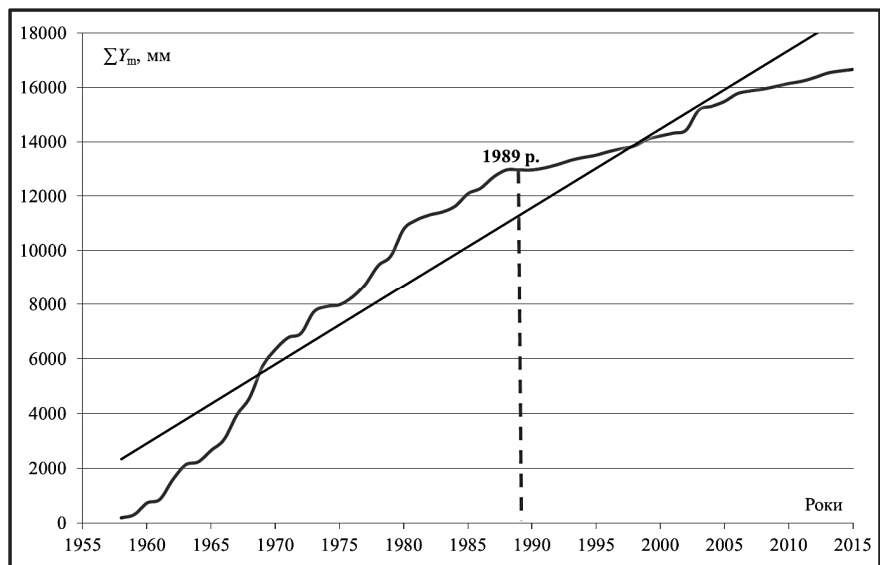


Рисунок 1.43 – Сумарні криві шарів стоку весняного водопілля на р. Південний Буг – с. Підгір'я

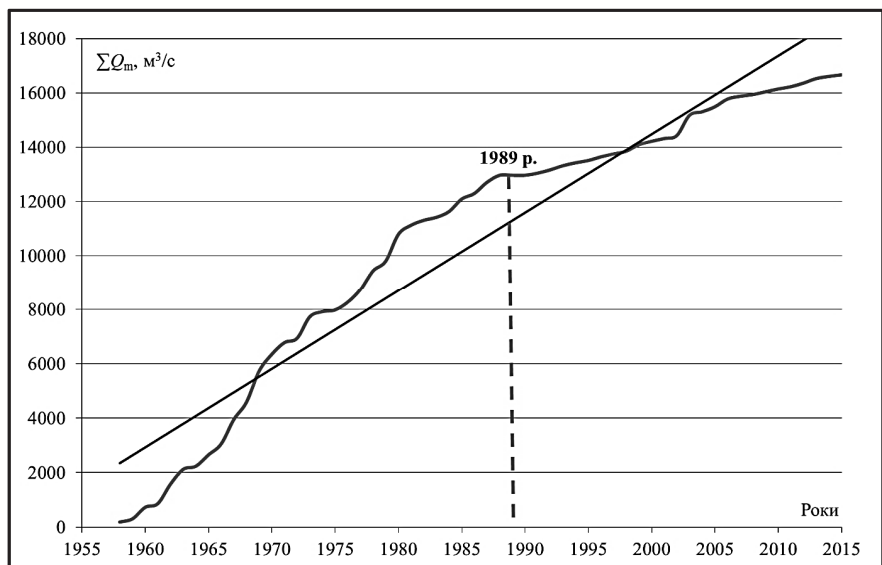


Рисунок 1.44 – Сумарні криві максимальних витрат води весняного водопілля на р. Південний Буг – с. Підгір'я

Також, неоднорідними виявилися часові ряди максимальних глибин промерзання ґрунтів, наприклад, на ст. Хмільник (рис. 1.45). В період з 1989 р. по 2015 р. спостерігається їх зменшення у зв'язку з підвищенням зимових температур повітря (рис. 1.26).

Але ж на сумарних кривих максимальних запасів води в сніговому покриві (ст. Хмільник) (рис. 1.46) такі зміни не відобразилися, а спостерігаються незначні, різнонаправлені їх відхилення.

Проаналізувавши часові тенденції та побудовані сумарні криві у метеорологічному і гідрологічному режимі весняного водопілля річок басейну р. Південний Буг можна зробити наступний висновок.

В останні десятиріччя зменшення шарів стоку та максимальних витрат води весняного водопілля (переважно в період з кінця 1980-х років), за наявності снігу на водозборах, пояснюється суттєвим зменшенням глибин промерзання ґрунтів (з 1989 р.), що обумовлює значні втрати талих і дощових вод і формування невисоких водопіль.

При цьому, окрім дослідження причин виявлення тенденцій та циклічності стокових характеристик весняного водопілля природного походження та в умовах змін клімату, доцільним є виявлення впливу антропогенних чинників, а саме – за регульовано стірічкового стоку в басейні р. Південний Буг.

1.9 Оцінка впливу зарегульованості річкового стоку в басейні р. Південний Буг на характеристики весняного водопілля

У підрозд. 1.1 було встановлено, що характерною особливістю р. Південний Буг є велика зарегульованість річки. Тут побудовано низку великих водосховищ, ГЕС та АЕС (див. рис. 1.2 та рис. 1.47).

З метою оцінки впливу зарегульованості річкового стоку на характеристики весняного водопілля в басейні р. Південний Буг в роботі побудовано сумарні криві шарів стоку весняного водопілля на постах, які зарегульовані найбільшими ГЕС (рис. 1.48 – рис. 1.50). На рис. 1.48 представлено сумарну криву для шарів стоку весняного водопілля на р. Південний Буг – с. Тростянчик ($F=17400 \text{ км}^2$).

Вище за течією даного поста розташована найбільша на р. Південний Буг – Ладжинська ГЕС ($F=13300 \text{ км}^2$, $W=150 \text{ млн м}^3$), яка введена в експлуатацію у листопаді 1964 р. і невелика – Глибочинська ГЕС ($F=17130 \text{ км}^2$, $W=10,7 \text{ млн м}^3$), яка експлуатується з 1957 р.

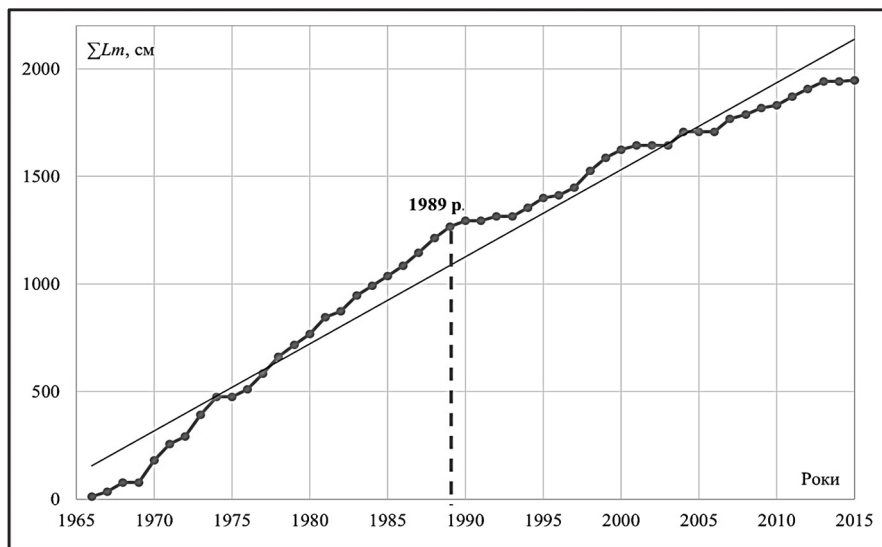


Рисунок 1.45 – Сумарні криві максимальних глибин промерзання ґрунтів на ст. Хмільник

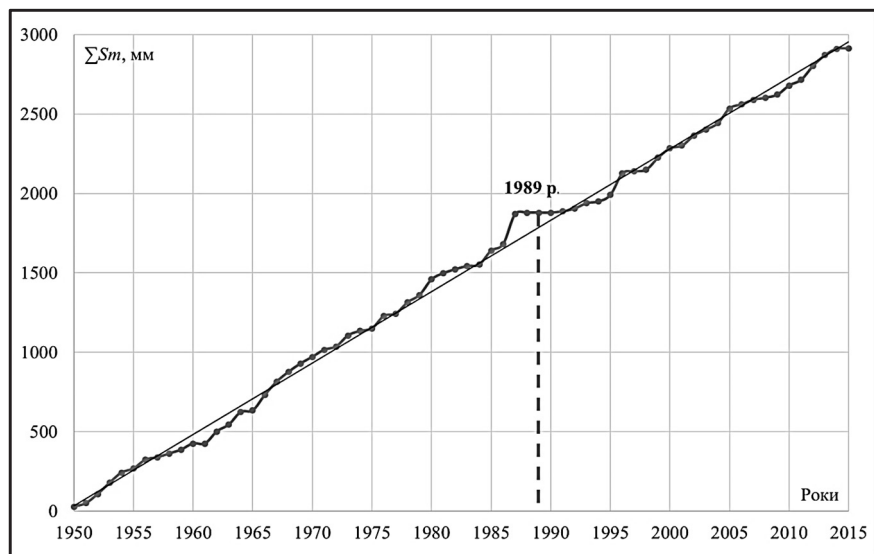


Рисунок 1.46 – Сумарні криві максимальних запасів води в сніговому покриві на ст. Хмільник

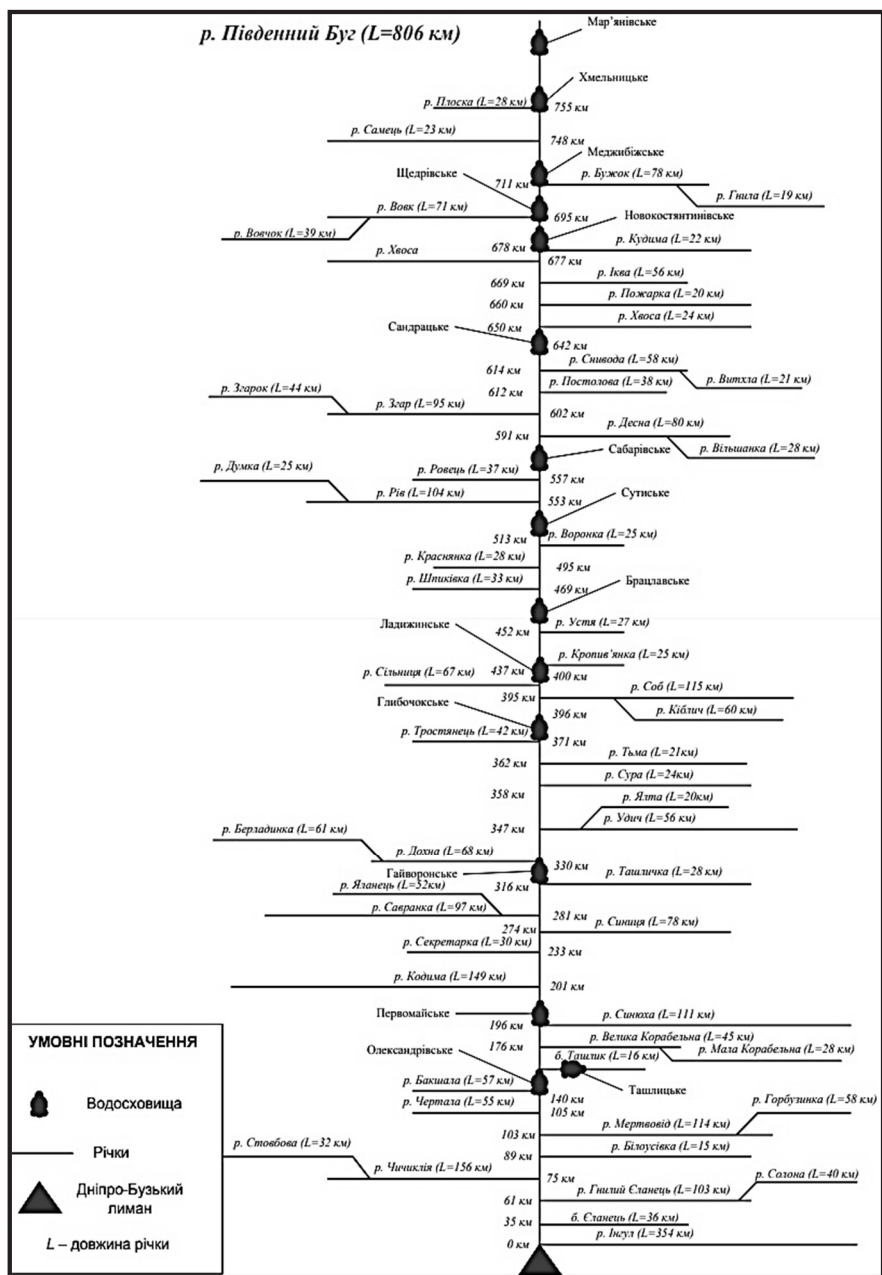


Рисунок 1.47 – Лінійна схема та зарегульованість р. Південний Буг [2]

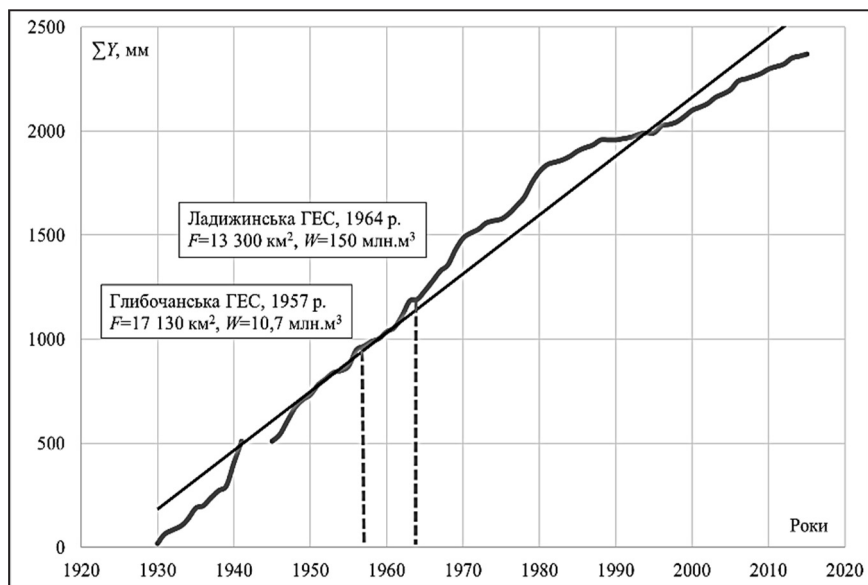


Рисунок 1.48 – Сумарна крива шарів стоку весняного водопілля на р. Південний Буг – с. Тростянчик ($F=17400 \text{ км}^2$)

Також досліджено сумарну криву шарів стоку весняного водопілля на р. Синюха – с. Синюхін Брід ($F=16700 \text{ км}^2$) (рис. 1.49), де вище за течією даного поста на р. Синюха розташована найбільша в каскаді малих ГЕС Червонохутірська ГЕС ($F=16595 \text{ км}^2$), яка введена в експлуатацію у листопаді 1957 р.

Важливим є дослідження й часового ряду шарів стоку весняного водопілля на р. Південний Буг – смт Олександрівка ($F=46200 \text{ км}^2$) у вигляді сумарної кривої (рис. 1.50), оскільки пост є замикальним в басейні р. Південний Буг та відображає загальну зарегульованість на басейні.

Слід зазначити, що гідрологічний пост на р. Південний Буг – смт Олександрівка приймає також стік р. Синюха, яка впадає в основне русло р. Південний Буг трохи вище за течією (див. рис. 1.47). При цьому, басейн р. Південний Буг – с. Олександрівка включає понад 2400 ставків і понад 100 водосховищ. Вище за течією даного поста розташовані – Первомайська ГЕС ($F=27300 \text{ км}^2$, $W=3,3 \text{ млн м}^3$), яка знаходиться вище впадіння р. Синюха та Олександрівська ГЕС ($F=46200 \text{ км}^2$, $W=58,3 \text{ млн м}^3$), що розташована лише у 2,5 км вище поста.

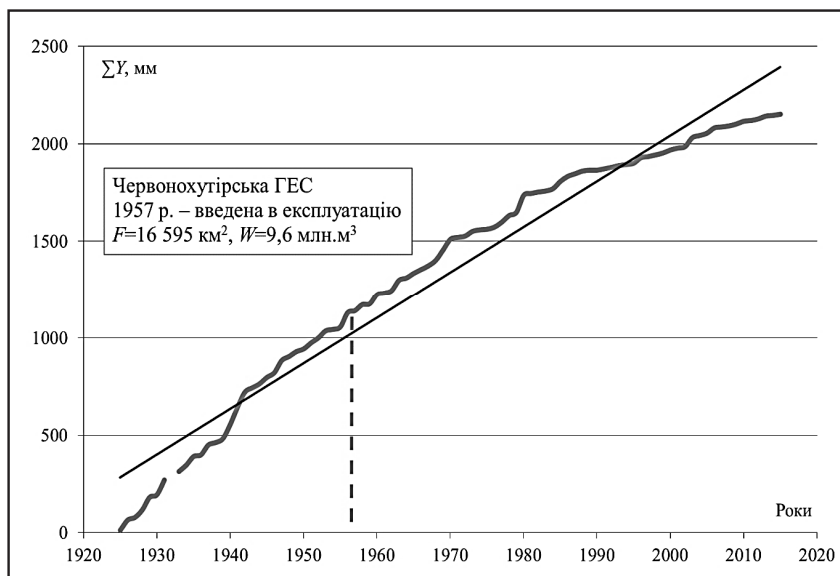


Рисунок 1.49 – Сумарна крива шарів стоку весняного водопілля на р. Синюха – с. Синюхін Брід ($F=16\,595\text{ км}^2$)

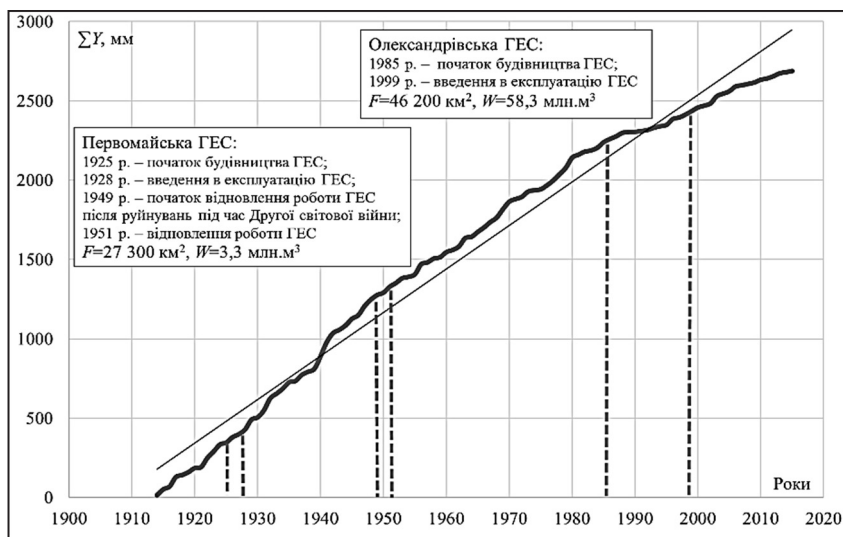


Рисунок 1.50 – Сумарна крива шарів стоку весняного водопілля на р. Південний Буг – смт Олександрівка ($F=46\,200\text{ км}^2$)

Для аналізу оцінки впливу зарегульованості річкового стоку в басейні р. Південний Буг на сумарні криві нанесено дати початку будівництва та експлуатації ГЕС. На р. Південний Буг – с. Тростянчик сумарна крива відхиляється в сторону збільшення весняного стоку після введення в експлуатацію Ладизинської ГЕС; на р. Синюха – с. Синюхін Брід після введення в експлуатацію ГЕС відхилень не спостерігається; на р. Південний Буг – с. Олександрівка після введення в експлуатацію Олександрівської ГЕС сумарна крива дещо відхиляється в сторону зменшення.

Характерної однозначної закономірності в направлених змінах шарів стоку весняного водопілля річок у вигляді сумарних кривих на початку будівництва та експлуатації ГЕС в сторону збільшення або зменшення не спостерігається. Тому, для аналізу в роботі були побудовані різниці інтегральні криві шарів стоку весняного водопілля на низці постів (рис. 1.51), рівномірно розташованих по території басейну р. Південний Буг з різною площею водозбору (від 692 до 46200 км²) та наявністю або відсутністю водосховищ та ГЕС вище за течією.

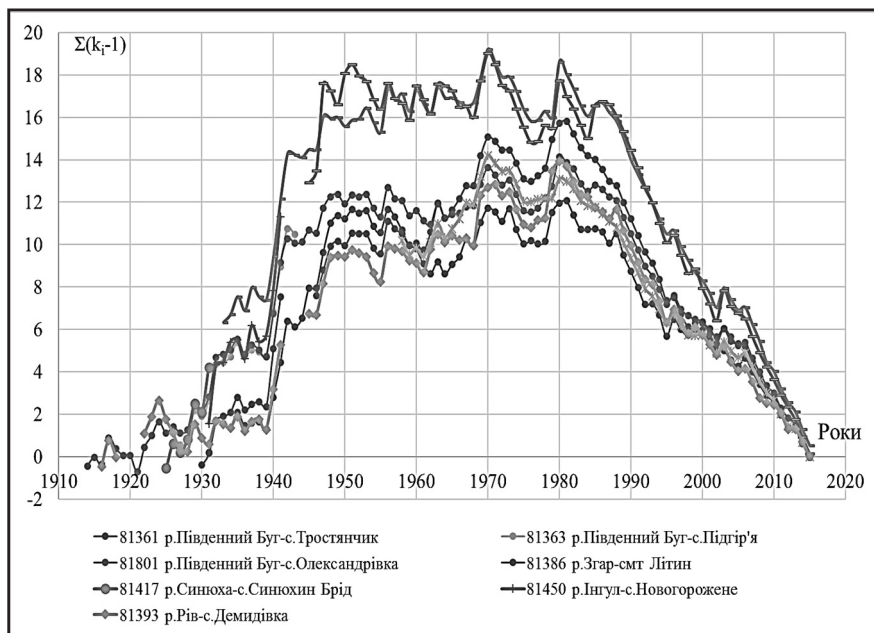


Рисунок 1.51 – Різниці інтегральні криві шарів стоку весняного водопілля річок басейну Південного Бугу

При цьому, побудовані різницеві інтегральні криві шарів стоку весняного водопілля в басейні р. Південний Буг вказують, що спостерігається однозначна синхронність в коливаннях річкового стоку для всіх річок басейну.

Аналізуючи сумарні та різницеві інтегральні криві шарів стоку весняного водопілля в басейні р. Південний Буг можна дійти висновку, що в сучасний період формування весняного стоку на басейні вплив зарегульованості річкового стоку не суттєвий, відхилення на сумарних кривих переважно пояснюються природними циклами та впливом змін клімату на водність річок.

2 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД МЕТОДІВ ТА МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ПРОГНОЗУВАННЯ ВЕСНЯНОГО СТОКУ РІЧОК

Використання математичного моделювання, одного з пріоритетних напрямків сучасної гідрології, дає змогу врахувати фізичні зміни характеристик водозборів і відтворити велике різноманіття можливих чинників формування весняного стоку, що призводять до екстремальних значень стоку, а також оцінити ймовірнісні характеристики максимального стоку.

Основними рисами сучасних методів прогнозування є моделюючі комплекси, які дозволяють математично описувати випадкові зміни метеорологічних чинників на водозборі, прогнозувати стокові процеси у динаміці їх розвитку у часі, а також створювати просторові моделі прогнозування з можливістю представлення прогнозованої інформації у картографічному вигляді для великих регіонів. Наявність автоматизованих систем обробки та передачі гідрометеорологічної інформації надають можливість гідрологам виконувати складні багатоваріантні обчислення з використанням великої кількості даних та випускати прогноз в реальному часі, супроводжувати й корегувати прогноз при появі нових даних [1].

Моделювання річкового стоку є важливим елементом при плануванні та управлінні водними ресурсами, системами водопостачання та контролю, при запобіганні небезпечних ситуацій спричинених розливами річок, а також при наданні річкових прогнозів і прогнозів служби попередження Всесвітньої метеорологічної організації (ВМО) [2].

В наступних пунктах надано аналітичний огляд методів довгострокових гідрологічних прогнозів, які розвивалися протягом більш ніж століття і продовжують удосконалюватись при появі сучасних рядів спостережень, новітніх технологій та супроводжуються комплексом взаємопов'язаних методів дослідження гідрологічних процесів, які покладені в основу розробки математичних моделей формування стоку річок.

2.1 Розвиток довгострокового гідрологічного прогнозування характеристик стоку весняного водопілля річок

На початку XX ст. було закладено основу до розвитку довгострокових гідрологічних прогнозів характеристик стоку весняного водопілля річок. Особлива увага, на той час, приділялась питанням накопичення та перерозподілу вологи на басейні, стоку тало-дощової води по схилах та

русах річок. Так, у роботі В.Н. Лебедева [3] у 1924 р. опубліковано метод прогнозу «висоти весняного водопілля річок», тобто рівнів води річок в цей період. Водночас А.В. Огієвським [4] опубліковані дослідження зв'язку рівнів води річки Дніпро у Києві та деяких нижче розташованих приток. Варто зазначити, що у роботі В.А. Назарова [5] вперше було розглянуто процеси формування весняного стоку на рівнинних річках України, у тому числі, в басейні р. Південний Буг, який є об'єктом дослідження даної роботи.

До періоду перших фундаментальних досліджень відносяться роботи Е.М. Ольдекопа [6], де він розглядає залежність стоку гірських річок Середньої Азії від кількості опадів на водозборі. Дослідження Д.І. Кочеріна [7] та Д.Л. Соколовського [8] з розрахунку максимальних витрат весняного водопілля на основі генетичного аналізу процесів формування стоку періоду водопілля в подальшому слугували теоретичною основою й прогностичних методик.

М.А. Великанов зробив значний внесок у вивчення генезису формування весняного водопілля [9]. Він обґрунтовував необхідність дослідження складного комплексу природних умов формування весняного стоку та створення спрощених схем, які б лягли в основу розрахункових формул. Надалі вони були покладені в основу й прогнозування весняного водопілля річок.

В Україні розвиток методів прогнозування елементів весняного водопілля відбувався в службі гідрологічних оповіщень Дніпробуду та в секторі гідрологічних прогнозів Українського управління гідрометслужби (під керівництвом А.В. Огієвського). В той час методи прогнозу весняного стоку були засновані на встановленні емпіричних кореляційних зв'язків елементів водопілля з гідрометеорологічними чинниками [10], [11]. В основу прогнозу максимальних витрат води весняного водопілля річок була покладена формула М.А. Великанова [9], тобто прогноз складався по зв'язках максимальних витрат води з об'ємом весняного стоку.

З середини 1930-1940-х років основою в області вивчення стоку річок послужило вирішення рівняння водного балансу, можливість застосування якого в області довгострокових прогнозів стоку весняного водопілля була показана В.Д. Комаровим [12], Є.М. Соколовою [13] та О.А. Спенглером [14]. Авторами були отримані емпіричні зв'язки шарів стоку водопілля від його основних чинників (запасів води в сніговому покриві й весняних опадів). Також В.Д. Комаровим вперше теоретично обґрунтовано, що найбільші втрати талого стоку спостерігаються при недостатньо зволоженому та слабо промерзлому ґрунті [15]. На жаль, кількісно оцінити вплив характеристик

втрат на об'єм талого стоку не дозволила нестача гідрометеорологічних матеріалів спостережень.

Станом на 50-ті роки XIX ст. сформувалися більш повні теоретичні уявлення про формування стоку річок, що опиралися на накопичені вихідні гідрометеорологічні дані. Гідрологія стала загальновизнаною наукою, що мала велике значення для економічного розвитку країн світу. У той час почали експлуатувати велику кількість водосховищ, що призвело до появи багатьох досліджень пов'язаних з прогнозуванням припливу води до водосховищ; з'явилась потребність у прогнозах річкового стоку та розробці надійних методів довгострокового прогнозу об'єму води у період весняного водопілля. Методи довгострокового прогнозу об'єму весняного водопілля ґрунтувалися на побудові воднобалансових залежностей з урахуванням характеристик водопоглинаючої здатності ґрунтів на басейні[16]-[19] при комплексному аналізі та визначенні складових весняного стоку, особливо вивченні втрат води в період танення снігу та всього періоду водопілля.

В роботах Г.П. Калініна, Т.Т. Макарової [17] та В.Д. Комарова [18] широкий розвиток одержали польові та лабораторні дослідження інфільтрації води в мерзлий ґрунт при вивченні теплофізичної взаємодії мерзлого ґрунту і інфільтрованої води.

Свого часу Є.Г. Поповим [20] виконані ґрунтовні експериментальні та теоретичні дослідження процесів затримання, водопоглинання і стоку води в річковому басейні. Ним отримані інтегральні рівняння стоку для двох типів водопоглинання – при наявності тільки поверхневої затримки (ємнісна модель водопоглинання) та в умовах заповнення поверхневої ємності та поглинання води ґрунтом (інфільтраційно-ємнісна модель). Подальші напрацювання увійшли в роботу [21]. В цей період вперше постало питання щодо створення просторових методів прогнозів стоку весняного водопілля, що охоплювали б прогностичною інформацією про весняний стік води річок великі басейни або території[16]-[18]. Реалізація методів територіальних прогнозів характеристик стоку весняного водопілля представлено в роботах авторів [22]-[25].

З 70-х років XX сторіччя завдяки накопиченню значної кількості вихідної гідрометеорологічної інформації та можливості її обробки при використанні обчислювальної техніки почало розвиватися математичне моделювання процесів річкового стоку. Тобто поступово було здійснено перехід від описання окремих процесів формування стоку на басейні до створення математичних моделей, які поєднали багатofакторний цикл процесів стокоутворення (в [26]).

Протягом тривалого періоду розвитку гідрологічної науки в Одеському Гідрометеорологічному інституті (нині Одеському державному екологічному університеті) на основі численних напрацювань професора А.М. Бефані [27] та Н.Ф. Бефані [28], [29] започаткована і досі діє наукова школа теоретичної та прикладної гідрології. Значний внесок у розвиток вивчення і моделювання стоку зробив Є.Д. Гопченко [30]. На основі напрацювань Одеської наукової школи теоретичної та прикладної гідрології розроблено та апробовано низку моделей, у тому числі і для територіальних довгострокових прогнозів характеристик весняного водопілля рівнинних річок [31]-[33]. Опис основних теоретичних досягнень прикладної наукової школи наданий в роботі [34].

У наступному пункті розглянуто існуючі вітчизняні науково-методичні підходи довгострокового прогнозування шарів стоку та максимальних витрат води весняного водопілля рівнинних річок, до яких відноситься й басейн річки Південний Буг.

2.2 Науково-методичні підходи довгострокового прогнозування шарів стоку та максимальних витрат води весняного водопілля

2.2.1 Теоретичні основи прогнозування шарів стоку

Теоретичною основою методів довгострокових прогнозів шарів стоку весняного водопілля є рівняння водного балансу [18], [20], [21], [26], [29], використання якого дає можливість прогнозування шарів стоку весняного водопілля з довгостроковою завчасністю

$$Y_m = S_m + X_1 + X_2 - P, \quad (2.1)$$

де Y_m – загальний стік весняного водопілля, який включає поверхневу та підземні складові стоку, мм;

S_m – максимальні запаси води в сніговому покриві наприкінці зими, тобто перед початком весняного сніготанення і водопілля, визначені за даними снігомірних зйомок, мм;

X_1 – дощові опади періоду сніготанення, мм;

X_2 – дощові опади періоду спаду весняного водопілля, мм.

P – сумарні втрати талої та дощової води, мм, які визначаються за рівнянням [18], [20], [26]

$$P = E_c + E_{zp} \pm \Delta W_{zp} \pm \Delta W_{nidz} + U, \quad (2.2)$$

де E_c і E_{zp} – випаровування зі снігу і ґрунту, мм;

$\pm \Delta W_{zp}$ – зміна запасів вологи в ґрунті, мм;

$\pm \Delta W_{nidz}$ – зміна запасів підземних вод, мм;

U – поверхневе утримання талої й дощової води, мм.

При цьому, сума $(\pm \Delta W_{zp} \pm \Delta W_{nidz})$ характеризує водопоглинальну спроможність річкових водозборів, яка коливається з року в рік у великих межах. Тому, важливим питанням гідрологічних прогнозів є встановлення цих складових втрат тало-дощових вод, умови формування яких відрізняються у різних фізико-географічних зонах [35], [36].

Рівняння водного балансу вигляду (2.1) для різних фізико-географічних зон містить різні його складові [26]. Так, басейн р. Південний Буг розташований в фізико-географічних зонах – широколистяних лісів і лісостеповій (район І), півдня лісостепової й степовій зонах (район ІІ), де умови формування весняного стоку дещо відрізняються (розд.1, підрозд. 1.4). В зоні *широколистяних лісів* (зона надлишкового зволоження) втрати тало-дощових вод в період весняного водопілля річок визначаються складовими рівняння (2.2), а величина поверхневої затримки U враховує поверхневе утримання води в лісовій підстилці та болотах. В *лісостеповій зоні*, що характеризується достатнім зволоженням, основну частку втрат талих і дощових вод складає інфільтрація, яка, своєю чергою, визначається ступенем водопроникності промерзлих ґрунтів [18], [35], [36]. Рівняння водного балансу (2.1) для цієї зони можна записати у вигляді [26]

$$Y_m = S_m + X_1 + X_2 - E_c - I, \quad (2.3)$$

де I – інфільтрація талих і дощових вод (мм), яка дорівнює $E_{zp} \pm \Delta W_{zp} \pm \Delta W_{nidz}$.

В умовах плоского рівнинного рельєфу *степової зони* необхідно враховувати втрати води на заповнення безстічних ємностей на поверхні водозборів [18], [20]. В цій зоні, в умовах недостатнього зволоження, опади після сходу снігу не оказують суттєвого впливу на загальний стік весняного водопілля. При цьому рівняння водного балансу прийматиме вигляд [26]

$$Y_T = S_m + X_1 - E_c - I - U. \quad (2.4)$$

Точність рішення рівняння водного балансу значною мірою залежить від наявності та достовірності вихідних даних. Найбільш складним завданням при вирішенні рівняння водного балансу, у вигляді (2.1), (2.3) та (2.4) (за відсутності експериментальних даних) є розрахунок втрат на випаровування та інфільтрацію води на водозборі [18], [20], [26], [35], [36].

При майже щорічній наявності зимових відлиг, які характерні для розглядуваної території басейну р. Південний Буг, при прогнозуванні шарів стоку весняного водопілля виникають похибки їх прогнозів, що викликано просторовим перерозподілом снігу при його таненні під час відлиг, поповненням запасів вологи ґрунтів, частковим відтаненням ґрунтів та формуванням зимових паводків на річках.

Як було сказано вище, у 1959 р. В.Д. Комаров [18], а в 1963 р. Є.Г. Попов [20] обґрунтували загальний графічний вигляд залежностей весняного стоку від запасів води у сніговому покриві, весняних опадів та ступеня водопроникності ґрунтів, які можуть бути представлені рівнянням виду

$$Y_m = X - P_0 [1 - \exp(-X/P_0)], \quad (2.5)$$

де X – сумарний запас вологи на басейні в період весняного водопілля (максимальні снігозапаси та опади, тобто $X = S_m + X_1 + X_2$), мм;

P_0 – параметр втрат води, який залежить від осіннього зволоження та зимового промерзання ґрунтів на водозборі, мм.

За дослідженнями В.Д. Комарова [18] параметр P_0 становить собою величину поверхневої ємності й втрат води на інфільтрацію в мерзлий ґрунт. Для річок лісостепової та степової зон території колишнього СРСР автор [18] встановив рівняння

$$P_0 = Ae^{-W(bL+a)}, \quad (2.6)$$

де W – запас вологи в метровому шарі ґрунту наприкінці зими, мм;

L – глибина промерзання ґрунту перед початком весняного водопілля, см;

A, a, b – емпіричні параметри.

На практиці [26], [29], [37] методи прогнозів весняного стоку представлені зазвичай емпіричними залежностями шарів весняного стоку від кількості вологи на басейні та факторів, які характеризують інфільтрацію води в ґрунт.

Свого часу авторами [35] було виконано гідрологічне районування рівнинної частини Європейської території колишнього СРСР «за основними чинниками, що формують втрати талих вод» та встановлено основні гідрометеорологічні чинники формування весняного водопілля (снігозапаси, дощові опади, глибина промерзання та вологість ґрунтів), які представлені територіальними залежностями по мірі їх значення. Басейн р. Південний Буг за районуванням [35] відноситься до трьох районів, в яких територіально-загальні залежності мають наступний вигляд:

- III район, підрайон IIIa (лісової зони) характеризується переважним впливом передвесняного насичення вологою ґрунтів на втрати талих вод

$$Y = f[(S + X_{\epsilon}), U, L]; \quad (2.7)$$

- IV район (лісостепової зони) характеризується переважним впливом глибини промерзання ґрунтів на втрати талих вод

$$Y = f[(S + X_{\epsilon}), L, U]; \quad (2.8)$$

- VI район (степової зони) характеризується рівнозначними впливом глибини промерзання та вологості ґрунтів на втрати талих вод

$$Y = f[(S + X_{\epsilon}), \overline{UL}], \quad (2.9)$$

де S – запаси води в сніговому покриві, мм;

X_{ϵ} – дощові опади періоду весняного водопілля, мм;

L – глибина промерзання ґрунтів, см;

U – запаси вологи в ґрунті, мм.

Знак середнього в (2.9) позначає, що у даному районі спостерігається рівнозначний вплив глибини промерзання ґрунтів та запасів вологи в ґрунті при формуванні втрат весняного стоку.

Отримані інтегральні рівняння стоку, у вигляді (2.1), (2.3) та (2.4) весняного водопілля були основою при розробці локальних та територіальних методів довгострокового прогнозу шарів стоку весняного водопілля для річок України та свого часу використовувалися в Українському Гідрометцентрі ДСНС України (УкрГМЦ).

2.2.2 Теоретичні основи прогнозування максимальних витрат води весняного водопілля

В основу прогнозування максимальних витрат води весняного водопілля річок в 30-ті роки минулого сторіччя було покладено формулу М.А. Великанова [10] виду

$$Q_m = k_p F \frac{k_\phi}{T_e} Y_m, \quad (2.10)$$

де Q_m – максимальні витрати води весняного водопілля, м³/с;
 k_p – коефіцієнт розмірності;
 k_ϕ – коефіцієнт нерівномірності руслового стоку, який характеризує форму гідрографу весняного водопілля;
 Y_m – шар стоку за період весняного водопілля, мм;
 T_e – тривалість весняного водопілля, доба;
 F – площа басейну, км².

Розрахунок максимальних витрат води весняного для окремого водозбору за формулою (2.10) залежить головним чином від параметрів – k_ϕ , Y_m та T_e , а прогноз – можливий при встановленні зв'язків максимальних витрат води з шарами стоку весняного водопілля $Q_m = f(Y_m)$ [18], [26]. Слід зазначити, що при прогнозі максимальних витрат води весняного водопілля величина Y_m приймається за її прогнозом, що знижує точність одержаних в такий спосіб величин Q_m .

На басейнах річок лісостепової та степової зон Європейської території колишнього СРСР, з відносно коротким періодом сніготанення та одномодальною формою гідрографа весняного водопілля, спостерігається достатньо тісний, переважно лінійний зв'язок максимальних витрат води та шарів стоку весняного водопілля $Q_m = f(Y_m)$ [18]. На річках лісової зони – такі залежності менш тісні у зв'язку з великою тривалістю сніготанення і значними дощовими опадами, що призводить до формування весняного водопілля зі складною формою гідрографу. Тому, у випадках, коли спостерігається значний розкид точок необхідно враховувати додаткові фактори формування весняного водопілля [18], [22], [25], [26], [37], [38].

Важливою є оцінка форми гідрографу весняного водопілля, завдяки чому можна встановити яким буде водопілля – «дружнім» чи «затяжним». Характеристикою «дружності» весняного водопілля приймають такі співвідношення, як Q_m / Y_m [18], [38] або $Q_m / Q_{сер}$ ($Q_{сер}$ – середня витрата води за період водопілля) [26], [37]. При середній «дружності» процесів формування весняного водопілля вище зазначені співвідношення будуть близькими до одиниці, а при високій або низькій – відповідно більше або менше одиниці. Слід зазначити, що застосування показника «дружності» весняного водопілля має певні складнощі, оскільки характеристики за якими вони розраховуються, не відомі на дату випуску прогнозу і прогножуються з урахуванням метеорологічного прогнозу погоди [18]. Також відомий досвід встановлення показника «дружності» при застосуванні таких характеристик погодних умов, як зміна висотної барики над басейном за зимовий період [38] або зміна індексів атмосферної циркуляції за зимовий період [39].

Розробка методики прогнозу максимальних витрат води весняного водопілля також, як і для шарів стоку, можлива й на основі встановлення залежностей Q_m від основних метеорологічних чинників формування весняного водопілля (снігозапасів та дощових опадів) [37], [40]-[42].

Саме такий підхід застосовано в методі територіальних довгострокових прогнозів характеристик максимального стоку весняного водопілля в роботах [31]-[32], а також авторамиданії роботи при прогнозуванні характеристик максимального стоку (шарів стоку та максимальних витрат води) весняного водопілля з врахуванням впливу комплексу метеорологічних та агрометеорологічних чинників на формування весняного стоку річок басейну Південного Бугу [43]-[45].

2.3 Огляд математичних моделей для прогнозування стоку річок

Математичне моделювання є важливим апаратом дослідження фізичних процесів, які відбуваються на водозборі та в руслі річки. Накопичені десятиліттями теоретичні й експериментальні дослідження з питань формування дощового і тало-дощового стоку річок та його основних чинників послужили методичною основою для створення різних математичних моделей для розрахунків і прогнозів стоку, які досить затребувані серед науковців та в оперативній практиці служб гідрологічного прогнозування річкового стоку [2].

Сучасні математичні моделі прогнозування представляються окремими субмоделями, які дозволяють математично описувати зміни гідрометеорологічних умов на водозборі, проводити моніторинг розвитку стокових процесів, як у часі, так і просторі, та представляти прогнозну інформацію у картографічному вигляді.

За класифікацією, математичні моделі стоку поділяються на *детерміністичні* (динамічні) та *стохастичні* (статистичні). В залежності від деталізації процесів стокоутворення на басейнах детерміністичні математичні моделі поділяють на моделі *із зосередженими параметрами*, які розглядають басейн як динамічну систему і включають до себе низку осереднених для водозбору вхідних параметрів та з *розподіленими параметрами* – в яких враховуються складові, які описують змінні локальні умови формування стоку по площі водозбору [2], [26], [46]-[48].

На сьогодні, в сучасній оперативній практиці переважно використовують детерміністичні моделі з зосередженими параметрами, які розроблені для випуску короткострокових прогнозів (завчасністю до 15 діб) гідрографів весняного водопілля та дощових паводків [2], [49], [50] або довгострокових прогнозів (завчасністю понад 15 діб) об'єму та максимальних витрат води весняних водопіль річок [31]-[33], [50]-[52]. Огляд математичних моделей для прогнозування стоку річок наданий в роботах [2], [26], [29], [46]-[48].

2.3.1 Сучасні математичні моделі короткострокових гідрологічних прогнозів гідрографу стоку

Прикладом математичних моделей короткострокових гідрологічних прогнозів гідрографу стоку є модель Гідрометцентру СРСР авторів В.Д. Комарова, Є.Г. Попова, Г.П. Калініна, А.П. Жидікова та ін. [53], яка була розроблена для випуску короткострокових прогнозів гідрографів дощового та тало-дощового стоку рівнинних річок. В основу моделі покладено математичний опис процесів сніготанення, водовіддачі снігового покриву і припливу води до руслової мережі (окремо для польової та лісової частин басейнів) за допомогою лінійної трансформаційної функції.

Подальшим розвитком математичного моделювання стала модель В.І. Кореня і В.О. Бельчикова [54]-[55], яка призначена для безперервного протягом року розрахунку і прогнозу гідрографів талого, дощового і тало-дощового стоку річок лісової та лісостепової зони при можливості розрахунку промерзання і відтанення ґрунту на основі врахування

теплофізичних процесів, які відбуваються в зоні аерації та на поверхні ґрунтів. В основу моделі покладено рівняння водного балансу водозбору. Модель дозволяє враховувати процеси формування стоку води, як для польових, так і лісових частин басейну. При цьому, при розрахунку поверхневого стоку в полі враховується можливе утворення на частині площі водонепроникного шару, який зменшує втрати води на інфільтрацію. Розрахунок гідрографів у замикальних створах відбувається шляхом врахування сумарного – поверхневого і ґрунтового стоку за допомогою лінійної моделі трансформації паводків [54], [55].

Модель Ю.М. Денисова [56] призначена для розрахунку і прогнозу гідрографів тало-дощового стоку гірських річок. Модель дає кращі результати для річок з невеликою кількістю рідких опадів, що випадають на поверхню басейну, яка вже звільнилася від снігового покриву. У випадках розрахунку річкового стоку на басейнах з рідкою мережею спостережень за опадами точність розрахунків знижується. В такому випадку зазвичай залучають дані вимірів за сумарними опадомірами на тих висотах, де звичайні станції та пости відсутні.

Вперше поставив питання можливості *довгострокового прогнозу гідрографу весняного і зливого стоку* Й.А. Железняк [57]. Основна ідея методу Й.А. Железняка для прогнозу форми гідрографів полягає у побудові узагальненого гідрографа стоку за формою натурних гідрографів різних за площею і географічним положенням річок. Основними модельними параметрами для прогнозу річкового стоку були прийняті прогнозні величини максимальних витрат води в створі річки та коефіцієнт форми гідрографу водопілля. Додатковими параметрами були прийняті прогнозні дати початку та проходження максимумів на річках або тривалість підйому весняного водопілля. В методі враховується вплив бокового припливу води на форму гідрографа весняного водопілля. Апробація методу прогнозу гідрографа водопілля була здійснена для річок басейну Дніпра та його приток Сож, Прип'ять, Десна [57].

Однією з фундаментальних робіт того часу, в якій ґрунтовно проаналізовано генезис гідрографів стоку в різних природних умовах їх формування є робота Н.Ф. Бефані [28]. Автором [28] обґрунтовано теоретичні основи розрахунку гідрографу стоку дощових паводків гірських річок при використанні методу ізохрон (як основи генетичного розрахунку гідрографу стоку дощових та талих вод, що запропонована М.А. Великановим [10]) та методу одиничного гідрографа (запропонованого у 1932 р. Л.К. Шерманом [58]). При цьому особливу увагу автор [28]

приділяє методам розрахунку поверхневого схилового стоку та його русловій трансформації, розробці територіальних (регіональних) математичних моделей втрат води на водозборі.

Н.Ф. Бефані на основі територіально-загальних залежностей обґрунтовано методику прогнозування шарів стоку та максимальних витрат води дощових паводків, а на їх основі й прогнозу гідрографу паводкового річкового стоку при використанні експериментальних даних та даних спостережень мережі гідрометеорологічних спостережень для регіону Карпат та деяких гірських річок Далекого Сходу Росії (південь Приморського краю) [28]. Автором Н.Ф. Бефані у роботі [29] дістали подальший розвиток методичні розробки Г.П. Калініна з гідрологічних прогнозів, як весняного, так і паводкового стоку річок, розташованих в різних фізико-географічних зонах формування річкового стоку. Напрацювання Н.Ф. Бефані було покладено й в основу розробки територіальних методів прогнозу характеристик стоку весняного водопілля рівнинних річок, що знайшли відображення у роботі [31].

Детерміністична гідрологічна модель «Гідрограф» з розподіленими параметрами була розроблена у 70-х роках минулого століття під керівництвом Ю.Б. Виноградова в Гідрологічному Інституті (м. Санкт-Петербург). Модель «Гідрограф» застосовується, як для розрахунків, так і прогнозу гідрографу стоку [59], у тому числі й невивчених в гідрологічному відношенні річок. Модель описує процеси формування річкового стоку на басейнах з різними фізико-географічними характеристиками (типами ландшафтів, ґрунтів, рослинності). В моделі використовується стандартна метеорологічна інформація – добові значення температури повітря, дефіциту вологості повітря, опадів, що дає можливість використовувати її для різних регіонів.

Однією з вітчизняних моделей короткострокових прогнозів гідрографу є математична модель, яка була розроблена в Українському науково-дослідному гідрометеорологічному інституті (УкрНДГМІ) (зараз Український гідрометеорологічний інститут – УкрГМІ ДСНС України та НАН України) В.П. Водоласковим [60] та апробована для водозборів лісостепової зони Європейської території колишнього СРСР. В її основу покладені основні принципи опису процесів формування весняного стоку моделі В.І. Кореня і В.О. Бельчикова [54]. В подальший період в УкрГМІ розроблені прогнозно-моделюючі комплекси «Тиса», «Дністер», «Прут», «ДОЩ-3», «СЛОЙ-3» (автори М.М. Сусідко, О.І. Лук'янець) [49], [61]. Ці автоматизовані комплекси на даний час використовуються в оперативній діяльності Українського Гідрометцентру ДСНС України (УкрГМІ) [50].

Кожна з перелічених моделей дозволяє математично описувати процеси формування стоку на водозборів період розвитку весняних водопіль та дощових паводків. Прогноз складається на основі моделювання процесів нерівномірного просторового розподілу опадів, снігонакопичення та сніготанення, зміни стану поверхні водозборів, стокоутворення, випаровування та фільтрації. При цьому, в моделях «ДОЩ-3», «СЛОЙ-3» прогноз шару весняного стоку часткових площ басейну здійснюється шляхом воднобалансового рішення [61].

Розподілена фізично обґрунтована гідрологічна модель «опаді-стік» ТОРКАРІ-ПІММС (автори М.Й. Железняк, О.В. Бойко) розроблена в Інституті проблем математичних машин і систем НАН України, яка побудована з використанням ГІС-технологій обробки просторових даних [62]. Модель базується на використанні рівняння «кінематичної хвилі» для опису динаміки процесів річкового стоку та може бути застосована для детальної реконструкції минулих паводків, аналізу їх параметрів поза межами регулярних пунктів гідрометеорологічних вимірювань. Рівняння моделі розв'язуються для елементів сітки водозбору, а сукупний річковий стік розраховується шляхом побудови так званого «дерева стоку», «корінь» якого знаходиться в замикальному створі водозбору. Параметри моделі визначаються для кожного елемента сітки водозбору зі світових цифрових карт висот, типів ґрунтів, карти рослинного покриву та ін. Модель ТОРКАРІ-ПІММС успішно була застосована для формування паводкового стоку річок Закарпаття та приток басейну р. Прип'ять (р. Стир та р. Уж)[62], [63].

В останні роки в УкрГМІ розроблено та впроваджено з 2015 р. у виробничу діяльність Дунайської гідрометеорологічної обсерваторії аналітично-експертну систему прогнозування рівнів води суднохідного Дунаю – «Істер» [64]. В її основу покладено методику прогнозу рівневого режиму Кілійського рукава р. Дунай, яка спирається на встановлення емпіричних залежностей зміни рівнів води поста Ізмаїл від зміни рівнів води на вищерозташованому посту Рені на фоні середньобаторічного вітрового режиму морського узбережжя дельти Дунаю.

Важливим блоком для результативного використання наявних моделей для випуску прогнозів в режимі реального часу є наявність доступу до оперативної інформації вихідних гідрометеорологічних даних та інформації про рівні води, особливо при яких спостерігаються небезпечні гідрологічні явища (НЯ) та стихійні гідрологічні явища (СГЯ). На сьогодні, проводити моніторинг та аналізувати гідрометеорологічну ситуацію в режимі реального часу по всій території України дозволяє технологія АРМ-гідро, яка розроблена в Українському Гідрометцентрі ДСНС України (УкрГМІ) [50], [65].

2.3.2 Огляд закордонних математичних моделей для прогнозування стоку річок

В закордонній практиці, у тому числі й в практиці ВМО [2], розроблені та використовуються математичні моделі гідрографів стоку у замикальному створі річок з різною деталізацією процесів стокоутворення. Огляд закордонних математичних моделей для прогнозування стоку річок наданий в роботах [2], [47], [48], [66].

До сучасних математичних моделей короткострокових гідрологічних прогнозів відноситься Стенфордська модель формування дощового стоку (автори Н.Г. Крауфорд і Р.К. Лінслей), яка описана у роботі [67]. Модель побудована на основі детального опису елементарних процесів стокоутворення на водозборі, а розрахунок стоку ведеться за годинні інтервали часу. Залежно від модифікації модель включає від 20 до 34 параметрів (годинні опади, добова температура, радіація, вітер, місячне або добове випаровування та ін.), що задаються з фізичних передумов формування стоку й уточнюються шляхом оптимізації.

В моделі Д. Доудіта О'Доннела, яка описана в [68] на відміну від Стенфордської моделі зменшено кількість параметрів до 13, з яких 9 (опади, випаровування, стік та ін.) оптимізується в автоматичному режимі за однакові проміжки часу – від 3 годин до одної доби. Модель застосовується для малих і середніх водозборів.

Для прогнозу дощового стоку на малих водозборах (з площею басейну до 50 км²) може бути використана математична модель Лічі, Доудіта Бергмана, яка описана в [69]. Модель включає 8 параметрів, що визначаються шляхом оптимізації (зливові опади, випаровування та ін.) при розрахунковому інтервалі часу – 5 хв. Втрати води на інфільтрацію в моделі розраховуються за моделлю Філіпа. Для прогнозу дощового стоку на малих водозборах, також, використовують математичну модель авторів Д.Є. Неша, Д.В. Саткліфа, П.Є. О'Коннела, Д.П. Феррера та ін. [70], [71]. Модель включає 9 параметрів, 7 з яких підлягають оптимізації (опади, випаровування та ін.) при розрахунковому інтервалі часу – 3 години.

В умовах вологого і сухого клімату для прогнозу формування дощового стоку пропонується застосовувати математичну модель Шеньсі (Китай), яка описана авторами [72]. В моделі для розрахунку трансформації гідрографа в річному руслі використовується метод Маскінгам. Модель включає 9 емпіричних параметрів, що характеризують кліматичні та фізико-географічні

умови, які для великих регіонів приймаються постійними, для інших – підбираються за даними спостережень за опадами, випаровуванням та стоком.

Модель Сакраменто (розроблена в Національному центрі служби річкових прогнозів Сакраменто, США) [73] є достатньо складною моделлю оскільки включає складний алгоритм розрахунку вологості ґрунту, призначений для визначення значень об'ємів декількох компонентів річкового стоку. Але для перетворень вхідних даних на гідрограф стоку використовується досить простий і майже повністю емпіричний підхід. В моделі розраховуються п'ять складових річкового стоку, з яких три компоненти стоку верхньої зони (схилловий, поверхневий і внутрішньогрунтовий) сумуються і перетворюються на одиничний гідрограф. Два компоненти нижньої зони – первинний і вторинний базисний стік, додаються до гідрографа відтоку, визначеному за трьома іншими складовими. Також в моделі передбачено розрахунок гідрографа річкового стоку зі змінними розрахунковими коефіцієнтами.

Еколого-гідрологічна модель SWIM (Soiland Water Integrated Model) розроблена німецькими й американськими фахівцями [74], [75], яка враховує параметри майбутнього клімату, гідрологічні та вегетаційні процеси, колообіг поживних речовин (азот та фосфор) та рух донних відкладів в межах річкового басейну. Модель здатна відтворювати гідрологічні особливості басейну, зокрема сніготанення та включає інтерфейс ГІС GRASS, що дозволяє відображати показники висот, землекористування та ґрунтів у просторі [75]. Слід зазначити, що модель SWIM була апробована не лише для басейнів річок Європи, Азії, Північній та Південній Америці, а й для різних природних зон України [76].

Прикладом гідродинамічних математичних моделей з розподіленими параметрами найбільш відомими є Європейська гідрологічна система (SHE) [77], [78], яка включає систему диференціальних рівнянь в часткових похідних, що описують такі фізичні процеси на басейні, як затримання опадів рослинністю, сумарне випаровування, схилловий та русловий стік, рух води в зоні аерації й зоні насичення та сніготанення. Також, подібною є гідродинамічна модель DHSWM (Distributed Hydrology Soilsand Vegetation Model), розробка американських вчених університету в Сієтлі – основні автори Вігмоста і Леттенмайєр [79].

Модель «Майк-11» Датського гідралічного інституту [80], в яку входить модель опади-стік NAM належить до глобальної системи «MIKE-11» (<https://www.dhigroup.com/>). Модель є професійним інженерним програмним пакетом, який складається з низки моделей та може бути застосована для

оперативного прогнозу стоку будь-якого річкового водозбору, прогнозу затоплень паводковими водами, моделювання протипаводкових заходів, експлуатації іригаційних систем і систем поверхневого дренажу, проєктування систем каналів, моделювання припливних і штормових хвиль в річках і естуаріях та ін. Система «MIKE 11» опирається на гідродинамічний модуль, який заснований на розв'язанні інтегральних рівнянь нерозривності й збереження енергії, відомих, як рівняння Сен-Венана.

В оперативній практиці гідрологічного прогнозування Європи та Світу з метою запобігання стихійних лих та попередження гідрологічних ризиків викликаних дощовими паводками та проходженням весняних водопіль велика увага приділяється комплексним системам гідрологічного прогнозування, які складаються з ансамблем прогнозних моделей.

Так, у Японії (м. Токіо) в Національному дослідницькому центрі по запобіганню стихійних лих розроблена резервуарна (танк-модель) модель [2], [81] в якій ґрунтова товща представляється у вигляді системи резервуарів, розташованих один над іншим. В моделі передбачається, що всі дощові опади та талі води потрапляють в самий верхній резервуар та витікають через донний отвір потрапляючи в наступний резервуар, що залягає нижче. Виняток становить лише найнижчий резервуар, оскільки вода, що потрапила до нього, є втратою для системи. Кількість і розмір резервуарів, а також розташування вихідних отворів є параметрами моделі.

Прикладом локальних розробок методів оперативного прогнозування проходження максимальних витрат води є система гідрологічного прогнозування в реальному часі HydroProg розроблена у Вроцлавському університеті (Польща) [82]. Система служить як загальний інструмент, який може використовуватися для надання попереджень про гідрологічні небезпеки. В систему HydroProg вбудований генератор багатомодельного ансамблевого прогнозу, що дозволяє застосовувати систему в різних річкових басейнах, обладнаних гідрометеорологічними мережами.

Комплексна система гідрологічного моделювання – гідрологічна модель HBV (Hydrologiska Byrans Vattenbalans avdelning model) розроблена у Шведському метеорологічному та гідрологічному інституті (SMHI). Це одна з перших моделей, яка розроблена ще на початку 70-х років з метою підвищення якості управління гідроенергетичного комплексу [2]. Перші прогнози були виконані для басейнів у північній частині Швеції у 1975 році [83], [84]. Модель HBV – це концептуальна гідрологічна модель, що дозволяє виконувати безперервний розрахунок річкового стоку на басейні (періоду весняного водопілля, зимових та осінніх паводків та межені) при

застосуванні сучасних комп'ютерних засобів та даних калібрування. Ця модель є стандартним інструментом прогнозування у Швеції національної служби попередження повеней для близько 75 водозборів переважно малих та незарегульованих річок. Модель HBV використовується більш ніж в 50 країнах світу, як в оперативній практиці, так і з метою наукових досліджень.

Протягом перших двох десятиліть використання моделі HBV до її основної структури було внесено лише незначні зміни. На початку 90-х років було проведено комплексну переоцінку моделей HBV [83] та оновлення версії HBV-96. Вхідні дані моделі HBV – спостереження за опадами, температурою повітря, тиском пари, швидкістю вітру та оцінками можливого випаровування. Для розрахунку накопичення та танення снігу використовуються температура повітря, тиск пари та швидкість вітру. На сьогодні модель HBV – це інтегрована система гідрологічного моделювання: сучасний, добре перевірений та експлуатаційний інструмент. Модель забезпечена системами інформації та прогнозування погоди в реальному часі, такими як система WebHyPro (Шведського метеорологічного та гідрологічного інституту, SMHI) та використовується, як на персональних комп'ютерах, в концепції клієнтського сервера, так і інтегрована у програмний пакет для управління та збору даних SCADA / EMS-робочі станції. Також модель дозволяє враховувати зміни клімату на басейні та моделювати річковий стік при залученні сценарних даних опублікованих IPCC [84].

У Європейському союзі функціонує система прогнозування повеней European Flood Alert System (EFAS), розроблена під керівництвом об'єднаного дослідницького центра Єврокомісії в м. Іспра, Італія [85], [86]. Система EFAS має подвійне призначення – забезпечення сталого водопостачання та прогнозування небезпечних повеней. На виході система EFAS надає користувачам карти ймовірності виникнення повеней, ансамблеві прогнози стоку, інформацію про опади, доступну через веб-інтерфейс моніторинг паводкової обстановки. Прогноз уточнюється в міру надходження нових фактичних і прогнозних метеорологічних даних, при цьому, відповідно, зменшується завчасність прогнозу.

Технологія підготовки та випуску прогнозів заснована на басейновому принципі й повністю автоматизована. В структуру системи входить глобальна модель прогнозу погоди ECMWF, регіональна модель прогнозу погоди метеослужби Німеччини, модель формування паводкового стоку LISFLOOD і імітаційна модель затоплення території з погодинним тимчасовим кроком і високим просторовим розширенням. Подібний

функціонал вимагає наявності детальних даних про рельєф та інші характеристики підстильної поверхні [87].

Окрім Європейських глобальних моделей прогнозування повеней, досить потужною є система для прогнозування та оперативного оповіщення про повені, яка використовується у США – технологія FFG (Керівництво по швидко виникаючим паводкам), розроблена співробітниками національної метеослужби США і Гідрологічним дослідним центром в Сан-Дієго. Технологія FFG призначена для виявлення в оперативному режимі районів, де очікується формування швидких паводків, в тому числі на малих річкових басейнах, які не забезпечені гідрологічними спостереженнями [88].

Особливістю даної системи є розвинений блок оцінки полів опадів на основі даних радіолокаторів (системи NEXRAD) відкоригованих наземною мережею спостережень. Отримані за допомогою даної технології поля опадів використовуються як вхідні дані для моделі формування та танення снігового покриву та моделі розрахунку вологості ґрунту. Система забезпечує повністю автоматизований збір даних, засвоєння й обробку їх для моделювання та випуску прогностичної продукції.

На виході технологія формує поля показників, що відображають можливість формування повеней, показник загрози формування небезпечних повеней, а також оцінку прогнозу. Технологія має добре розвинений інтерфейс і дозволяє представляти вихідну продукцію у вигляді текстових форматів, карт і графіків. Крім США, дана технологія використовується у Мексиці, Коста-Ріці, Панамі, Румунії, Болгарії, Туреччині та інших країнах [88].

Модель показника водної безпеки (The ISciences Water Security Indicator Model, WSIM) розроблена у 1997 році корпорацією ISciences, LLC (США) безперервно веде прогнозування водних аномалій на глобальній основі із завчасністю 1-9 місяців. ISciences також дає оцінку впливу водних аномалій на стан людей, сільське господарство та виробництво електроенергії.

При цьому модель WSIM використовує сезонні прогнози температури та опадів, створені Національним управлінням океанічних і атмосферних досліджень (NOAA), системи прогнозування клімату, версія 2 (CFSv2). Комбінований показник водної аномалії базується на оцінках WSIM щодо вологості ґрунту, дефіциту випаровування, стоку та загальних аномалій морської води [89].

2.3.3 Сучасні математичні моделі довгострокових гідрологічних прогнозів

Прикладом математичних моделей для довгострокових гідрологічних прогнозів стоку об'єму тало-дощового та дощового стоку річок є *модель Л.С. Кучмента* [90]-[92]. Модель дає можливість побудови ансамблевих (складених за різними методиками в одну і ту ж дату прогнозу) довгострокових прогнозів об'єму річкового стоку та максимальних витрат води весняного водопілля за допомогою фізико-математичного і динаміко-стохастичного моделювання формування стоку з врахуванням антропогенного впливу на формування річкового стоку. Динамічна частина моделі заснована на розв'язанні рівнянь Сен-Венана та включає опис процесів формування снігового покриву і сніготанення, інфільтрацію, промерзання і відтанення ґрунту, випаровування, стікання води по схилах водозбору і в річковій мережі. Стохастична складова моделі включає опис часового ходу опадів окремо для теплого і холодного періоду року, середньодобових температур повітря для холодного періоду і дефіцитів вологості повітря для теплого періоду року. Також модель Л.С. Кучмента [91], [92] дозволяє розраховувати ймовірнісні характеристики максимального стоку повеней і дощових паводків. Модель апробована автором [92] для басейнів річок Сейм (до м. Курськ) і В'ятка (до м. В'ятські Поляни).

На даний час, математичні моделі широко використовуються в оперативній практиці довгострокового гідрологічного прогнозування в Українському Гідрометцентрі ДСНС України (УкрГМЦ). В основу вітчизняних моделей покладено різні принципи до складання прогнозу – водно-балансове рівняння (модель «СЛОЙ-2») [51], [52], або типізація водності водопіль за сполученням комплексу стокоутворюючих чинників (метод територіальних довгострокових прогнозів рівнинних річок) [31]-[33].

Математична модель СЛОЙ-2 (автор М.М. Сусідко), застосовується для довгострокового прогнозування характеристик стоку весняного водопілля [51], [52] та дозволяє проводити дослідження динаміки зимово-весняних процесів на річковому водозборі [93].

Математична модель СЛОЙ-2, одна з небагатьох наявних моделей, яка може бути застосована в різних фізико-географічних умовах [51], тобто, як для рівнинних [51], [52], [93]-[95], так і гірських територій [61], [95] та враховує неоднорідність ландшафтних і гідрометеорологічних умов формування весняного стоку.

Часова динаміка зимово-весняних процесів у моделі здійснюється в оперативному режимі надходження вихідної інформації по даних спостережень на метеорологічних станціях [52] при безперервному її надходженні за допомогою системи АРМ-гідро [65]. Модель дозволяє аналізувати для відкритих і заліснених частин річкових басейнів процеси стокоутворення – снігонакопичення та сніготанення, зміни стану підстильної поверхні водозбору, динаміки глибини промерзання і відтаювання ґрунтів, їх зволоженості (при врахуванні зимових відлиг). Для розрахунку водовіддачі під час зимових відлиг в моделі використаний методичний підхід з використанням коефіцієнтів танення та показників водоутримувальної спроможності снігу.

Модель прогнозу максимальних витрат води може бути застосована для невивчених у гідрологічному відношенні водозборів. При цьому прогноз максимальних витрат води весняного водопілля потребує наявності прогнозних шарів стоку весняного водопілля, що збільшує похибку прогнозу.

Практичною цінністю моделі СЛОЙ-2 є можливість представлення прогнозних величин шарів стоку весняного водопілля у картографічному вигляді. Проте, недоліком моделі є не можливість картування максимальних витрат води весняного водопілля.

На відміну від моделі СЛОЙ-2 метод територіальних довгострокових прогнозів шарів стоку, максимальних витрат води весняного водопілля рівнинних річок України та строків їх проходження авторів [32], [33] розв'язує задачу просторового прогнозування гідрологічних характеристик весняного стоку річок при попередньому встановленні типу або діагнозу водності майбутньої весни, отриманні за регіональними залежностями прогнозних величин, та їх представлення у картографічному вигляді не тільки шарів стоку, а й максимальних витрат води, але виражених у безрозмірних величинах. Основною перевагою моделі є можливість одержання як прогнозних, так середньобаторічних характеристик стоку (які є базовими в прогнозній методиці), включаючи й річки, що не охоплені тривалими гідрологічними спостереженнями для надійного розрахунку їх статистичних величин. При визначенні останніх, авторами методу [32], [33] прийнята теорія руслових ізохрондобігання води, реалізована для типового одноmodalного гідрографу весняного водопілля [96], [97].

Метод територіальних довгострокових прогнозів характеристик весняного водопілля рівнинних річок на основі типізації водності водопіль. Методичною базою для довгострокових прогнозів характеристик весняного водопілля (шарів стоку та максимальних витрат води) на рівнинних річках є встановлення їх залежностей від сумарних запасів води в сніговому покриві

та весняних дощових опадів. Такі залежності виражені авторами [32], [33] у модульних коефіцієнтах, тобто відносно їх середньобагаторічних величин для річок, по яких є багаторічні ряди гідрометеорологічних спостережень у вигляді

$$Y_m/Y_0 = f[(S_m + X_1 + X_2)/(S_0 + X_{10} + X_{20})], \quad (2.11)$$

$$q_m/q_0 = f[(S_m + X_1)/(S_0 + X_{10})] \quad (2.12)$$

або, як

$$k_Y(k_q) = k_X, \quad (2.13)$$

де Y_m і Y_0 – шари весняного стоку і їх середньобагаторічні величини, мм;

q_m і q_0 – максимальний модуль весняного водопілля і його середньобагаторічна величина, м³/с;

$k_Y(k_q)$ – модульний коефіцієнт шарів стоку (максимальних витрат води) весняного водопілля;

k_X – модульний коефіцієнт сумарного надходження води на водозбір у період весняного водопілля;

S_m і S_0 – максимальні запаси води в сніговому покриві, які сформувалися на поверхні річкових водозборів наприкінці зими, тобто перед весняною хвилею водопілля і їх середньобагаторічні величини, мм;

X_1 і X_{10} – дощові опади періоду танення снігу (опади, які сумуються за період від дати настання максимальних запасів води в сніговому покриві S_m до дати завершення сніготанення, що може бути встановлена по даті проходження максимальних витрат води весняного водопілля річок Q_m) і їх середньобагаторічні величини, мм;

X_2 і X_{20} – дощові опади періоду спаду весняного водопілля (опади, які сумуються за період від дати проходження максимальних витрат води весняного водопілля Q_m до дати закінчення весняного водопілля) і їх середньобагаторічні величини, мм;

При випуску прогнозу методикою передбачено на першому етапі складання альтернативного (якісного) прогнозу типу водності весняного водопілля, на другому – кількісного прогнозу шарів стоку чи максимальних витрат води весняного водопілля.

Попередня оцінка типу розвитку весняних процесів, тобто складання альтернативного (якісного) прогнозу майбутнього водопілля – вищого,

близького або нижчого за середньобагаторічне значення (норму) здійснюється при врахуванні комплексу гідрометеорологічних чинників весняного водопілля та використанні багатовимірної стохастичного аналізу (дискримінантної функції DF). Функція DF розраховується в дату випуску прогнозів (ДВП) за рівнянням, структуру якого прийнято за [98]

$$DF = a_0x_1 + a_1x_2 + \dots + a_mx_m, \quad (2.14)$$

де $A(a_0, a_1, \dots, a_m)$ – вектор коефіцієнтів дискримінантної функції;
 m – кількість ознак чи дискримінантних змінних ($j=1,2,\dots,m$), які характеризують об'єкт дослідження.

За знаком дискримінантних рівнянь (більше або менше нуля) весняне водопілля на річках можна диференціювати за типами водності. Так, коли дискримінантна функція $DF1 > 0$, то слід очікувати формування весняного водопілля вищим за норму (середньобагаторічну величину значення). Якщо ж $DF1 \leq 0$, а $DF2 \geq 0$, то водопілля буде розвиватися за ситуацією, коли очікуються об'єми чи максимуми весняних вод близькими до норми. У випадку, коли $DF1 < 0$ й $DF2 < 0$, водопілля очікується нижчим за норму.

Автором [33] встановлено, що для річкових систем, які знаходяться в однорідних умовах формування весняних водопіль дискримінантні рівняння є стійкими та можуть використовуватися для всіх річок таких районів. При цьому в межах рівнинної території України виділено 11 однорідних районів з підрайонами.

На другому етапі прогностичної схеми відбувається встановлення кількісних величин модульних коефіцієнтів шарів стоку k_Y чи максимальних витрат води k_q (відповідно групи водності водопіль за знаком дискримінантної функції DF) у вигляді [33]

$$k_Y(k_q) = b_0 + b_1k_X + b_2k_X^2 + b_3k_X^3, \quad (2.15)$$

де b_0, b_1, b_2, b_3 – районні коефіцієнти рівняння (2.15), що однакові для однорідних за умовами весняного стоку районів [33].

При встановленні за прогнозною методикою очікуваних модульних коефіцієнтів k_Y та k_q визначаються самі величини:

- для шарів стоку

$$Y'_m = k_Y \cdot Y_0 \cdot K_{Y_{2010}}; \quad (2.16)$$

- для максимальних витрат води

$$Q'_m = k_q \cdot Q_0 \cdot K_{Q_{2010}} \quad (2.17)$$

або, аналогічно

$$Q'_m = k_q \cdot q_0 \cdot F \cdot K_{Q_{2010}}. \quad (2.18)$$

Оскільки параметри та базові картосхеми в методі територіальних довгострокових прогнозів характеристик весняного водопілля рівнинних річок України [33] обґрунтовані при обробці часових рядів станом на 2000 р., автором [33] запропоновано до значень середньобаторічних величин характеристик стоку вводити коригувальні коефіцієнти (до шарів стоку $K_{Y_{2010}}$ та максимальних витрат води $K_{Q_{2010}}$), що враховують зміни водності весняного водопілля за сучасні роки (станом на 2010 р.).

Можливість територіального прогнозування за (2.16) та (2.17), (2.18) зумовлена розрахунком середньобаторічних шарів стоку Y_0 або максимальних модулів весняного водопілля q_0 .

За наявності тривалих стокових спостережень середньобаторічні величини шарів стоку весняного водопілля розраховуються для кожної конкретної річки за часовим рядом стокових спостережень на ній.

Середньобаторічні величини шарів стоку весняного водопілля Y_0 , мм, визначаються в [33] для будь-яких річок території, у т.ч. невивчених в гідрологічному відношенні, за картосхемою їх розподілу по території (без урахування впливу лісів і боліт на річковому водозборі). Вплив лісу та боліт на шар весняного стоку Y_0 враховується при використанні коефіцієнтів [33]

$$k_L = 1 - 0,082 \lg(f_L + 1); \quad (2.19)$$

$$k_{\bar{O}} = 1 - 0,24 \lg(f_{\bar{O}} + 1), \quad (2.20)$$

де f_L , % та $f_{\bar{O}}$, % – площі лісу і боліт на басейні.

Середньобаторічні величини максимальних модулів весняного водопілля q_0 , м³/(с·км²) визначаються за операторною моделлю формування максимального стоку за рівнянням [96], [97], [33]

$$q_0 = q'_0 \psi(t_p / T_0) \varepsilon_F r, \quad (2.21)$$

де q_0 – середньобагаторічний модуль максимального стоку, $\text{м}^3/(\text{с} \cdot \text{км}^2)$;
 q'_0 – середньобагаторічний модуль максимальної витрати води
схилового припливу, $\text{м}^3/(\text{с} \cdot \text{км}^2)$;
 $\psi(t_p / T_0)$ – трансформаційна функція розпластування повеневих
хвиль під впливом руслового добігання;
 ε_F – коефіцієнт русло-заплавного регулювання;
 r – коефіцієнт трансформації водопіль під впливом озер і водосховищ
руслового типу.

Авторами методу [32], [33] обґрунтовані регіональні узагальнення при визначенні параметрів операторної моделі формування максимального стоку. При цьому для визначення тривалості схилового припливу талодощової води T_0 в басейнах річок рівнинної України запропоновано картосхему розподілу величин по території (без урахування впливу лісів і боліт на річковому водозборі) [33]. Вплив лісу та боліт на тривалості схилового припливу талодощової води T_0 враховується при використанні коефіцієнтів [33]

$$k'_L = 1 + 0,37 \cdot \lg(f_L + 1); \quad (2.22)$$

$$k'_\delta = 1 + 1,23 \cdot \lg(f_\delta + 1). \quad (2.23)$$

На третьому етапі ведеться визначення ймовірнісних характеристик весняного водопілля в багаторічному періоді та їх представлення в прогностичній методиці [31]-[33].

Забезпеченість прогнозованих величин Y_m та Q_m встановлюється за їх модульними коефіцієнтами k_Y й k_Q та їх статистичними параметрами – коефіцієнтами варіації шарів стоку $(C_v)_Y$ та максимальних витрат води $(C_v)_Q$ [33]. Використовуючи таблицю трипараметричного гама-розподілу С.М. Крицького і М.Ф. Менкеля [99] при встановленому для даної території $C_s / C_v = 2,5$, знаходять забезпеченість очікуваних шарів стоку та максимальних витрат води весняного P_Y , % та P_Q , % у вигляді інтервалу забезпеченостей

$$P_1 < P_Y(P_Q) < P_2, \quad (2.24)$$

де P_1 та P_2 — верхня і нижня межі забезпеченості, %, що встановлюються по таблицях С.М. Крицького и М.Ф. Менкеля (для середнього по території значення $C_s / C_v = 2,5$) [100].

Практична реалізація методу територіальних довгострокових прогнозів стокових характеристик весняного водопілля рівнинних річок України для різних регіонів представлена в роботах автора методу [31]-[33], у тому числі й за участю автора даного дослідження [43]-[45], [101]-[104].

Метод територіальних довгострокових прогнозів характеристик весняного водопілля рівнинних річок дозволяє надавати прогнозні величини модульних коефіцієнтів шарів стоку та максимальних витрат води весняного водопілля та їх прогнозних забезпеченостей, як в табличному вигляді, так і у картографічній формі, тобто у вигляді картосхем розподілу по території ізоліній цих величин.

Метод прогнозування строків проходження весняних водопіль річок. Автором [33] при розробці методу територіальних довгострокових прогнозів характеристик максимального стоку весняного водопілля рівнинних річок України також обґрунтований метод просторових прогнозів дат початку та проходження максимальних витрат (рівнів) води весняних водопіль.

В запропонованій методиці прогнозу при визначенні дат початку весняного водопілля на річках на першому етапі здійснюється визначення тривалості водоутримуючої спроможності снігу, тобто визначається період від дати максимальних снігозапасів S_m до дати початку водопілля D_e (t_e , доби).

З цією метою в методиці прогнозування строків водопіль автором [33] були встановлені залежності тривалості водоутримуючої спроможності снігу t_e від середньодекадної температури повітря за першу, після дати максимальних снігозапасів D_{Sm} декаду ($\theta_1^\circ\text{C}$) для опорних створів в межах рівнинної території України [33].

Для прогнозування дат проходження максимальних витрат (рівнів) води весняного водопілля (D_{Q_m}) автором [33] були одержані регіональні залежності тривалості підйому водопілля (t_n , діб) від середньодекадної температури повітря за першу, після дати початку водопілля D_e , декаду ($\theta_2^\circ\text{C}$). Для середньобогаторічних значень $(t_n)_0$ (як завчасності прогнозів

D_{Qm}) встановлено [33], що в басейнах річок рівнинної території України спостерігається їх зростання зі збільшенням площ водозборів.

Метод просторових прогнозів дат початку та настання максимальних витрат чи рівнів води весняного водопілля передбачає встановлення їх повторюваності у багаторічному розрізі [33]. Така задача вирішена автором [33] при побудові емпіричних кривих забезпеченостей цих дат (у вигляді кількості діб від 31.01 до дати настання явища) за даними багаторічних рядів спостережень за строками водопіль на річках. Встановлення ймовірності P , % по таких кривих здійснюється за прогножною датою початку водопілля чи настання максимальної витрати води (в перерахунку прогнозованої дати у кількість діб від 1 лютого).

Практична реалізація методики прогнозування дат початку та настання максимальних витрат чи рівнів води весняного водопілля представлена в роботах [104], [105] у тому числі й за участю автора даного дослідження.

В запропонованому методі територіальних довгострокових прогнозів характеристик максимального стоку весняного водопілля річок та строків його формування [33] використовується картографічна форма представлення прогнозних величин, а саме, розподіл по території очікуваних модульних коефіцієнтів шарів стоку, максимальних витрат води весняного водопілля, дат початку та проходження максимальних витрат води, а також їх забезпеченостей у багаторічному періоді. Модель використовується в оперативній діяльності УкрГМЦ ДСНС України для прогнозу характеристик весняного водопілля й річок, не охоплених стаціонарними гідрологічними спостереженнями та автоматизована у вигляді програмних комплексів для басейнів річок Десна, Сейм, Прип'ять, приток Середнього Дніпра [106], [107].

Прогнозний метод реалізований для рівнинних річок України за даними спостережень до 2000 року включно, тому потребує удосконалення, на основі опублікованих ЦГО імені Бориса Срезневського даних (станом на 2015 рік), при уточненні коефіцієнтів і параметрів прогнозованої схеми та виявленні основних гідрометеорологічних чинників, які входять до вектор-предиктору дискримінантної функції, створенні нових програмних комплексів з можливістю просторового гідрологічного моніторингу, що дозволяє прогнозувати весняне водопілля за 15-35 діб до настання явища на річках.

Описану вище модель територіальних довгострокових прогнозів весняного водопілля рівнинних річок України (автор Ж.Р. Шакирзанова) буде покладено в основу даного дослідження при розробці методики довгострокових прогнозів характеристик максимального стоку в басейні річки Південний Буг.

3 РОЗРОБКА МЕТОДИКИ ДОВГОСТРОКОВОГО ПРОГНОЗУВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ВЕСНЯНОГО ВОДОПІЛЛЯ В БАСЕЙНІ РІЧКИ ПІВДЕННИЙ БУГ

Головною метою даного розділу досліджень є розробка методики довгострокового прогнозування характеристик весняного водопілля (шарів стоку та максимальних витрат води) в басейні р. Південний Буг. Основні завдання дослідження полягають в обґрунтуванні параметрів, розробці та реалізації моделі довгострокового прогнозування характеристик максимального стоку весняного водопілля в басейні р. Південний Буг, встановленні прогнозних забезпеченостей їх настання у багаторічному розрізі.

3.1 Основні теоретичні положення методики довгострокового прогнозування характеристик весняного водопілля в басейні р. Південний Буг

При науково-теоретичному обґрунтуванні методики довгострокового прогнозування характеристик весняного водопілля в басейні р. Південний Буг в основу покладено теорію руслових ізохрон [1], що описує природні закономірності процесів формування поверхневого схилового і руслового стоку річок для різних за розмірами та географічним положенням річкових водозборів.

Методичною базою довгострокових прогнозів характеристик весняного водопілля (шарів стоку та максимальних витрат води) в басейні р. Південний Буг став науковий метод територіальних довгострокових прогнозів характеристик максимального стоку весняного водопілля, обґрунтований Ж.Р. Шакірзановою для рівнинних річок України [2]. В основу прогностичної методики для річок басейну р. Південний Буг покладені регіональні залежності стокових величин від їх основних метеорологічних чинників – надходження сумарної кількості води, що формує стік водопілля (максимальних запасів води в сніговому покриві та дощових опадів, що беруть участь у формуванні весняної хвилі водопілля), що обґрунтовані в роботах [2]-[4]. Для просторового аналізу та узагальнення кількісних величин прогновної методики регіональні залежності представляються у вигляді модульних коефіцієнтів характеристик максимального стоку та їх метеорологічних чинників, тобто по відношенню до середньобагаторічних величин (норм) у вигляді (2.11)-(2.13) (розд. 2, п. 2.3.3).

Умови формування максимального стоку весняного водопілля річок басейну р. Південний Буг пов'язані з зимовим накопиченням снігу, що часто супроводжується відлигами, які призводять до танення і перерозподілу снігу, весняним таненням снігу і випадінням дощових опадів періоду водопілля, формуванням поверхневого схилового стоку за різних властивостей підстильної поверхні та утворенням руслового стоку річок. При цьому в рівнянні водного балансу для річок лісостепової та степової зон, в межах яких в основному розташований басейн р. Південний Буг, втрати талої та дощової води на інфільтрацію визначаються переважно глибиною промерзання ґрунтів в сполученні з їх вологістю, в зоні ж широколистяних лісів (верхів'я Південного Бугу) – вологістю ґрунтів та їх промерзанням, як показника вологонасиченості водозбору. В межах півдня лісостепової та степової зон роль опадів періоду спаду водопілля стає не суттєвою (розд. 2, п. 2.2.1).

Тож, враховуючи вплив багатьох гідрометеорологічних чинників на процес формування весняного стоку в основу побудови прогнозних залежностей для прогнозування шарів стоку та максимальних витрат води весняного водопілля покладено типізацію водопіль за їх водністю шляхом виявлення угруповань характерних за водністю років (наприклад, високих, середніх та низьких), реалізованої для басейну р. Південний Буг в [5]. Можливий вплив сукупної дії основних гідрометеорологічних чинників при формуванні різних за водністю водопіль здійснюється в роботі при використанні багатовимірного статистичного аналізу – дискримінантної функції. Склад вектор-предиктора дискримінантної функції визначався в даній роботі шляхом встановлення головних гідрометеорологічних чинників весняного стоку при використанні статистичної моделі факторного аналізу (на основі *R*-модифікації) (розд. 1, п. 1.3.2).

Прогнозні залежності будуються для опорних гідрологічних постів, забезпечених тривалими даними сумісних гідрологічних, метеорологічних та агрометеорологічних спостережень, а коефіцієнти прогностичних рівнянь підлягають встановленню для кривих, що побудовані відповідно до значень дискримінантної функції й узагальнюються для річок з однотипними умовами формування весняних водопіль, що розташовані в межах однорідних районів і підрайонів, які для басейну р. Південний Буг були встановлені в розд. 1, п. 1.3.4.

Одержання прогнозних величин шарів стоку та максимальних витрат води весняного водопілля по спрогнозованим модульним коефіцієнтам здійснюється при визначенні середньобагаторічних величин шарів стоку або максимальних витрат (модулів) води весняних водопіль.

3.2 Теоретичні основи методу дискримінантного аналізу

Дискримінантний аналіз являє собою розширення методів регресійного аналізу і знаходить широке застосування в науках про Землю, зокрема, гідрології. Дискримінація трактується як поділ і має багато спільного з класифікацією. В обох випадках відбувається поділ об'єктів, проте в разі класифікації кількість об'єктів або кластерів не відома [6]-[8].

Мета дискримінантного аналізу полягає в тому, щоб на основі даних різних характеристик (ознак) об'єкта класифікувати його, тобто віднести до однієї з декількох заданих груп (класів) оптимальним способом. При цьому, передбачається, що вихідні дані поряд з ознаками об'єктів містять категоріальну (групувальну) змінну, яка визначає приналежність об'єкта до тієї чи іншої групи [9]. Ідея дискримінантного аналізу полягає в знаходженні деякого напрямку (лінійної дискримінантної функції) уздовж якого мінливість векторної випадкової величини невелика і точки-вектори різних груп об'єктів утворюють в багатовимірному просторі області, які не перекриваються. Значення функції, що розташована на межі областей, називається дискримінантним числом і може бути обчислено, а згодом використано для поділу і віднесення об'єктів до відповідних груп [6]-[9].

Дискримінантний аналіз є загальним терміном та відноситься до декількох тісно пов'язаних статистичних процедур. Ці процедури можна розділити на методи інтерпретації міжгрупових відмінностей (*дискримінації*) і методи *класифікації* спостережень за групами [10]. Дискримінантне перетворення дає мінімум відношення різниці багатовимірних середніх значень для деякої пари груп до їх багатовимірної дисперсії шляхом побудови рівняння регресії, в якому залежними змінними є різниці між багатовимірними середніми цих груп.

У матричному позначенні це рівняння може бути представлене у вигляді [9]

$$[L]=[b]\cdot[D], \quad (3.1)$$

де $[L]$ – вектор-стовпець різниці між векторами середніх двох груп;

$[b]$ – вектор коефіцієнтів в дискримінантній функції;

$[D]$ – матриця дисперсій і коваріацій об'єднаної вибірки.

Рівняння вирішується за допомогою операцій обертання і множення матриць

$$[b]=[D]^{-1} \cdot [L]. \quad (3.2)$$

При розрахунку вектора $[b]$ коефіцієнтів дискримінантної функції за формулою (3.5) отримуємо дискримінантне рівняння [6]-[9]

$$D=a_1F_1+a_2F_2+a_3F_3+...+a_nF_n, \quad (3.3)$$

де $a_1, a_2, a_3, ..., a_n$ – коефіцієнти рівняння регресії;

$F_1, F_2, F_3, ..., F_n$ – значення ознак дискримінантної функції.

Таким чином, дискримінантним параметричним методом вирішується завдання поділу двох (або більше) класів об'єктів, наприклад A_1 та A_2 .

При застосуванні *методу інтерпретації міжгрупових відмінностей* розпізнавання кожного нового вектора (об'єкта) здійснюється за знаком різниці $D(F)-D_0$, де D_0 – значення дискримінантної функції між двома класами [9]. Якщо різниця додатна, то згідно з вирішальним правилом (Байеса) [9] вектор F слід віднести до класу A_1 , якщо від'ємна, то до A_2 . Керуючись цим правилом, ми добиваємося мінімуму середніх втрат, пов'язаних з неправильним розпізнаванням. Вдаючись до геометричних уявлень, можна сказати, що дискримінантна функція $D(F)$ описує деяку площину, яка найкращим чином (в сенсі середніх втрат) розділяє об'єкти, що належать різним класам.

При застосуванні *методу класифікації* головною задачею є встановлення однієї або декількох функцій, що забезпечують можливість віднесення даного об'єкта до однієї з груп A чи B . Ці функції називаються дискримінантними [9]. Вони залежать від значень змінних таким чином, що з'являється можливість віднести кожен об'єкт до однієї з груп. Ознаки, які використовуються для того, щоб відрізнити одну групу від іншої, називаються дискримінантними змінними (класифікаційними значеннями). Для кожної групи встановлюється середнє значення дискримінантної функції за дискримінантним рівнянням

- для групи A

$$D_1=a_1x_{11}+a_2x_{12}+a_3x_{13}+...+a_nx_{ij}; \quad (3.4)$$

- для групи B

$$D_2=a_1x_{21}+a_2x_{22}+a_3x_{23}+...+a_nx_{ij}, \quad (3.5)$$

де x_{ij} – середнє значення j -го признаку об'єкту i -ї групи.

В результаті рішення рівнянь (3.4) та (3.5) випадкова (прогнозна) величина буде віднесена до тієї групи, для якої дискримінантне значення (D_1 або D_2) виявиться *максимальним* [9], [10]. На сьогодні вирішення процедури дискримінантного аналізу можливе при застосуванні автоматизованих програм (наприклад, програма Statistica [11]), які дозволяють виконувати складні багатоваріантні обчислення з використанням великої кількості даних [9], [12].

Для перевірки значущості (якості) розподілу досліджуваних груп, наприклад, A_1 та A_2 , використовується різні критерії відбору дискримінантних змінних. Найбільш популярним є критерій лямбда Вілкса λ [12], який враховує відмінності між групами. Іншими словами, критерій лямбда Вілкса λ вказує на відношення внутрішньогрупової суми квадратів до загальної суми квадратів та характеризує вплив предиктора на дисперсію критерію, тобто показує наскільки обрані для дискримінації фактори розрізняють відокремлені групи A_1 та A_2 . Критерій лямбда Вілкса λ може набувати значень від 0 до 1. Причому, якщо значення $\lambda > 0,05$, то середні двох груп значимо різняться, тобто доведено значущість дискримінантних особливостей обраних чинників; якщо значення $\lambda > 0,05$, то необхідно підібрати інший набір предикторів. В багатьох дослідженнях при встановленні інформативних змінних також використовують відстань Махаланобіса [12]. Зі значенням λ пов'язані величини – критерій Фішера F та рівень значущості p . Критерій Фішера F показує відмінність між середніми значеннями заданих факторів для розподілу груп [6]. Причому, критерій Фішера F , застосовують лише в ситуації, коли необхідно виконати покроковий дискримінантний аналіз для відбору підмножини предикторів – включення (або виключення) їх до дискримінантної функції. При цьому, предиктори включають в рівняння регресії при найбільших значеннях критерію F [12]. При найменших значеннях критерію F предиктори виключають з рівняння регресії, оскільки вважається, що їх вплив незначний. Також, необхідно враховувати рівень значущості p , який відображає наскільки достовірними є отримані результати [6]. При цьому, достовірними вважаються дані, в яких рівень значущості p менший $p < 0,05$, тобто похибка не перевищує 5 %.

У даному дослідженні при розробці методики довгострокового прогнозування характеристик весняного водопілля в басейні р. Південний Буг дискримінація весняних водопіль (поділ на групи водності) буде виконана при застосуванні методу класифікації спостережень за групами.

3.3 Розробка методики довгострокового прогнозування характеристик весняного водопілля при врахуванні комплексу гідрометеорологічних чинників в басейні р. Південний Буг

3.3.1 Збір та первинна обробка гідрометеорологічної інформації

Для розробки методики довгострокового прогнозу характеристик весняного водопілля (шарів стоку та максимальних витрат води) в басейні р. Південний Буг обрано 12 опорних гідрологічних постів та залучено два пости території басейнів річок між Дністром та Південним Бугом (рр. Тилігул і Великий Куяльник). Вибір 12-ти гідрологічних постів на головній річці й притоках в басейні р. Південний Буг обумовлено їх рівномірним розташуванням по території басейну та приналежності річкових водозборів до виділених однорідних за умовами формування весняних водопіль районів (розд. 1, п. 1.3.4). Необхідною умовою є наявність в межах водозбору однієї та більше метеорологічних станцій.

Додаткові два пости території басейнів річок між Дністром та Південним Бугом (р. Тилігул – с. Березівка та р. Великий Куяльник – с. Северинівка) залучено у зв'язку рідкою мережею гідрометеорологічних спостережень на півдні досліджуваної території, а саме в районі П, підрайоні Пв. Таким чином, всього для розробки методики було залучено 14 гідрологічних постів (табл. 3.1). Розрахунковий період при розробці методики обумовлено наявністю спільних спостережень за стоковими характеристиками, метеорологічними та агрометеорологічними чинниками весняного водопілля.

При цьому, залучена режимна вихідна гідрометеорологічна інформація Державної гідрометеорологічної мережі про запаси води в сніговому покриві, атмосферні опади, температури повітря, запаси вологи в метровому шарі ґрунту, глибини промерзання ґрунтів, витрати води річок у зимово-весняний період, шари стоку і максимальні витрати води та строки проходження весняних водопіль (розд.1, підрозд. 1.2).

Опираючись на те, що спільний надійний період спостережень за опублікованими гідрометеорологічними характеристиками починається з 1966 р., для розробки методики було прийнято 50-ти річний період спостережень – з 1966 р. по 2015 р. Але слід звернути увагу, що для визначення середньобогаторічних значень стокових величин характеристик використано наявний (у [13]) ряд спостережень – з початку спостережень по 2015 р. включно.

Таблиця 3.1 – Опорні гідрологічні пости в басейні р. Південний Буг

Індекс поста	Річка-пост	Приналежні метеорологічні станції
Район І		
81346	Південний Буг – с. Пирогівці	Хмельницький
81361	Південний Буг – с. Тростянчик	Хмельницький, Хмільник, Вінниця, Жмеринка, Липовець, Гайсин
81393	Рів – с. Демидівка	Жмеринка
Район ІІ		
підрайон ІІа		
81408	Савранка – с. Осички	Крижопіль, Гайворон
підрайон ІІб		
81363	Південний Буг – с. Підгір'я	Хмельницький, Хмільник, Вінниця, Жмеринка, Липовець, Гайсин, Гайворон, Крижопіль
81414	Кодима – с. Катеринка	Любашівка
81417	Синюха – с. Синюхін Брід	Жашків, Звенигородка, Умань, Новомиргород, Помошна, Первомайськ
81430	Велика Вись – с. Ямпіль	Новомиргород
81433	Ятрань – с. Покотилове	Умань
81438	Чорний Ташлик – с. Тарасівка	Помошна
81446	Інгул – м. Кропивницький	Знам'янка
підрайон ІІв		
81450	Інгул – с. Новогорожено	Знам'янка, Долинська, Бобринець
81338	Тилігул – с. Березівка	Любашівка
81475	Великий Куяльник – с. Северинівка	Затишшя, Роздільна

3.3.2 Врахування комплексу гідрометеорологічних чинників при прогнозуванні типу водності весняного водопілля в басейні р. Південний Буг та методика їх визначення

На умови формування та розміри весняних водопіль впливає комплекс гідрометеорологічних чинників, які при різних комбінаціях чи сполученнях призводять до формувань водопіль різної водності.

Так, у роботі [5] встановлено, що на річках басейну Південного Бугу шари стоку Y_m та максимальні витрати води Q_m весняного водопілля залежать від низки чинників формування річкового стоку: максимальних запасів води в сніговому покриві S_m , мм, суми дощових опадів періоду танення снігу X_1 , мм, суми дощових опадів періоду спаду весняного водопілля X_2 , мм, максимальної глибини промерзання ґрунтів L_m , см, передпаводкової витрати води Q_{ne} , м³/с, середньомісячної температури повітря лютого місяця, θ_{02} °С. Ці фактори добре корелюють з характеристиками максимального стоку весняного водопілля, проте не встановлено з якою вагою кожен з них впливає на об'єм весняного стоку. Виявлення найбільш значущих факторів, що впливають на формування весняного стоку є вкрай важливим завданням, тому що, часто їх величини невідомі на дату випуску прогнозу підлягають попередньої оцінки, що впливає на точність і справджуваність прогнозів.

Виявлення угруповань типу водності водопіль було здійснено за комплексом гідрометеорологічних чинників. Враховуючи різноманітність умов формування стоку весняного водопілля (розд. 1, підрозд. 1.5, розд. 2, п. 2.2.1) в роботі виконаний ретельний аналіз різних гідрометеорологічних чинників весняного водопілля в різних, однорідних за умовами формування весняного стоку районах розглядуваної території. Для визначення головних чинників формування весняного стоку на басейнах річок розглядуваної території був використаний метод факторного аналізу. При цьому, результати встановлення головних гідрометеорологічних чинників весняного стоку річок басейну Південного Бугу показали, що найбільші факторні навантаження на шар стоку весняного водопілля Y_m мають максимальні запаси води в сніговому покриві S_m , опади періоду весняного водопілля X_1 та максимальні глибини промерзання ґрунтів L_m (розд. 1, табл. 1.5).

Для встановлення гідрометеорологічних чинників для виявлення угруповань типу водності водопіль (високих, середніх або низьких) було використано апарат дискримінантної функції – багатовимірної статистичної моделі, яка дозволяє за комплексом гідрометеорологічних чинників (вектор-

предиктором), що впливають на формування процесу, поділити вихідну вибірку на групи або класи (підрозд. 3.2).

3.3.3 Визначення основних гідрометеорологічних чинників вектор-предиктору дискримінантної функції

Серед основних гідрометеорологічних чинників, що сформували вектор-предиктор найбільш надійно можуть бути встановлені шляхом їх вимірювання запаси води в сніговому покриві S_m та глибини промерзання ґрунтів L_m (як показник втрат води на інфільтрацію в період формування на басейнах весняного стоку річок). Дошові опади X_1 , які випадають на поверхню водозбору невідомі до початку весняного водопілля та враховуються в прогностичній схемі, за рекомендаціями автора [2], у вигляді нормованої величини з врахуванням метеорологічного прогнозу (як опади вище, близькі або нижче за норму).

Розподіл снігу на поверхні досліджуваного водозбору має нерівномірний характер і безперечно залежить від типу підстильної поверхні та метеорологічних умов періоду снігонакопичення в кожному конкретному році. Враховуючи нерівномірність снігонакопичення в полі й лісі середні зважені значення максимальних запасів води в сніговому покриві, S_{m_n} , мм, на водозборах визначаються за формулою [14], [15]

$$S_m = S_{m_n} \cdot (1 - f_l) + k_l \cdot S_{m_n} \cdot f_l, \quad (3.6)$$

де S_m – значення середніх на водозборі максимальних запасів води в сніговому покриві, мм;

S_{m_n} – середні значення максимальних запасів води в сніговому покриві (виміряні у полі), мм,

k_l – коефіцієнт снігонакопичення у лісах різної породи,

f_l – залісеність водозборів (в частках від площі водозборів).

За експериментальними дослідженнями встановлено [14]-[18], що на початку весни снігу в лісі накопичується більше, ніж у полі. Про це свідчать значення коефіцієнтів снігонакопичення k_l у лісах різної породи в різних фізико-географічних зонах отриманими авторами [3], [19]-[24], у тому числі й автором [25]. Так, за даними паралельних снігомірних зйомок у полі та лісі, що здійснюють 6 метеорологічних станцій в басейні р. Південний Буг, за період з 1960 по 2015 рр. побудовано зв'язок максимальних запасів води в сніговому покриві у полі та лісі (рис. 3.1).

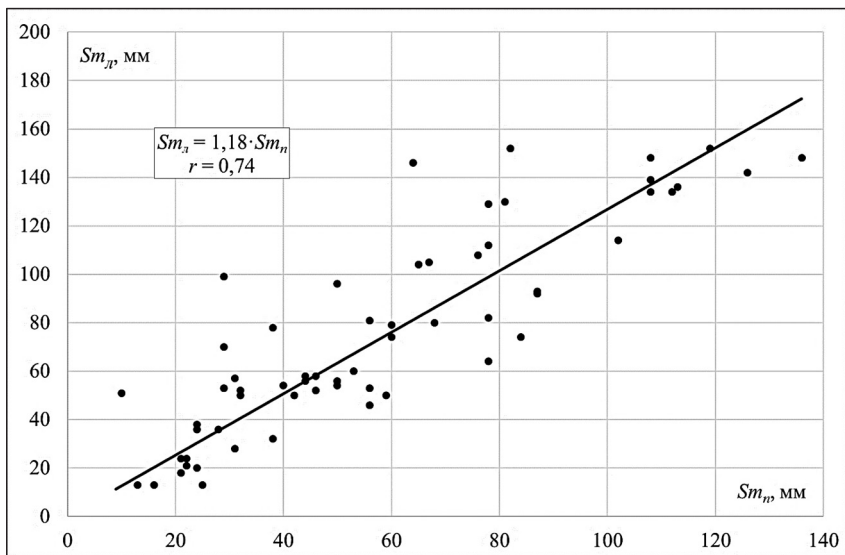


Рисунок 3.1 – Зв’язок максимальних запасів води в сніговому покриві у полі S_{m_n} та лісі S_{m_l} в басейні р. Південний Буг

Зв’язок показав, що снігонакопичення у лісі на 18 % більше ніж у полі. Коефіцієнт кореляції при цьому становить 0,76. В середньому для басейну Південного Бугу значення k_d прийнято рівним 1,18 [25]. Узагальнені авторами [3] в табл. 3.2 значення коефіцієнтів снігонакопичення k_d в лісах різної породи в різних фізико-географічних зонах були доповнені автором роботи по сучасним даним снігомірних зйомок. Так, у хвойних лісах вони менші й змінюються від 1,08 до 1,23, в мішаних – значення дещо більші (1,16 – 1,39).

Слід зазначити, що в лісах будь-яких порід снігу може накопичуватися менше, ніж в полі [16]. Це може бути викликано затримуючим впливом крон дерев, меншою щільністю снігу в лісі при максимальній висоті снігового покриву, що перевищує цю висоту в полі та наявністю крижаної кірки в полі, що значно збільшує загальні запаси води на басейні перед початком весняного сніготанення. Для аналізу зміни запасів води в сніговому покриві, які накопичуються на водозборах перед початком весняного водопілля доцільно у кожному році будувати картосхеми їх розподілу по території, що є основою при складанні територіальних прогнозів характеристик стоку весняного водопілля.

Таблиця 3.2 – Значення коефіцієнтів снігонакопичення в лісі k_s

Район дослідження	Порода лісу				Автори дослідження
	хвойний (вік)			мішаний	
	20-40 років	40-50 років	50-60 років		
басейн Верхнього Дніпра	1,23	1,16	1,08	1,39	В.В. Салазанов [20]
басейни рр. Сож, Верхній Дніпро				1,31	Л.Т. Пашова [21]
басейни річок Березини, Друти				1,13	Л.Т. Пашова [21]
басейн р. Немана				1,13	Е.Д. Гопченко, Ж.Р. Шакірзанова [3]
басейни річок Білорусі	1,15	1,15	1,08	1,16	Е.Д. Гопченко, Ж.Р. Шакірзанова [3]
				1,12-1,20	П.В. Грун, Ю.Д. Сироткін [23]
				1,21	В.В. Рахманов [19], А.Б. Крижановська [22]
басейн р. Дністер				1,29	В.А. Овчарук, А.В. Траскова [24]
басейни рівнинних річок України				1,21	В.А. Овчарук [25]
басейн р. Південний Буг				1,18	Ж.Р. Шакірзанова, А.О. Казакова [26]

Максимальні запаси води у сніговому покриві перед весняним водопіллям у прогнозу схему включаються у вигляді модульних коефіцієнтів, тобто по відношенню до їх середньобаторічних значень (норми) [2], [3]

$$k_S = \frac{S_m}{S_0}, \quad (3.7)$$

де S_0 – середньобаторічні значення (норма) максимальних запасів води на водозборі, мм.

В даній роботі авторами при використанні даних снігомірних зйомок у полі по 25 метеорологічних станціях за період 1966-2015 рр. були визначені максимальні перед весняним водопіллям запаси води в сніговому покриві та створена база даних по снігомірних зйомках.

Встановлення середньобаторічних значень максимальних запасів води в сніговому покриві в басейні річки Південний Буг виконано шляхом статистичної обробки їх часових рядів [26], [27]. Середньобаторічні значення максимальних перед весняним водопіллям запасів води в сніговому покриві у полі S_{0n} коливаються від 63 мм на ст. Липовець до 22 мм – ст. Сербка.

Моментні коефіцієнти варіації максимальних запасів води в сніговому покриві досліджуваних басейнах річок коливаються в межах від 0,59 (ст. Вознесенськ, $n = 38$ років) до 0,83 (ст. Затишшя, $n = 50$ років) при середньому C_v по регіону – 0,70, правдоподібні – майже не відрізняються у розкиді значень і коливаються в межах від 0,59 (ст. Вознесенськ, $n=38$ років) до 0,84 (ст. Затишшя, $n=50$ років) при середньому C_v по регіону – 0,70.

Величини S_{0n} картовано у вигляді рис. 3.2, значення змінюються в широтному напрямку з північного заходу – від 60-50 мм на південь до 30-25 мм.

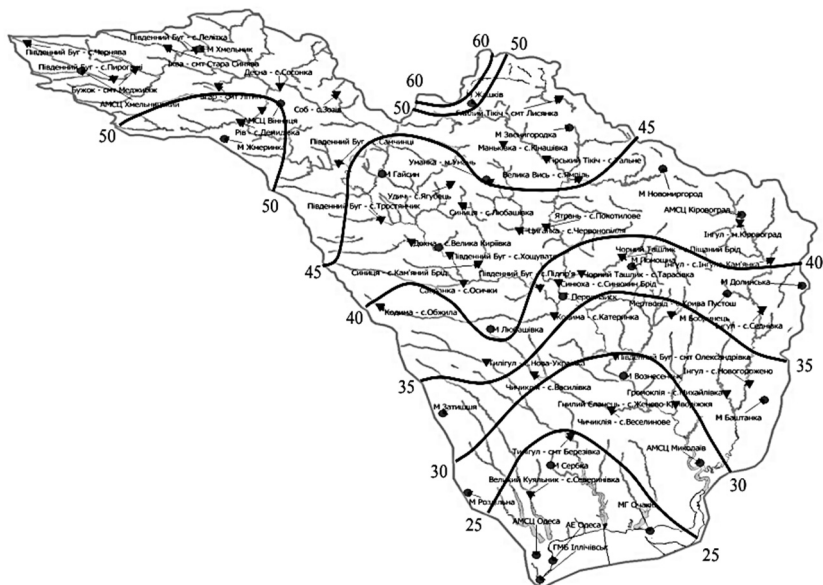


Рисунок 3.2 – Розподіл середніх багаторічних максимальних запасів води в сніговому покриві у полі в басейні р. Південний Буг та малих річок між Дністром і Південним Бугом, мм

Важливим питанням при складанні прогнозу стоку весняного водопілля річок в будь-яку календарну дату є визначення середньобогаторічної добавки $\Delta\bar{S}$, мм, яка враховується при встановленні величин максимальних снігозапасів S_m [2]. Автором [2] запропоновано середньобогаторічні добавки до максимальних запасів води в сніговому покриві встановлювати за регіональним рівнянням

$$\Delta\bar{S} = b + a \cdot (\varphi' - 50), \quad (3.8)$$

де φ' – географічна широта метеорологічних станцій, в частках 0 півн. ш.

Коефіцієнти a й b у формулі (3.8) визначені для календарних дат випуску прогнозів шляхом побудови узагальнених залежностей від кількості днів від 1 лютого до ДВП (дати випуску прогнозу), орієнтуючись на метеорологічний прогноз температури повітря. Умови введення добавки $\Delta\bar{S}$ та регіональні рівняння для визначення коефіцієнтів рівняння (3.8), узагальнених для всієї рівнинної території України (у т.ч. для басейну Південного Бугу) наведені у табл. 3.3.

Таблиця 3.3 – Середньобогаторічні добавки снігу до максимальних запасів води в сніговому покриві $\Delta\bar{S}$ [2]

Умови введення добавки ($\Delta\bar{S}$) в залежності від очікуваної температури повітря в лютому θ_{02} або березні θ_{03}		$\Delta\bar{S}$	Значення коефіцієнтів рівняння (3.8)	
ДСП: до дати 20 лютого	ДСП: від дати 20 лютого і пізніше		a	b
$\theta_{02,03} \leq (\bar{\theta}_{02,03} - 1^0 C)$	$\theta_{03} \leq (\bar{\theta}_{03} - 1^0 C)$	$\Delta\bar{S}_1$	2,14-0,074 Д	7,47-0,25 Д
$(\theta_{02,03} + 1^0 C) > \theta_{02,03} > (\theta_{02,03} - 1^0 C)$	$(\theta_{03} + 1^0 C) > \theta_{03} > (\bar{\theta}_{03} - 1^0 C)$	$\Delta\bar{S}_2$	3,38-0,109 Д	20,4-0,61 Д
$\theta_{02,03} \geq (\bar{\theta}_{02,03} + 1^0 C)$	$\theta_{03} \geq (\bar{\theta}_{03} + 1^0 C)$	$\Delta\bar{S}_3$	3,27-0,086 Д	26,8-0,55 Д

де Д – кількість днів від 1 лютого до ДВП (дати випуску прогнозу).

До вектор-предиктору, як один з головних факторів (за результатами факторного аналізу), що формує весняний стік в басейні р. Південний Буг, включено дощові X_1 .

При розробці методики прогнозу розрахунок середніх на водозборі опадів X_1 в кожному році ведеться, як середнє їх значення за вимірами в пунктах спостережень. Відповідно аналізу багаторічних даних, які отримані по 25 метеорологічним станціям розташованим в басейні р. Південний Буг, в середньому на водозборі опади періоду весняного водопілля змінюються від 15 до 33 мм [26].

Оскільки на дату випуску прогнозу дані про величини дощових опадів X_1 відсутні, в прогнозній схемі їх величини можуть бути оцінені таким чином [2]:

- або за середньобагаторічним значенням (нормою) дощових опадів X_{10} ;
- або з урахуванням метеорологічного прогнозу, як опади, що очікуються вище, на рівні або нижче середньобагаторічних значень (норми) шляхом введення відповідного коефіцієнту k_1 до норм опадів X_{10}

$$X_1 = k_1 \cdot X_{10}. \quad (3.9)$$

Коефіцієнт k_1 приймається відповідно метеорологічного прогнозу з табл. 3.4.

Таблиця 3.4 – Встановлення коефіцієнту k_1 з урахуванням метеорологічного прогнозу опадів X_1 для рівнинної території України [2]

Умови введення коефіцієнту k_1 до норм дощових опадів X_{10}	Коефіцієнти до норм опадів у формулі (3.9)
Опади вище норми: $(X_1 > X_{10} + 10 \text{ мм})$	$k_1 = 1,83 - 0,055 (\varphi^0 - 50)$
Опади біля до норми: $[(X_{10} + 10 \text{ мм}) \geq X_1 \geq (X_{10} - 10 \text{ мм})]$	$k_1 = 0,84 + 0,009 (\varphi^0 - 50)$
Опади нижче норми: $(X_1 < X_{10} - 10 \text{ мм})$	$k_1 = 0,29 + 0,029 (\varphi^0 - 50)$

де φ^0 – широта геометричних центрів тяжіння водозборів, в частках град. півн.ш.

В прогнозній методиці, як і інші стокоформуючі чинники весняного водопілля, опади X_1 включають у вигляді їх модульних коефіцієнтів. В такому разі необхідним є визначення середньобагаторічних величин опадів X_{10} . Розрахунок середньобагаторічних величин дощових опадів X_{10} виконано в роботі [2] для рівнинної території України (у т.ч. для басейну р. Південний Буг) за залежністю середньобагаторічних величин дощових опадів X_{10} від середньої тривалості періоду їх випадіння T_{X_1}

$$X_{1_0}=0,77 \cdot T_{X_1}+7, \quad (3.10)$$

де T_{X_1} (діб) – середня тривалість періоду дощових опадів, яка визначається за регіональною формулою виду

$$T_{X_1}=2,0 \cdot (\varphi^0 - 48) + 24. \quad (3.11)$$

Чинником, який в басейні р. Південний Буг визначає втрати води на інфільтрацію в ґрунт в період весняного сніготанення є максимальні (наприкінці зими) глибини промерзання ґрунтів L_m , см (під озимими культурами), які також включені в прогнозну схему у вигляді модульних коефіцієнтів, тобто по відношенню до середньобаторічних значень (норми) [2]

$$k_L = \frac{L_m}{L_0}, \quad (3.12)$$

де L_0 – середньобаторічні значення (норма) максимальних глибин промерзання ґрунту на водозборі, см.

В роботі здійснено збір та узагальнення даних по максимальним глибинам промерзання ґрунтів за період 1966-2015 рр. за даними 25 метеорологічних станцій в басейні р. Південний Буг. Середньобаторічні значення максимальних перед весняним водопіллям глибин промерзання ґрунтів L_0 коливаються від 53 см на ст. Жашків до 30 см – ст. Затишшя [25].

Розподіл по території середньобаторічних максимальних глибин промерзання ґрунтів перед весняним водопіллям представлений на рис. 3.3, з якого видно, що їх середньобаторічні значення змінюються в широтному напрямку з півночі – від 50-45 см на південь до 40-35 см і 35-30 см – південний захід.

3.3.4 Встановлення типу водності весняного водопілля в басейні р. Південний Буг

При розробці методики довгострокового прогнозу характеристик стоку весняного водопілля в басейні р. Південний Буг визначення типу водності весняного водопілля річок здійснювалося при використанні методу дискримінантного аналізу (підрозд. 3.2).

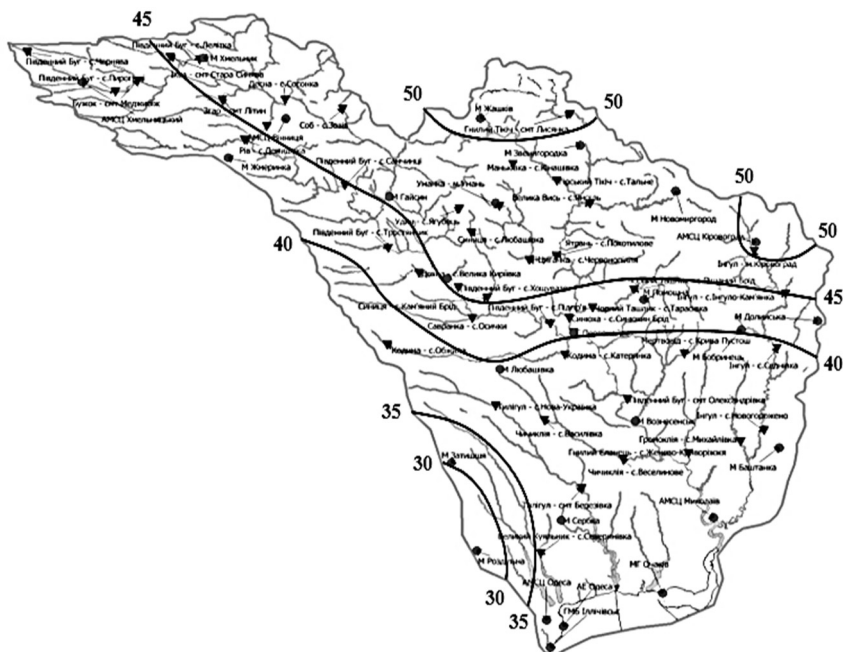


Рисунок 3.3 – Розподіл середньобагаторічних максимальних глибин промерзання ґрунтів в басейні р. Південний Буг та малих річок між Дністром і Південним Бугом, см

За встановленим вектор-предиктором головних метеорологічних чинників весняного водопілля (п. 3.3.3) проводилась дискримінація весняних водопілля (класифікація за групами водності).

При цьому, для проведення дискримінантного аналізу необхідно було групувати змінні, тобто віднести їх до тієї чи іншої групи, наприклад, групи *A* чи *B*. Далі, необхідно провести дискримінацію, причому, окрім параметрів, які підлягають дискримінації, ввести додатковий параметр – групувальну змінну (віднести водопілля до групи високої, середньої або низької водності). З цією метою для опорних створів басейну були побудовані регіональні залежності характеристик максимального стоку від їх метеорологічних чинників (у вигляді модульних коефіцієнтів):

- для шарів стоку весняного водопілля

$$k_Y = f(k_X), \quad (3.13)$$

де $k_Y = Y_m/Y_0$ – модульний коефіцієнт шарів стоку весняного водопілля (Y_m і Y_0 – шар стоку весняного водопілля і його середньобагаторічна величина, мм);

- для максимальних витрат води весняного водопілля

$$k_Q = f(k_X), \quad (3.14)$$

де $k_Q = q_m/q_0$ – модульний коефіцієнт максимальних витрат води весняного водопілля (q_m і q_0 – модуль максимального стоку весняного водопілля і його середньобагаторічна величина, $\text{м}^3/(\text{с} \cdot \text{км}^2)$);

k_X – модульний коефіцієнт сумарного надходження води на водозбір у період формування шару стоку чи максимальної витрати води весняного водопілля річок

$$k_X = (S_m + X_1)/(S_{m0} + X_{10}). \quad (3.15)$$

Для здійснення класифікації за групами водності на графіках $k_Y = f(k_X)$ або $k_Q = f(k_X)$ спочатку візуально обиралися групи водності весняних водопіль (високої, середньої або низької), що схематично показано при прогнозуванні шарів стоку на рис. 3.4 (для р. Інгул – с. Кропивницький) та при прогнозуванні максимальних витрат води на рис. 3.5 (для р. Південний Буг – с. Підгір'я).

Далі, для кожної з обраних груп встановлювалися дискримінантні рівняння за сформованим вектор-предиктором стокоформуєчих чинників весняного водопілля річок басейну р. Південний Буг в межах виділених районів та підрайонів однорідних за умовами формування весняного стоку. Розрахунки проводилися при використанні програми Statistica [11].

При виділенні трьох груп водності весняних водопіль (високої, середньої та низької) отримано по три дискримінантних рівняння виду

$$DF = a_1 \frac{S_m + X_1}{(S_m + X_1)_0} + a_2 \frac{L_m}{L_{m0}} + a_3, \quad (3.16)$$

де a_1, a_2, a_3 – коефіцієнти дискримінантної функції.

Розв'язальним правилом дискримінації угруповань є встановлення максимального значення дискримінантної функції за одержаним рівнянням виду (3.16).

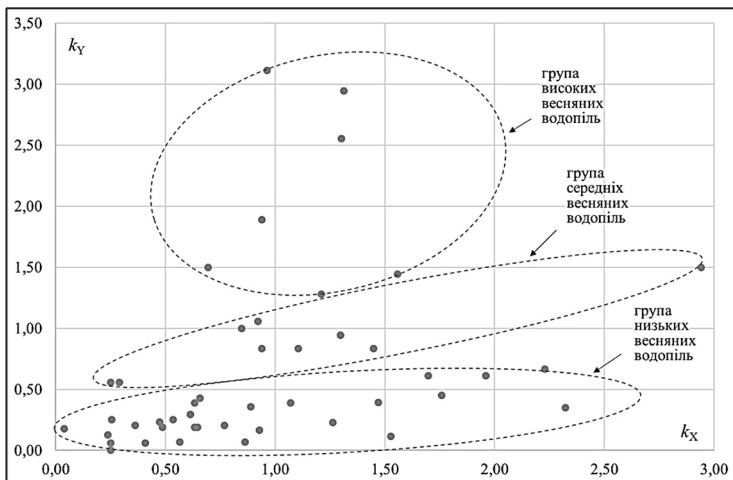


Рисунок 3.4 – Графік зв'язку модульних коефіцієнтів шарів стоку весняного водопілля k_y від модульних коефіцієнтів запасів води на басейні k_x для району II, підрайону IIб (басейн р. Інгул – с. Кропивницький)

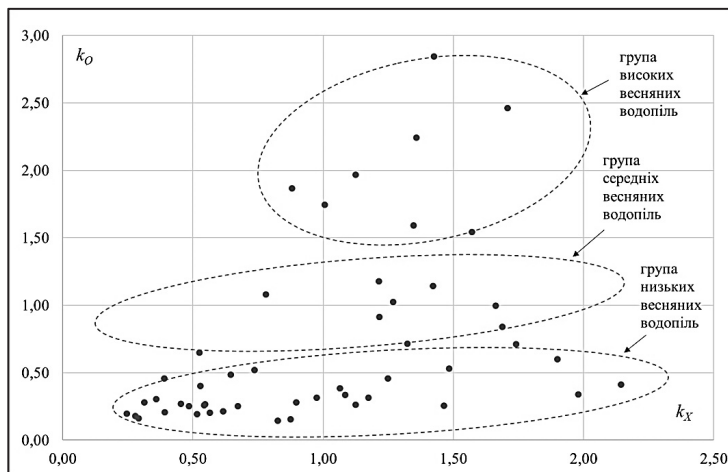


Рисунок 3.5 – Графік зв'язку модульних коефіцієнтів максимальних витрат води весняного водопілля k_Q від модульних коефіцієнтів запасів води на басейні k_x для району II, підрайону IIб (басейн р. Південний Буг – с. Підгір'я)

Умовні позначення до рис. 3.4 та рис. 3.5:

1 – група високих; 2 – середніх; 3 – низьких весняних водопіль

Тобто, тип водності весняного водопілля в басейні р. Південний Буг прогнозується по значеннях дискримінантної функції ($DF1$, $DF2$ та $DF3$) за умов:

якщо $DF1 > DF2$, $DF3$ – очікується весняне водопілля високої водності (вище норми);

- якщо $DF2 > DF1$, $DF3$ – очікується весняне водопілля середньої водності (близько норми);

- якщо $DF3 > DF1$, $DF2$ – очікується весняне водопілля низької водності (нижче норми).

Аналіз залежностей $k_Y = f(k_X)$ та $k_Q = f(k_X)$ показав, що розподіл точок та їх угруповання однотипні в межах виділених в басейні р. Південний Буг районів I та II (з підрайонами). В такому разі, отримані коефіцієнти дискримінантних рівнянь є сталими та можуть бути прийнятими, при типізації весняних водопіль для всіх річок однорідного району (підрайону). Класифікація за групами водності (високої, середньої або низької) показана при прогнозуванні шарів стоку на рис. 3.6 (для р. Синюха – с. Синюхін Брід) та при прогнозуванні максимальних витрат води на рис. 3.7 (для р. Савранка – с. Осички).

Значення коефіцієнтів дискримінантних рівнянь типу (3.16) для опорних водозборів в межах виділених однорідних за умовами формування весняного водопілля районів та підрайонів представлені при прогнозуванні шарів стоку у табл. 3.5, а максимальних витрат води у табл. 3.6.

По одержаних дискримінантних рівняннях було проведено оцінку значущості дискримінації. Так, критерій лямбда Вілкса λ , у більшості випадках, становив $\lambda \leq 0,05$. Це свідчить про те, що середні значення обраних груп значимо різняться, тобто доведено наявність дискримінантних особливостей обраних чинників. Рівень значущості p , який показує наскільки достовірними є отримані результати, у всіх випадках близький до 0, тобто похибка не перевищує 5 %.

Отримання прогнозних залежностей для трьох груп водності (високої, середньої та низької) весняного водопілля та етапи довгострокового прогнозування шарів стоку та максимальних витрат води весняного водопілля в басейні р. Південний Буг (для річок однорідних районів та підрайонів) представлено у наступних пунктах розділу.

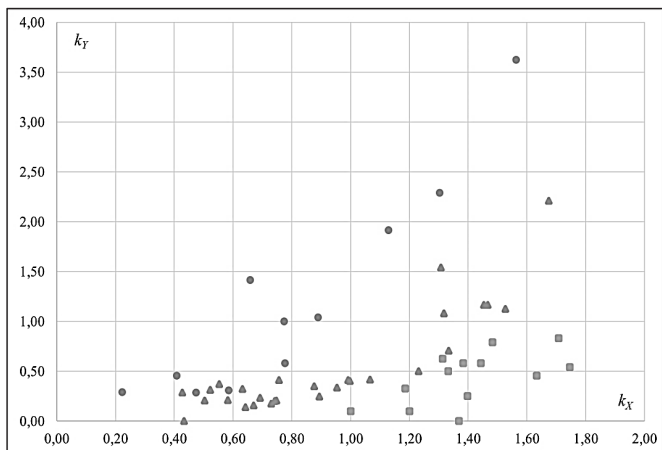


Рисунок 3.6 – Графік зв'язку модульних коефіцієнтів шарів стоку весняного водопілля k_Y від модульних коефіцієнтів запасів води на басейні k_X для району II, підрайону ПБ (басейн р. Синюха – с. Синюхін Брід)

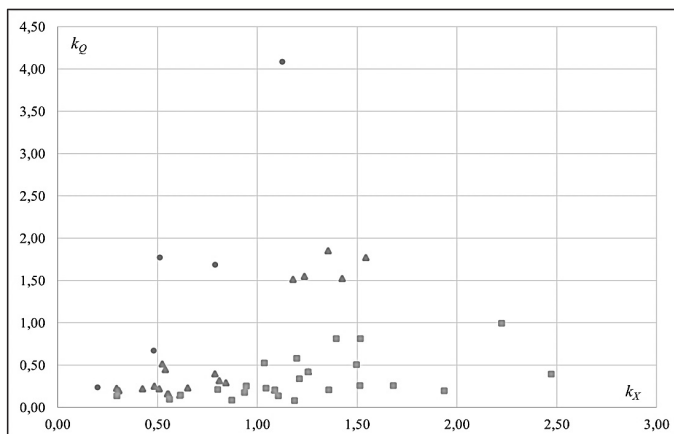


Рисунок 3.7 – Графік зв'язку модульних коефіцієнтів максимальних витрат води весняного водопілля k_Q від модульних коефіцієнтів запасів води на басейні k_X для району II, підрайону ПА (басейн р. Савранка – с. Осички)

Умовні позначення до рис. 3.6 та рис. 3.7:

- – група весняних водопіль високої водності ($DF1 > DF2, DF3$);
- ▲ – група весняних водопіль середньої водності ($DF2 > DF1, DF3$);
- – група весняних водопіль низької водності ($DF3 > DF1, DF2$)

Таблиця 3.5 – Коефіцієнти рівнянь дискримінантних функцій (3.16) при прогнозуванні шарів стоку весняного водопілля в басейні р. Південний Буг

Опорний пост в районі (підрайоні) для отримання коефіцієнтів в (3.16)	Опорні пости в районі (підрайоні), для яких прийняті коефіцієнти DF	Дискримінантна функція, DF	a_1	a_2	a_3
1	2	3	4	5	6
Район І					
Південний Буг – с. Тростянички	Південний Буг – с. Пирогівці, Рів – с. Демидівка	$DF1$	1,69	5,77	5,54
		$DF2$	3,42	3,10	3,75
		$DF3$	6,96	1,28	7,78
Район ІІ					
підрайони Іа та Іб (правобережжя)					
Савранка – с. Осички	Кодима – с. Катеринка	$DF1$	1,26	5,92	-4,99
		$DF2$	5,29	3,94	-5,56
		$DF3$	6,86	3,36	-7,22
підрайон Іб (лівобережжя)					
Синюха – с. Синюхін Брід	Велика Вись – с. Ямпіль, Ятрань – с. Покотилово, Чорний Ташлик – с. Тарасівка, Інгул – м. Кропивницький, Інгул – с. Новогорожене	$DF1$	3,43	8,40	-8,80
		$DF2$	5,36	5,41	-6,01
		$DF3$	7,64	2,30	-6,87
підрайон Ів					
Тилігул – с. Березівка	Великий Куяльник – с. Северинівка	$DF1$	2,33	7,45	-8,41
		$DF2$	2,25	4,35	-3,96
		$DF3$	2,42	3,68	-3,69

Таблиця 3.6 – Коефіцієнти рівнянь дискримінантних функцій (3.16) при прогнозуванні максимальних витрат води весняного водопілля в басейні р. Південний Буг

Опорний пост в районі (підрайоні) для отримання коефіцієнтів в (3.16)	Опорні пости в районі (підрайоні), для яких прийняті коефіцієнти DF	Дискримінантна функція, DF	a_1	a_2	a_3
1	2	3	4	5	6
Район І					
Південний Буг – с. Тростянець	Південний Буг – с. Пирогівці, Рів – с. Демидівка	$DF1$	2,89	6,48	-7,89
		$DF2$	2,34	5,04	-4,56
		$DF3$	3,78	3,06	-4,28
Район ІІ					
підрайон Іа та Іб (правобережжя)					
Савранка – с. Осички	Кодима – с. Катеринка	$DF1$	0,89	11,4	-12,2
		$DF2$	2,41	6,46	-5,27
		$DF3$	3,78	5,38	-5,27
підрайон Іб (лівобережжя)					
Синюха – с. Синюхін Брід	Велика Вись – с. Ямпіль, Ятрань – с. Покотилово, Чорний Ташлик – с. Тарасівка, Інгул – м. Кропивницький, Інгул – с. Новогорожене	$DF1$	5,26	13,7	-15,9
		$DF2$	3,93	10,9	-10,1
		$DF3$	6,22	5,69	-5,99
підрайон Ів					
Тилігул – с. Березівка	Великий Куяльник – с. Северинівка	$DF1$	2,33	7,45	-8,41
		$DF2$	2,25	4,35	-3,96
		$DF3$	2,42	3,68	-3,69

3.3.5 Побудова регіональних залежностей для довгострокового прогнозування шарів стоку та максимальних витрат води весняного водопілля в басейні р. Південний Буг

По виділених угрупованнях весняних водопіль за типом їх водності (високої, середньої та низької) побудовані прогнозні залежності для визначення шарів стоку та максимальних витрат води весняного водопілля (у вигляді модульних коефіцієнтів).

Враховуючи максимальне значення дискримінантної функції ($DF1$, $DF2$ або $DF3$) прогнозні залежності описуються рівняннями виду

$$k_Y(k_Q) = b_1 k_X + b_2 k_X^2 + \dots + b_m k_X^m, \quad (3.17)$$

де $b_1, b_2, \dots, b_m$ – коефіцієнти рівняння при прогнозуванні шарів стоку чи максимальних витрат води весняного водопілля на річках.

Приклад прогнозних залежностей для різних груп водності весняних водопіль для шарів стоку весняного водопілля представлено на рис. 3.8 (для р. Південний Буг – с. Підгір'я), а для максимальних витрат води – на рис. 3.9 (для р. Південний Буг – с. Тростянчик).

Коефіцієнти прогностичних рівнянь (3.17) при прогнозуванні шарів стоку та максимальних витрат води весняного водопілля в басейні р. Південний Буг представлені в табл. 3.7 та табл. 3.8 відповідно.

Отримані коефіцієнти прогностичних рівнянь, також як і для дискримінантної функції, є сталими, а залежності регіональними для всіх річок однорідного району (підрайону) при прогнозуванні шарів стоку чи максимальних витрат води весняного водопілля в басейні р. Південний Буг.

3.3.6 Визначення прогнозних величин очікуваних шарів стоку та максимальних витрат води весняного водопілля в басейні р. Південний Буг

По спрогнозованим модульним коефіцієнтам шарів стоку весняного водопілля k_Y річок басейну Південного Бугу очікувані шари стоку Y_m весняного водопілля визначаються при помноженні їх на середньобогаторічні значення Y_0

$$Y_m = k_Y \cdot Y_0. \quad (3.18)$$

Об'єм стоку весняного водопілля W , млнм³, можна визначити за формулою

$$W = k_Y \left(\frac{Y_0^F}{1000} \right). \quad (3.19)$$

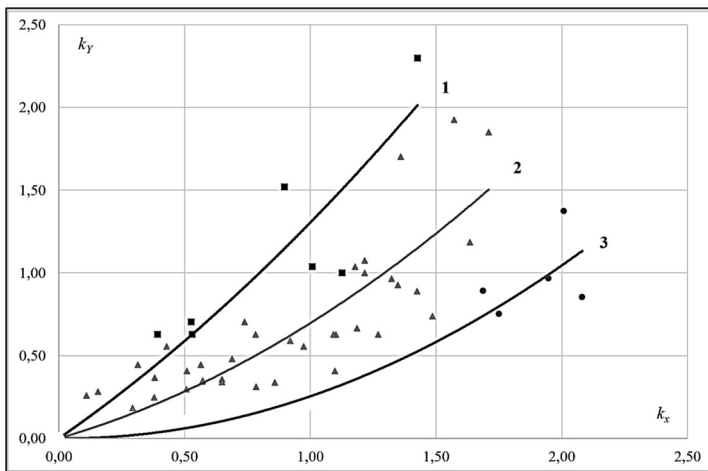


Рисунок 3.8 – Залежність модульних коефіцієнтів шарів стоку весняного водопілля k_Y від модульних коефіцієнтів запасів води на басейні k_X для району II, підрайону IIб (басейн р. Південний Буг – с. Підгір'я)

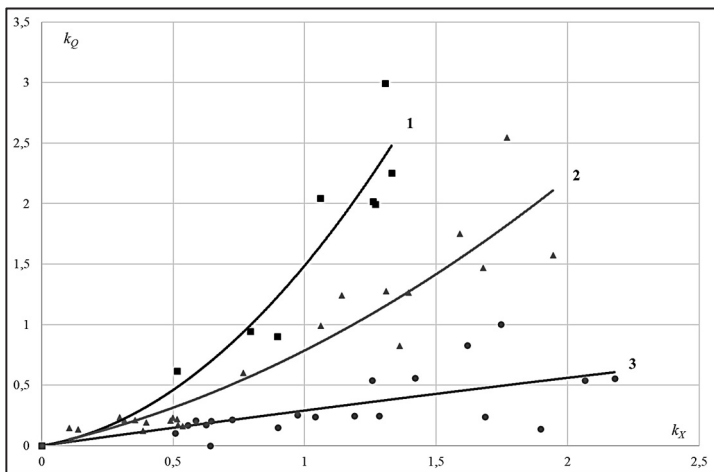


Рисунок 3.9 – Залежність модульних коефіцієнтів максимальних витрат води весняного водопілля k_Q від модульних коефіцієнтів запасів води на басейні k_X для району I (басейн р. Південний Буг – с. Тростянички)

Умовні позначення до рис. 3.8 та рис. 3.9:

1 – $DF1 > DF2, DF3$; 2 – $DF2 > DF1, DF3$; 3 – $DF3 > DF1, DF2$

Таблиця 3.7 – Коефіцієнти рівнянь (3.17) при прогнозуванні шарів стоку весняного водопілля в басейні р. Південний Буг

Опорний пост в районі (підрайоні) для отримання коефіцієнтів в (3.17)	Опорні пости в районі (підрайоні), для яких прийняті коефіцієнти прогнозних кривих	Умови застосування прогнозних кривих по значеннях DF	b_1	b_2	b_3
1	2	3	4	5	6
Район І					
Південний Буг – с. Тростянець	Південний Буг – с. Пирогівці, Рів – с. Демидівка	$DF1> DF2, DF3$	2,28	-3,24	2,18
		$DF2> DF1, DF3$	0,54	-0,91	0,96
		$DF3>DF1, DF2$	0,18	-0,16	0,11
Район ІІ					
підрайони Іа та ІІб (правобережжя)					
Савранка – с. Осички	Кодима – с. Катеринка	$DF1> DF2, DF3$	1,93	-1,14	1,17
		$DF2> DF1, DF3$	0,18	0,12	0,28
		$DF3>DF1, DF2$	0,11	0,16	-
підрайон ІІб (лівобережжя)					
Синюха – с. Синюхін Брід	Велика Вись – с. Ямпіль, Ятрань – с. Покотилово, Чорний Ташлик – с. Тарасівка, Інгул – м. Кропивницький, Інгул – с. Новогорожене	$DF1> DF2, DF3$	1,27	0,23	-
		$DF2> DF1, DF3$	0,74	-0,21	-
		$DF3>DF1, DF2$	0,31	-0,12	-
підрайон ІІв					
Тилігул – с. Березівка	Великий Куяльник – с. Северинівка	$DF1> DF2, DF3$	0,71	0,75	-
		$DF2> DF1, DF3$	0,73	-0,23	-
		$DF3>DF1, DF2$	0,33	-0,21	-

Таблиця 3.8 – Коефіцієнти рівнянь (3.17) при прогнозуванні максимальних витрат води весняного водопілля в басейні р. Південний Буг

Опорний пост в районі (підрайоні) для отримання коефіцієнтів в (3.17)	Опорні пости в районі (підрайоні), для яких прийняті коефіцієнти прогнозних кривих	Умови застосування прогнозних кривих по значеннях DF	b_1	b_2
1	2	3	4	5
Район І				
Південний Буг – с. Тросянчик	Південний Буг – с. Пирогівці, Рів – с. Демидівка	$DF1 > DF2, DF3$	1,13	0,35
		$DF2 > DF1, DF3$	0,32	0,47
		$DF3 > DF1, DF2$	0,01	0,30
Район ІІ				
підрайони Іа та Іб (правобережжя)				
Савранка – с. Осички	Кодима – с. Катеринка	$DF1 > DF2, DF3$	3,60	–
		$DF2 > DF1, DF3$	0,56	0,22
		$DF3 > DF1, DF2$	0,12	0,04
підрайон Іб (лівобережжя)				
Синюха – с. Синюхін Брід	Велика Вись – с. Ямпіль, Ятрань – с. Покотилово, Чорний Ташлик – с. Тарасівка, Інгул – м. Кропивницький, Інгул – с. Новогорожене	$DF1 > DF2, DF3$	1,57	-0,07
		$DF2 > DF1, DF3$	0,39	0,47
		$DF3 > DF1, DF2$	0,06	0,10
підрайон Ів				
Тилігул – с. Березівка	Великий Куяльник – с. Северинівка	$DF1 > DF2, DF3$	0,71	0,75
		$DF2 > DF1, DF3$	0,73	-0,23
		$DF3 > DF1, DF2$	0,33	-0,21

Встановлення середньобагаторічних величин шарів стоку весняного водопілля Y_0 для досліджених річок території визначено за часовими рядами стокових спостережень Y_m шляхом їх статистичної обробки [26], [27]. Також, визначено моментні значення коефіцієнтів варіації шарів стоку весняного водопілля в басейні р. Південний Буг.

Для досліджуваних річок вони коливаються в межах від 0,46 (р. Південний Буг – с. Селище, $F=9100 \text{ км}^2$, $n=14$ років) до 2,03 (р. Великий Куяльник – с. Северинівка, $F=1840 \text{ км}^2$, $n=58$ років) при середньому C_v по регіону – 0,90, а правдоподібні від 0,47 (р. Південний Буг – с. Селище, $F=9100 \text{ км}^2$, $n=14$ років) до 2,44 (р. Великий Куяльник – с. Северинівка, $F=1840 \text{ км}^2$, $n=58$ років) при середньому C_v по регіону – 0,92. Коефіцієнти варіації шарів стоку весняного водопілля, визначених за методом моментів та найбільшої правдоподібності мають тісну збіжність. Дещо різняться співвідношення між C_s і C_v у цих методах ($C_s/C_v=1,74$ – у методі моментів і $C_s/C_v=2,18$ – у методі найбільшої правдоподібності). Аналіз даних показав, що по обох методах (найбільшої правдоподібності й моментів) отримані в загальному збіжні значення коефіцієнтів варіації C_v .

По спрогнозованим модульним коефіцієнтам максимальних витрат води весняного водопілля k_Q річок басейну р. Південний Буг очікувані величини максимальних витрат води весняного водопілля Q_m визначаються наступним чином

$$Q_m = k_Q \cdot Q_0 = k_Q \cdot q_0 \cdot F. \quad (3.20)$$

Встановлення середньобагаторічних величин максимальних витрат води весняного водопілля Q_0 для досліджених річок території визначено шляхом статистичної обробки часових рядів Q_m [26].

Моментні значення коефіцієнтів варіації C_v для максимальних витрат води весняного водопілля досліджуваних річок коливаються в межах від 0,66 (р. Південний Буг – с. Селище, $F=9100 \text{ км}^2$, $n=14$ років) до 2,75 (р. Великий Куяльник – с. Северинівка, $F=1840 \text{ км}^2$, $n=14$ років) при середньому C_v по регіону – 1,29, а правдоподібні від 0,67 до 3,48, при середньому їх значенню 1,35 відповідно. Коефіцієнти варіації визначені за двома методами також мають тісну збіжність. Співвідношення між C_s і C_v за методом моментів та найбільшої правдоподібності становлять ($C_s/C_v=1,81$ – у методі моментів і $C_s/C_v=2,37$ – у методі найбільшої правдоподібності).

Відповідно до [28] при $C_v > 0,5$ рекомендується використовувати для розрахунків метод найбільшої правдоподібності, а при $C_v > 0,5$ і $C_s/C_v > 2,0$ – трипараметричний гамма-розподіл С.М. Крицького і М.Ф. Менкеля, який дає більш надійні значення розрахунків, у порівнянні з кривою біноміального розподілу [29].

Враховуючи, що значення коефіцієнтів варіації шарів стоку та максимальних витрат води весняного водопілля досліджуваних річок практично у всіх випадках становлять $C_v \geq 0,50$, а $C_s/C_v > 2,0$ – для подальших розрахунків при визначенні прогнозних забезпеченостей характеристик весняного водопілля прийнятий трипараметричний гама-розподіл С.М. Крицького і М.Ф. Менкеля.

Методика довгострокового прогнозування характеристик стоку весняного водопілля в басейні р. Південний Буг передбачає, також, встановлення максимальних рівнів води весняного водопілля. Максимальні рівні води встановлюють за спрогнозованими максимальними витратами води весняного водопілля за кривою витрат води вигляді $Q = f(H)$.

3.4 Визначення прогнозних забезпеченостей характеристик весняного водопілля в басейні р. Південний Буг

Метод територіальних довгострокових прогнозів шарів стоку та максимальних витрат води весняного водопілля річок [2]-[4], який покладено в основу розробки методики довгострокового прогнозування характеристик весняного водопілля (шарів стоку та максимальних витрат води) в басейні р. Південний Буг, дає змогу визначення не тільки кількісних характеристик стоку, а й *встановлення ймовірнісних величин* їх настання у багаторічному періоді, що стає найбільш актуальною задачею при прогнозуванні весняних водопіль рідкісної ймовірності перевищення та виникненні ризику підтоплення територій [30], особливо при відсутності стокових спостережень на річках.

Для оцінки забезпеченостей настання спрогнозованих за методикою шарів стоку P_Y та максимальних витрат води весняних водопіль P_Q в басейні р. Південний Буг прийнято криву трипараметричного гама-розподілу С.М. Крицького і М.Ф. Менкеля [29]. При цьому забезпеченість встановлюється за спрогнозованими модульними коефіцієнтами шарів стоку k_Y чи максимальних витрат води водопіль k_Q та одержаними, при статистичній обробці часових рядів, коефіцієнтами їх варіації за методом найбільшої правдоподібності – $(C_v)_Y$ та $(C_v)_Q$. Використовуючи таблицю трипараметрич-

ного гама-розподілу С.М. Крицького і М.Ф. Менкеля (при врахуванні середніх по району співвідношень C_s/C_v представлених у табл. 3.9) [28] встановлююся прогностичні забезпеченості у вигляді їх інтервалу

$$P_B < P_Y(P_Q) < P_H. \quad (3.21)$$

Верхня P_B , % і нижня P_H , % межі забезпеченостей приймаються з таблиць трипараметричного гама-розподілу С.М. Крицького і М.Ф. Менкеля (для середніх по району C_s/C_v) [28].

Таблиця 3.9 – Середні по району співвідношення C_s/C_v для характеристик стоку весняного водопілля в басейні р. Південний Буг

Характеристика стоку весняного водопілля	Середні по району співвідношення C_s/C_v			
	Район І		Район ІІ	
	за даними статистичної обробки	прийняті у таблицях [28]	за даними статистичної обробки	прийняті у таблицях [28]
Шари стоку	1,81	2,0	2,51	2,5
Максимальні витрати води	3,05	3,0	2,26	2,0

3.5 Картографічна форма представлення прогностичної інформації

У сучасних математичних моделях та методах, які використовуються для прогнозу елементів водного режиму річок, зокрема територіальному методі довгострокових прогнозів шарів стоку та максимальних витрат води весняного водопілля, дат початку водопілля та проходження його максимальних витрат (рівнів) води формою представлення прогнозів є найбільш наочний метод – *картографічне представлення прогнозних величин* (у вигляді картосхем розподілу ізоліній цих величин) [3]-[5].

Картосхеми дозволяють встановлювати прогнозні значення характеристик весняного водопілля для будь-яких водозборів в межах розглядуваної території, включаючи й річки, і невеликі водотоки, по яких відсутні дані гідрологічних спостережень. Картографічна форма представлення прогнозних стокових величин є доцільною при оцінці можливих гідрологічних небезпек, пов'язаних з затопленням територій при проходженні високих весняних водопіль, відповідно до вимог Директиви

2007/60/ЄС Європейського Парламенту та Ради від 23 жовтня 2007 року про оцінки й управління ризиками затоплення [30].

При цьому, доцільним є представлення прогностичних стокових характеристик на основі картосхем не в фактичних, а у відносних величинах – модульних коефіцієнтах [2]-[5]. Особливо це стосується максимальних витрат води весняного водопілля, які взагалі не можуть бути безпосередньо представлені у вигляді картосхем їх розподілу у зв'язку із залежністю від розмірів (площ, $F, \text{км}^2$) річкових водозборів та русло-заплавного регулювання.

Крім того, встановлені забезпеченості (P , %) прогностичних величин шарів стоку та максимальних витрат води весняного водопілля у багаторічному розрізі також представляються у картографічному вигляді, що дає змогу їх визначення для будь-якого водозбору території, незалежно від стану гідрологічної вивченості річок, і оцінки ймовірності настання гідрологічного явища, у тому числі й рідкісної ймовірності настання (наприклад, 0,2; 1; 10 %, згідно з вимогами Водної Паводкової Директиви 2007/60/ЄС [30]).

Таким чином, спрогнозовані у кожному році по залежності (3.17) і описаній методиці величини модульних коефіцієнтів шарів стоку та максимальних витрат води весняного водопілля та їх прогностичні забезпеченості наносяться на картосхему до геометричних центрів опорних водозборів, а потім проводяться ізолінії змін очікуваних величин по всій території басейну, з обраним кроком.

Такі картосхеми для спрогнозованих по розробленій у даній роботі методиці довгострокових прогнозів характеристик (шарів стоку k_y та максимальних витрат води k_Q) весняного водопілля та їх забезпеченостей P_y , % та P_Q , % відповідно в басейні р. Південний Буг представлені для водопілля 2017-2018 р. на рис. 3.10 та 3.11.

Розподіл прогностичних модульних коефіцієнтів шарів стоку весняного водопілля в басейні р. Південний Буг показує, що вони змінюються в межах району I від 0,30 до 0,40 (рис. 3.10, а) та забезпеченості 95-80% (рис. 3.10, б), а для району II – від 0,60 до 0,10 і забезпеченості 50-90%.

Спрогнозовані модульні коефіцієнти максимальних витрат води весняного водопілля в басейні р. Південний Буг змінюються в межах району I від 0,20 до 0,40 (рис. 3.11, а) при забезпеченості порядку 95-70 % (рис. 3.11, б), а для району II – від 0,25 до 0,10 при забезпеченості 50-80 %.

Побудовані картосхеми (рис. 3.10) та (рис. 3.11) дають можливість проводити моніторинг та аналіз гідрометеорологічної ситуації під час проходження весняного водопілля в басейні р. Південний Буг.

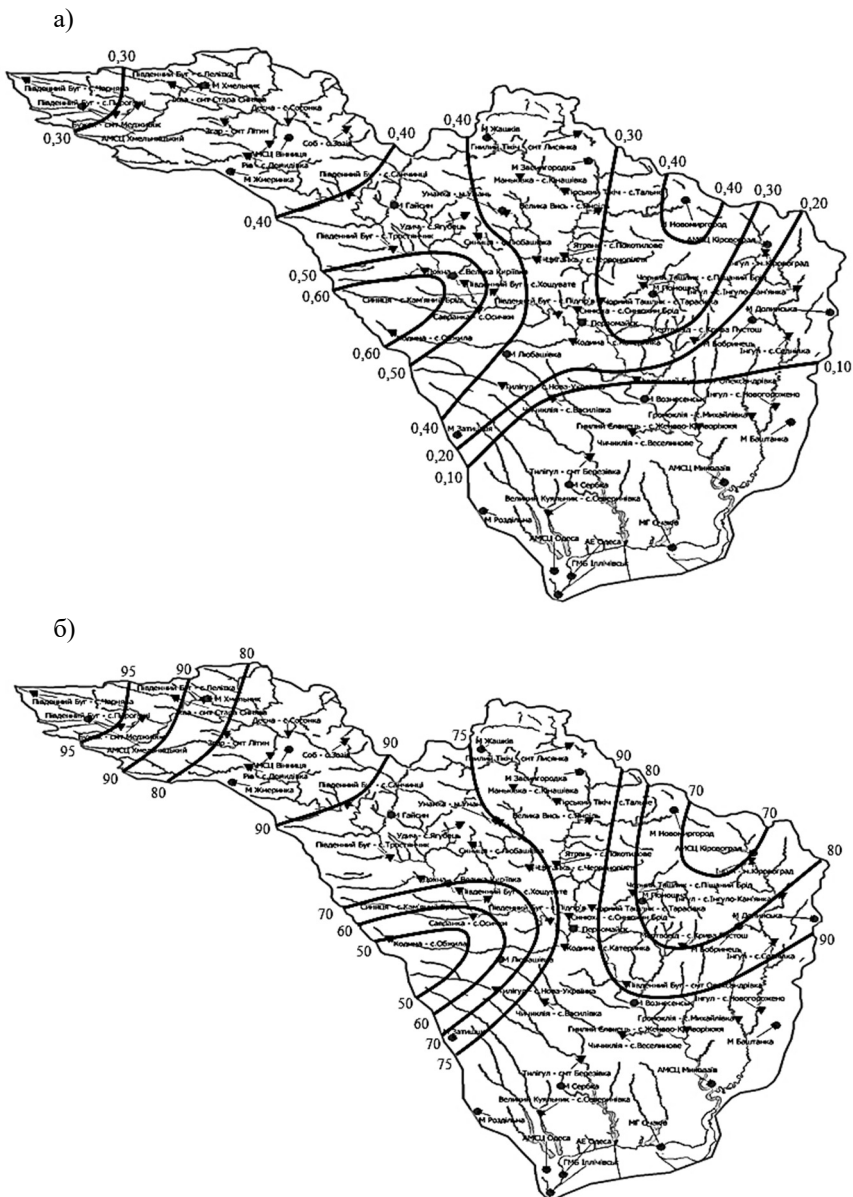


Рисунок 3.10 – Картохема розподілу прогностичних модульних коефіцієнтів шарів стоку k_y весняного водопілля у 2017-2018 р. (а) та їх забезпеченості P_y , % (б) в басейні р. Південний Буг

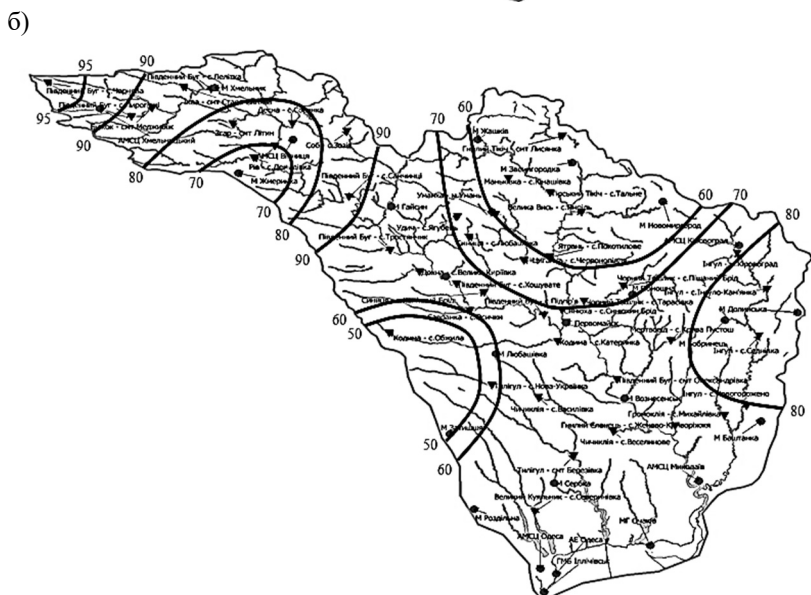
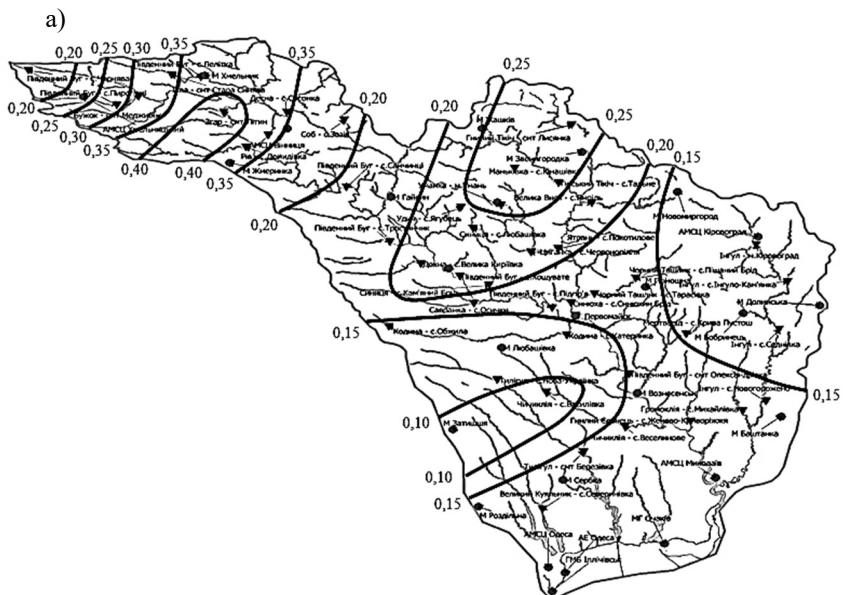


Рисунок 3.11 – Картохема розподілу прогностичних модульних коефіцієнтів максимальних витрат води k_Q весняного водопілля у 2017-2018 р. (а) та їх забезпеченості P_Q , % (б) в басейні р. Південний Буг

Так, модульні коефіцієнти характеристик весняного водопілля в басейні р. Південний Буг вказують на відсутність вираженого водопілля 2017-2018 р.

Важливим є те що, по картосхемах очікуваних величин можна здійснювати прогноз шарів стоку чи максимальних витрат води водопілля, їх прогнозові ймовірності настання для різних за розміром та географічним положенням річкових водозборів в басейні р. Південний Буг.

Взагалі ж, картосхеми очікуваних гідрологічних характеристик та їх ймовірнісних оцінок щорічно складаються оперативними службами прогнозування України [31] і вчасно передаються до державних структур та відповідних служб щодо оцінки зон підвищеної небезпеки та здійснення заходів щодо захисту від можливих гідрологічних ризиків у вигляді затоплення паводковими водами населених пунктів і об'єктів господарського призначення.

Можливість оцінки зон затоплення територій під час високих водопіль пов'язана з залученням топографічних карт місцевості (при використанні технологій геоінформаційної системи, ГИС) та наявністю очікуваних максимальних рівнів води водопілля, спрогнозованих за запропонованою в роботі методикою довгострокових прогнозів максимальних витрат (рівнів) води весняних водопіль в басейні р. Південний Буг.

3.6 Перевірка ефективності методики довгострокових прогнозів характеристик весняного водопілля річок в басейні р. Південний Буг

Оцінка ефективності методики довгострокових прогнозів шарів стоку та максимальних витрат води весняного водопілля в басейні р. Південний Буг виконана за двома критеріями – S/σ та забезпеченістю допустимої похибки гідрологічного прогнозу $P, \%$ [32], [33].

Відношення S/σ є критерієм якості методики довгострокового прогнозу шарів стоку та максимальних витрат води весняного водопілля. При цьому, S – середня квадратична похибка перевірених прогнозів гідрологічних величин, яка є мірою точності прогнозової методики визначається за рівнянням [32], [33]

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - Y'_i)^2}{n}}, \quad (3.22)$$

де Y_i та Y'_i – фактичне та прогнозне значення шарів стоку або максимальних витрат води;

n – кількість членів ряду.

Середнє квадратичне відхилення σ гідрологічної характеристики від його середньобаторічного значення розраховується за рівнянням [32], [33]

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}{n-1}}, \quad (3.23)$$

де Y_i – значення гідрологічної характеристики, яку прогнозують (фактичне значення);

$\bar{Y}$ – середньобаторічне значення гідрологічної характеристики, яку прогнозують.

Величина відношення S/σ показує у скільки разів варіація функції (прогнозової змінної Y'_i) менша варіації аргументу (основної незалежної змінної, по якій випускається даний прогноз x_i). У випадку, якщо $S < \sigma$, то довгостроковий прогноз характеристик максимального стоку весняного водопілля за розробленою методикою буде більш ефективний, ніж прогноз за середньобаторічним значенням [33].

Забезпеченість методики (забезпеченість допустимої похибки), під якою розуміють кількість випадків – прогнозів, які є справджуваними від загальної кількості складених прогнозів (у відсотках) визначається за формулою [32], [33]

$$P = \frac{m}{n} \cdot 100 \%, \quad (3.24)$$

де m – кількість випадків (прогнозів), похибка яких не перевищувала допустиму $\delta_{дон}$;

n – загальна кількість прогнозів, складених за розробленою методикою.

За допустиму похибку прогнозу $\delta_{дон}$ приймається відхилення прогнозової величини від середньобаторічного значення (норми) за період завчасності [32], [33], тобто

$$\delta_{дон} = \pm k_p \cdot \sigma. \quad (3.25)$$

Виходячи з припущення, що розподіл похибок прогнозу підпорядковується нормальному закону розподілу з нульовою асиметрією (відсутністю асиметрії), він описується кривою Гауса [32]

$$P(Y) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{\Delta^2}{2\sigma^2}\right), \quad (3.26)$$

де $P(Y)$ – ймовірність даного відхилення випадкової змінної Y від її нормованої величини $\bar{Y}$;

Δ – значення відхилення Y від $\bar{Y}$.

Інтегрування кривої Гауса дає можливість визначити коефіцієнт k_p . Значення k_p визначається за спеціальною таблицею [32] для заданої забезпеченості P , %. При $P=50\%$, $k_p=\pm 0,674$. Таким чином, допустима похибка прогнозу δ_{don} – це ймовірне відхилення прогнозової величини від середньобогаторічного значення (норми) гідрологічної величини [32]

$$\delta_{don} = \pm 0,674 \cdot \sigma. \quad (3.27)$$

Методика прогнозу вважається ефективною, якщо забезпеченість допустимої похибки за методикою не менш ніж на 10 % перевищує забезпеченість прогнозів по середньобогаторічному значенню (50 %), тобто значення P , % перевірних прогнозів повинне становити $P \geq 60$ %. Опираючись на точність спостережень за характеристиками весняного водопілля та оцінками розробленої методики прогнозу прийнято [32], [33], що при числі членів ряду $n \geq 25$ категорія методики буде *доброю*, якщо $P \geq 82$ % та $S/\sigma \leq 0,50$ або *задовільною* – при $P=60-81$ % та $S/\sigma = 0,51-0,80$. При інших значеннях цих показників методика є не ефективною для її практичного використання [33].

В даній роботі оцінка якості та ефективності методики була здійснена за гідрометеорологічними даними 12 опорних річкових постів басейну р. Південний Буг та двох опорних річкових постів басейну річок між Дністром та Південним Бугом. За розрахунковий період з 1966 р. по 2015 р. (50 років) при розробці методики було складено близько 700 перевірних прогнозів для шарів стоку весняного водопілля та близько 700 перевірних прогнозів для максимальних витрат води весняного водопілля при їх складанні в дату настання максимальних снігозапасів S_m , яка в кожному році спостерігається в різні календарні строки.

Для річок досліджуваного басейну критерій якості методики S/σ для шарів стоку весняного водопілля в басейні р. Південний Буг змінюється від 0,20 до 0,59 зі справджуваністю перевірних прогнозів P_Y , % в межах від 76 до 100 % (табл. 3.10). Для максимальних витрат води весняного водопілля в басейні р. Південний Буг критерій якості методики S/σ змінюється від 0,27 до 0,60 зі справджуваністю перевірних прогнозів P_Q , % в межах від 80 до 98 % (табл. 3.11).

Таблиця 3.10 – Оцінка якості методики довгострокового прогнозу шарів стоку весняного водопілля по опорних створах в басейні річки Південний Буг та малих річок між Дністром та Південним Бугом

Індекс поста	Річка – пост	Площа водозбору, км ²	n, років	σ , мм	$\delta_{\text{доп}}$, мм	S, мм	S/ σ	P, %
Район І								
81346	Південний Буг – с. Пирогівці	827	22	18	12	10	0,55	76
81361	Південний Буг – с. Тростяничк	17400	82	22	15	8	0,36	96
81393	Рів – с. Демидівка	1130	94	25	17	13	0,52	82
Район ІІ								
підрайон Іа								
81408	Савранка – с. Осички	1740	77	10	7	5	0,50	96
підрайон Іб								
81363	Південний Буг – с. Підгір'я	24600	76	18	12	9	0,50	90
81414	Кодима – с. Катеринка	2390	82	16	11	6	0,38	90
81417	Синюха – с. Синюхин Брід	16700	90	21	14	5	0,24	98
81430	Велика Вись – с. Ямпіль	2820	89	19	13	9	0,47	90
81433	Ятрань – с. Покотилове	2140	61	21	14	12	0,57	88
81438	Чорний Ташлик – с. Тарасівка	2230	82	25	17	13	0,52	86
81446	Інгул – м. Кропивницький	840	71	23	16	10	0,43	92
81450	Інгул – с. Новогорожене	6670	83	22	15	13	0,59	76
підрайон Ів								
81338	Тилігул – м. Березівка	3170	59	10	13	4	0,20	100
81475	Великий Куяльник – с. Северинівка	1840	19	2,7	1,8	1,4	0,51	80

Таблиця 3.11 – Оцінка якості методики довгострокового прогнозу максимальних витрат води весняного водопілля по опорних створах в басейні річки Південний Буг та малих річок між Дністром та Південним Бугом

Індекс поста	Річка – пост	Площа водозбору, км ²	n, років	σ , м ³ /с	$\delta_{доп}$, м ³ /с	S, м ³ /с	S/ σ	P, %
Район І								
81346	Південний Буг – с. Пирогівці	827	22	15	10	9	0,60	82
81361	Південний Буг – с. Тростянчик	17400	82	372	251	176	0,47	86
81393	Рів – с. Демидівка	1130	94	39	26	22	0,56	80
Район ІІ								
підрайон Іа								
81408	Савранка – с. Осички	1740	77	17	11	7	0,41	94
підрайон Іб								
81363	Південний Буг – с. Підгір'я	24600	76	433	292	118	0,40	98
81414	Кодима – с. Катеринка	2390	82	72	49	21	0,29	94
81417	Синюха – с. Синюхин Брід	16700	90	448	302	217	0,48	86
81430	Велика Вись – с. Ямпіль	2820	89	104	70	41	0,39	92
81433	Ятрань – с. Покогилове	2140	61	100	67	59	0,59	92
81438	Чорний Ташлик – с. Тарасівка	2230	82	130	88	13	0,52	86
81446	Інгул – м. Кропивницький	840	71	49	33	20	0,20	94
81450	Інгул – с. Новогорожене	6670	83	212	143	72	0,34	94
підрайон Ів								
81338	Тилігул – м. Березівка	3170	59	82	55	22	0,27	98
81475	Великий Куяльник – с. Северинівка	1840	19	5	3,37	3	0,60	88

Виходячи з одержаної оцінки ефективності методики довгострокових прогнозів шарів стоку та максимальних витрат води весняного водопілля в басейні р. Південний Буг, розроблена методика переважно належить до категорії «добра» та у деяких випадках – «задовільна», відповідно шкалі класифікацій у [33].

Збіжності спрогнозованих за розробленою методикою та фактичних (визначеними за даними спостережень) шарів стоку та максимальних витрат води весняного водопілля за багаторічний період показали задовільні результати (на прикладі р. Південний Буг – с. Тростянички на рис. 3.12).

Аналіз похибок прогнозів і оцінка ефективності методики гідрологічного прогнозу також здійснюються на основі зіставлення кривої забезпеченості похибок перевірних прогнозів і кривої відхилень прогнозного елемента режиму від його середньобагаторічного значення [32].

Для оцінки якості розробленої методики довгострокового прогнозування характеристик весняного водопілля в басейні р. Південний Буг в роботі були побудовані суміщені криві забезпеченості похибок прогнозів та їх відхилень від середньобагаторічних значень (для шарів стоку на рис. 3.13 (а) та максимальних витрат води – на рис. 3.13 (б)).

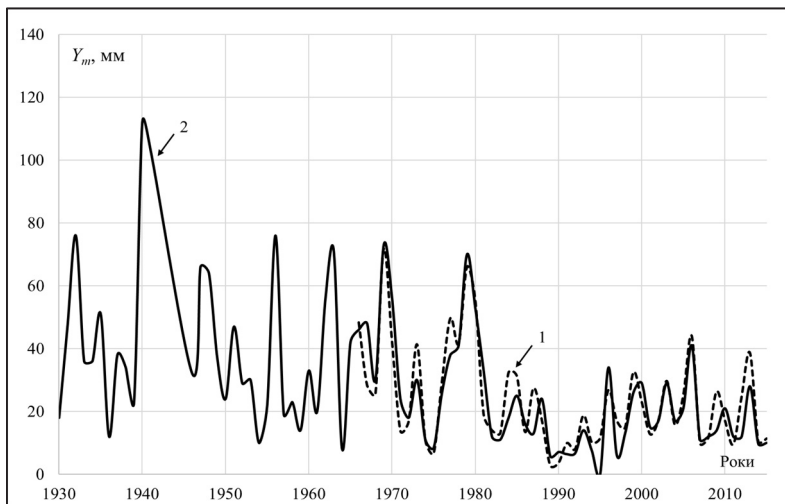
Суттєве перевищення відхилень над рівнозабезпеченими похибками прогнозів вказує на перевагу розробленого методу прогнозу в порівнянні зі статистичною оцінкою за середньобагаторічним значенням [15].

Виходячи з рис. 3.13 забезпеченість (P , %) допустимої похибки прогнозів для обох характеристик дорівнює 50 % при розрахунку за середньобагаторічною величиною, а за розробленою методикою прогнозу 97 % – для шарів стоку і 87 % – для максимальних витрат води весняного водопілля.

В роботі було здійснено оцінку якості розробленої методики довгострокових прогнозів характеристик весняного водопілля в басейні р. Південний Буг на даних незалежних років за період 2016-2018 рр., тобто років, дані по яких не увійшли до вихідної вибірки при розробці прогностичної методики. Складання перевірних прогнозів здійснювалося в дату настання максимальних снігозапасів S_m .

Вихідні метеорологічні дані про снігозапаси та агрометеорологічні дані по максимальним глибинам промерзання ґрунтів для складання прогнозів у 2016-2018 рр. залучені з сервера АРМ-гідро та АРМ-агро Українського Гідрометцентру ДСНС України (УкрГМЦ) [31], [34]. Так, як опади періоду весняного водопілля невідомі на дату випуску прогнозу (ДВП) вони були встановлені, з урахуванням метеорологічного прогнозу, за схемою (3.9) та табл. 3.4.

а)



б)

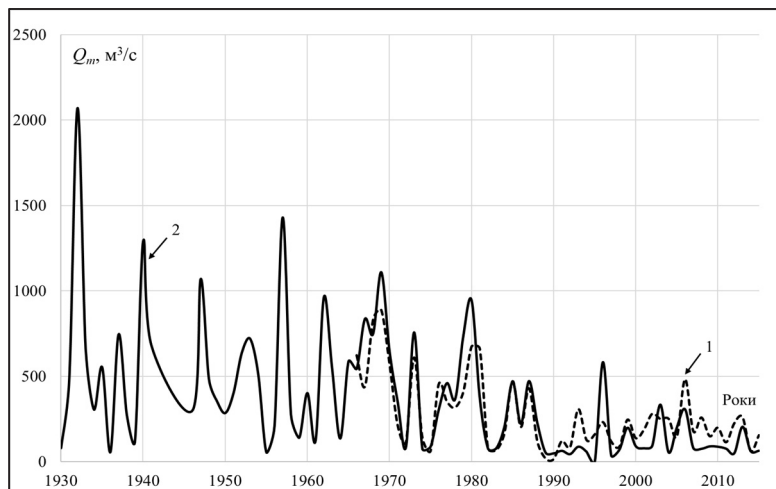
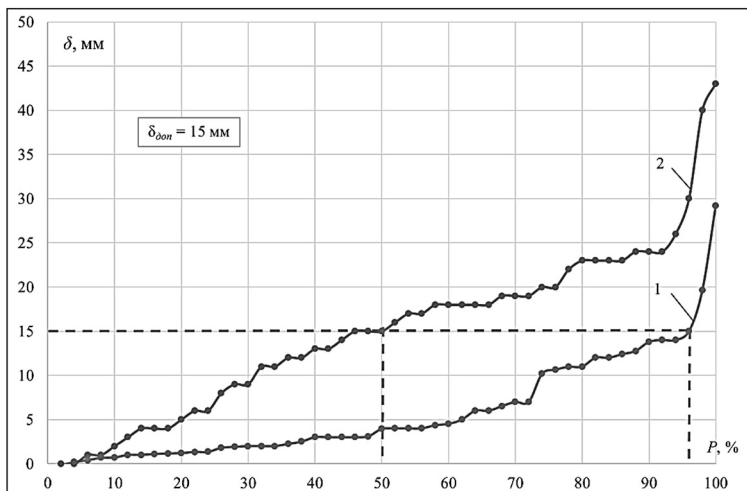


Рисунок 3.12 – Хронологічний графік спрогнозованих за розробленою методикою (1) та фактичних (2) шарів стоку (а) та максимальних витрат води (б) весняного водопілля в басейні р. Південний Буг – с. Тросянчик (район І)

а)



б)

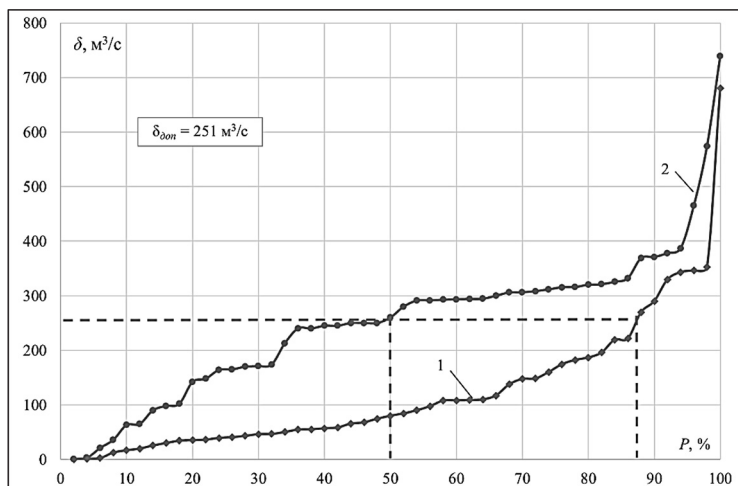


Рисунок 3.13 – Криві забезпеченості похибок прогнозу шарів стоку (а) та максимальних витрат води (б) весняного водопілля (1) і відхилень їх від середньобаторічних величин (2) в басейні р. Південний Буг – с. Тростянчик (район І)

Довгострокові прогнози шарів стоку та максимальних витрат води весняного водопілля у 2016-2018 рр. були складені для трьох гідрологічних створів в басейні р. Південний Буг, що розташовані в різних за умовами формування весняного стоку районах. При цьому, параметри прогнозної методики були прийняті за даними табл. 3.5-табл. 3.8 в межах цих районів.

Спрогнозовані за розробленою методикою (в ДВП настання максимальних снігозапасів S_m) та спостережені значення шарів стоку та максимальних витрат води весняного водопілля в басейні р. Південний Буг у 2016-2018 рр. представлені в табл. 3.12 та табл. 3.13 відповідно.

Так, прогнозні, як шари стоку, так і максимальні витрати води весняного водопілля були нижчими за їх середньобаторічні величини (модульні коефіцієнти шарів стоку k'_Y змінюються в межах 0,22-0,46 та максимальних витрат води k'_Q – від 0,07 до 0,37) при прогнозній забезпеченості у багаторічному періоді 95-99 %. При цьому, забезпеченості $P_Y(P_Q)$, % встановлено за таблицями трипараметричного гама-розподілу С.М. Крицького і М.Ф. Менкеля (при врахуванні середніх по району співвідношень C_s/C_v за табл. 3.9) [28].

Оцінка якості довгострокових прогнозів характеристик весняного водопілля виконана шляхом визначення похибки прогнозу δ та в частках δ/δ_{don} від допустимої похибки – δ/δ_{don} (критерій справджуваності прогнозу). Величина похибки прогнозу δ розрахована за рівняннями:

- для шарів стоку весняного водопілля, мм

$$\delta = Y_m - Y'_m; \quad (3.28)$$

- для максимальних витрат води весняного водопілля, м³/с

$$\delta = Q_m - Q'_m; \quad (3.29)$$

де $Y_m(Q_m)$ та $Y'_m(Q'_m)$ – відповідно спостережені й прогнозні значення шарів стоку (максимальних витрат води) весняного водопілля.

Як показують результати табл. 3.12 та табл. 3.13 критерії справджуваності прогнозів δ/δ_{don} відповідають категоріям якості «відмінний» та «добрий» [15].

Таблиця 3.12 – Спрогнозовані за розробленою методикою довгострокових прогнозів та спостережені шари стоку весняного водопілля в басейні р. Південний Буг у 2016-2018 рр. та їх оцінка

Індекс поста	Річка – пост	Район	K_Y'	Y_0 , мм	Y_m' , мм	Y_m , мм	δ , мм	$\delta_{доп}$, мм	Категорія прогнозу	$(C_{\gamma})_Y$	P_{γ} , %
2015-2016 р.											
81361	Південний Буг – с. Тростянчик	I	0,31	30	9	7,3	-2	15	відмінний	0,75	80-90
81363	Південний Буг – с. Підгір'я	II	0,22	27	5,9	7,6	2	12	відмінний	0,70	95-97
81417	Синюха – с. Синюхин Брід	II	0,38	24	9	8,3	-1	14	відмінний	0,89	75-80
2016-2017 р.											
81361	Південний Буг – с. Тростянчик	I	0,47	30	14	5,5	-9	15	добрий	0,75	70-75
81363	Південний Буг – с. Підгір'я	II	0,31	27	8,3	6,7	-2	12	відмінний	0,70	90-95
81417	Синюха – с. Синюхин Брід	II	0,40	24	10	5,2	-4	14	добрий	0,89	70-75
2017-2018 р.											
81361	Південний Буг – с. Тростянчик	I	0,35	30	11	9,4	-1	15	відмінний	0,75	80-90
81363	Південний Буг – с. Підгір'я	II	0,46	27	12,4	11,2	-1	12	відмінний	0,70	75-80
81417	Синюха – с. Синюхин Брід	II	0,36	24	9	10	1	14	відмінний	0,89	75-80

Таблиця 3.13 – Спрогнозовані за розробленою методикою довгострокових прогнозів та спостережені максимальні витрати води весняного водопілля в басейні р. Південний Буг у 2016-2018 рр. та їх оцінка

Індекс поста	Річка – пост	Район	k'_Q	Q_0 , м³/с	Q'_m , м³/с	Q_m , м³/с	δ , м³/с	$\delta_{дон}$, м³/с	$\delta/\delta_{дон}$	Категорія прогнозу	$(C_{\cdot})_Q$	P_Q , %
2015-2016 р.												
81361	Південний Буг – с. Тростянчик	I	0,24	371	90	49,1	-41	251	0,16	відмінний	1,01	80-90
81363	Південний Буг – с. Підгір'я	II	0,07	403	26,5	92,2	66	292	0,23	відмінний	1,08	90-95
81417	Синюха – с. Синюхин Брід	II	0,22	355	76,7	55,2	-22	302	0,07	відмінний	1,32	60-70
2016-2017 р.												
81361	Південний Буг – с. Тростянчик	I	0,35	371	129	63,0	-66	251	0,26	відмінний	1,01	75-80
81363	Південний Буг – с. Підгір'я	II	0,21	403	83,4	122	39	292	0,13	відмінний	1,08	80-90
81417	Синюха – с. Синюхин Брід	II	0,12	355	43,4	41,0	-2	302	0,01	відмінний	1,32	75-80
2017-2018 р.												
81361	Південний Буг – с. Тростянчик	I	0,37	371	100	68,0	-32	251	0,27	відмінний	1,01	70-75
81363	Південний Буг – с. Підгір'я	II	0,14	403	57,5	100	43	292	0,15	відмінний	1,08	90-95
81417	Синюха – с. Синюхин Брід	II	0,27	355	96,2	61,0	-35	302	0,12	відмінний	1,32	60-70

Таким чином, розроблена методика довгострокових прогнозів характеристик весняного водопілля в басейні р. Південний Буг може вважатися регіональною при можливості одержання параметрів методики для всіх річок в межах виділених за умовами формування весняного стоку району.

Оцінка якості запропонованої автором прогнозової методики та перевірка її на даних незалежного періоду показала, що вона є практично придатною для використання, відповідно [32], [33], при випуску оперативних прогнозів в діяльності регіонального Гідрометцентру (ГМЦ ЧАМ, м. Одеса) та інших гідропрогностичних установах.

Основні наукові дослідження авторів з питань довгострокового прогнозування характеристик весняного водопілля в басейні р. Південний Буг опубліковано у роботах [5], [35]-[38].

3.7 Встановлення завчасності довгострокових прогнозів весняного водопілля в басейні р. Південний Буг

Завчасність довгострокових прогнозів шарів стоку та максимальних витрат води весняного водопілля для рівнинних річок України обумовлена у кожному році тривалістю весняного водопілля річок різних за географічним положенням і розмірами водозборів [2].

В Україні основною датою випуску прогнозу (ДВП) характеристик весняного водопілля рівнинних річок є 20 лютого [30], а уточнювальний прогноз складається в дату накопичення максимальних снігозапасів.

В даній роботі завчасність довгострокових прогнозів шарів стоку та максимальних витрат води весняного водопілля в басейні р. Південний Буг визначено у вигляді кількості діб від 20 лютого до дати настання явища. Завчасність довгострокових прогнозів шарів стоку весняного водопілля у кожному році визначається тривалістю підйому та спаду хвилі весняного водопілля на річках, різних за географічним положенням і розмірами водозборів.

Враховуючи період від дати складання прогнозу (20 лютого) до строків закінчення водопілля, завчасність прогнозів шарів стоку весняного водопілля в басейні р. Південний Буг коливається від 46 до 68 діб, при середніх по басейну значеннях – 50-55 діб.

Встановлено, що для території басейну р. Південний Буг спостерігається збільшення завчасності довгострокових прогнозів шарів стоку

весняного водопілля $(\Delta t_{Y_m})_0$ зі збільшенням широти геометричних центрів водозборів (при $r=0,30$) (рис. 3.14, а)

$$(\Delta t_{Y_m})_0 = 2,59(\varphi^0 - 48) + 53,3. \quad (3.30)$$

Своєю чергою, завчасність довгострокових прогнозів максимальних витрат води весняного водопілля, також як і для шарів весняного стоку, коливається в залежності від географічного положення і розмірів водозборів, а також від швидкості розвитку весняних процесів у період формування максимальних витрат води водопілля у кожному році.

Встановлено, що для території басейну р. Південний Буг спостерігається збільшення завчасності довгострокових прогнозів максимальних витрат води весняного водопілля $(\Delta t_{Q_m})_0$ зі збільшенням широти геометричних центрів водозборів (при $r=0,73$) (рис. 3.14, б)

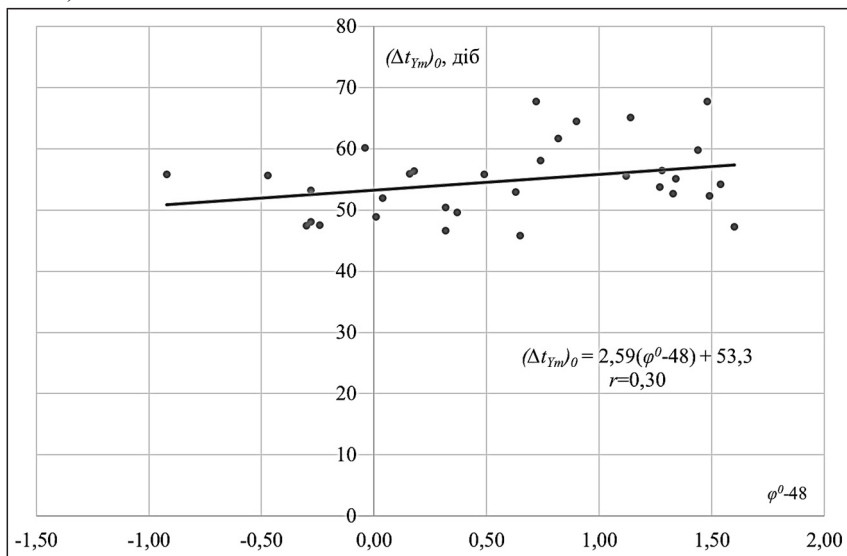
$$(\Delta t_{Q_m})_0 = 3,61(\varphi^0 - 48) + 24,8, \quad (3.31)$$

тобто завчасність прогнозів максимальних витрат води весняного водопілля в басейні р. Південний Буг коливається від 21 до 34 діб, при середніх по басейну значеннях 25-30 діб.

3.8 Автоматизований програмний комплекс «Південний Буг» для довгострокового прогнозування характеристик весняного водопілля в басейні р. Південний Буг

Для довгострокового прогнозування за розробленою методикою характеристик стоку весняного водопілля в басейні р. Південний Буг необхідно здійснювати збір, обробку, аналіз значної кількості вихідних гідрометеорологічних даних. При цьому операції над даними одноманітні і їх обчислення займає велику кількість часу, тому розрахунки доцільніше виконувати за допомогою комп'ютерних комплексів. Розроблений в роботі програмний комплекс «Південний Буг» має зручний, інтуїтивно зрозумілий інтерфейс для швидкого прогнозування та оцінки гідрологічної ситуації на басейні. Автори дослідження є розробниками алгоритму, а співавтори В.С. Шатохін і Н.Й. Шуптар – розробниками комп'ютерної програми прогностичного комплексу «Південний Буг» [39].

а)



б)

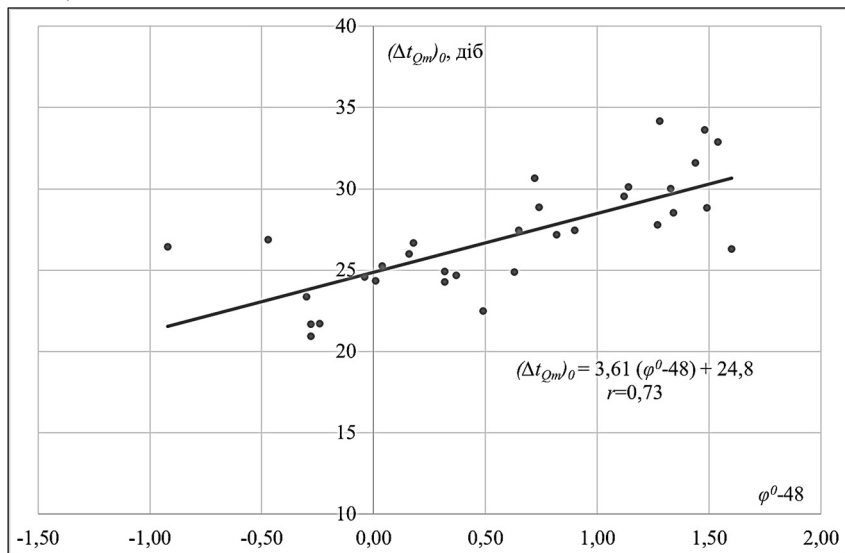


Рисунок 3.14 – Залежність завчасності довгострокових прогнозів шарів стоку (а) та максимальних витрат води (б) весняного водопілля від географічної широти водозборів в басейні р. Південний Буг

Загальне наукове керівництво розробкою прогностичного комплексу здійснювалося Ж.Р. Шакірзановою. Алгоритм програмного комплексу «Південний Буг» представлений у вигляді блок-схеми (рис. 3.15).



Рисунок 3.15 – Алгоритм програмного комплексу «Південний Буг»

Діалогове вікно головного меню програмного комплексу «Південний Буг» представлено на рис. 3.16. Через головне меню можна перейти до вкладок «Вихідні гідрометеорологічні дані» та «Гідрологічні прогнози весняного водопілля», через які користувачу надається можливість:

- через вкладку «Вихідні гідрометеорологічні дані», здійснювати введення, редагування і видалення оперативної (рис. 3.17) та базової (рис. 3.18) гідрологічної й метеорологічної інформації, для подальших розрахунків;

- через вкладку «Гідрологічні прогнози весняного водопілля» (рис. 3.19), виконати розрахунок та прогнозування шарів стоку чи максимальних витрат (рівнів) води весняного водопілля, встановити їх прогнозу забезпеченість, строків проходження весняних водопіль, переглянути, зберегти та друкувати таблиці з розрахунковими характеристиками (рис. 3.20).

При розробці вкладки для випуску прогнозу (див. рис. 3.19) основна увага авторів [39] була приділена створенню простого та зручного інтерфейсу, який дозволить навіть недосвідченому користувачу швидко працювати та орієнтуватися в програмному комплексі «Південний Буг».



Рисунок 3.16 – Діалогове вікно головного меню програмного комплексу «Південний Буг»

OPER_INFO_HYDRO													
Тип даних			Таблиця		Рік		Умовні позначення		Зберегти				
☒ Оперативні ☐ Базові ☐ Криві витрат води			OPER_INFO_HYDRO		2018				Відправити в Excel				
Index	Ol_Hydro	Hydro	OBL	Q12	Q01	Q02	Q03	QPB	MQP	DB	DQm	Qm	
81361	187	Південний Буг- с.Тростянич	Вінницька							09.03.2018	23.03.2018	73,5	
81363	188	Південний Буг- с.Підгір'я	Миколаївська			24,1				10.03.2018	20.03.2018	99,4	
81393	193	Рів- с.Демидівка	Вінницька			1,2				10.03.2018	17.03.2018	3,87	
81414	197	Кодима- с.Катеринка	Миколаївська			2,55				07.03.2018	26.03.2018	5,25	
81417	198	Синюха- с.Синюхін Брід	Миколаївська			13,4				10.03.2018	20.03.2018	60,0	
81430	200	Велика Вись- с.Ямпіль	Черкаська							07.03.2018	20.03.2018	19,7	
81433	201	Ятрань - с.Покотилово	Кіровоградська			1,69				10.03.2018	22.03.2018	10,7	
81438	203	Чорний Ташлик- с.Тарасівка	Миколаївська			1,84				15.03.2018	19.03.2018	5,30	
81446	207	р.Ілгул-м.Кропівницький	Кіровоградська							06.03.2018	30.03.2018	3,70	
81450	209	р.Ілгул-с.Новогорожене	Миколаївська			4,9				10.03.2018	31.03.2018	14,0	
81439	204	Мертвеїд-с.Крива Пустощ	Миколаївська										
81442	205	Чичкалія-с.Василівка	Миколаївська										
81444	206	Гнилий Сланець-с.Женево- Криворіжжя	Миколаївська										
81454	210	Громюкля-с.Михайлівка	Миколаївська										
81336	211	Тилігул-с.Новоукраїнка	Одеська										
81338	212	Тилігул-с.Березівка	Одеська			0,01							
81475	139	Великий Куяльник-Северинівка	Одеська			0,01							
81327	213	Ботна-м.Каушани	Молдова										
81001	214	Копильник-м.Котовськ	Одеська										
42231	215	Ялгул-зал.ст.Комрат	Молдова										

Рисунок 3.17 – Діалогове вікно оперативної вихідної інформації

BAZA_INFO_HYDRO

Тип даних: ☐ Оперативні ☒ Базові ☐ Криві витрат води

Таблиця: BAZA_INFO_HYDRO

Умовні позначення

Зберегти

Вивести в Excel

Index	QI_Hydro	Hydro	OBL	F	fb	fl	Hr_G	DI_G	Hr_D	DI_D	S0	X10	X20	LO
81361	187	Піддонний Буг-с Тростянець	Вінниця	17400	4	11	48,5167	29,3833	49,14	28,16	57	25	40	53
81363	188	Піддонний Буг-с Підгір'я	Миколаївська	24600	3	14	48,1	30,6667	48,90	28,57	55	26	39	54
81393	193	Рів-с Демидівка	Вінниця	1130	4	12	49,1	28,2667	49,12	27,74	62	41	20	53
81414	197	Кодила-с Катеринка	Миколаївська	2390	1	11	47,9167	30,7833	47,96	29,95	37	36	37	44
81417	198	Синюха-с Синюхи Брод	Миколаївська	16700	1	5	48,1333	30,8167	48,82	30,80	53	20	31	52
81430	200	Велика Вісь-с Ямпіль	Черкаська	2820	1	3	48,7667	30,9833	48,74	31,48	48	14	22	52
81433	201	Ятрань-с Покоитово	Кіровоградська	2140	1	7	48,4833	30,7167	48,63	30,37	55	15	22	52
81438	203	Чорний Ташлик-с Тарасівка	Миколаївська	2230	1	2	48,2	31	48,32	31,46	43	24	34	53
81446	207	р Ілкуп-м Кропивницький	Кіровоградська	840	1	2	48,5	32,2667	48,65	32,15	38	30	25	54
81450	209	р Ілкуп-с Новогородище	Миколаївська	6670	1	1	47,5167	32,3667	48,16	32,33	37	29	26	49
81439	204	Мертвовід-с Крива Пустощ	Миколаївська	252	1	2	48,9167	31,7167	48,01	31,84	36	28	26	47
81442	205	Чкавля-с Василівка	Миколаївська	436	0	1	47,5667	30,6167	47,72	30,39	41	24	34	42
81444	206	Гиний Станець-с Женево-Кривоноса	Миколаївська	1190	1	1	47,3833	31,7667	47,70	31,76	36	28	26	47
81454	210	Громостя-с Михайлівка	Миколаївська	1410	1	2	47,45	32,1667	47,72	32,10	36	28	26	47
81336	211	Титуп-с Новоукраїна	Одеська	810	0	1	47,65	30,2333	47,76	29,87	41	24	26	42
81338	212	Титуп-с Березівка	Одеська	3170	1	1	47,2	30,9167	47,53	30,24	41	24	34	42
81475	139	Великий Кутяник-Северинівка	Одеська	1840	1	1			47,08		25	15	40	42
81327	213	Ботна-м Каушани	Молдова	1210	0	22	46,6	29,4833	46,8		47	25	14	32
81001	214	Копчани-м Катковськ	Одеська	179	0	27			46,7		50	19	20	32
42231	215	Ялпуг-заст Копрат	Молдова	241	0	6	45,7	28,5833	46,5		32	20	11	40

Рисунок 3.18 – Діалогове вікно базової вихідної інформації

Прогноз

Вихідні дані

Дата складання прогнозу: 20 лютого 2000

Вибір показника вологості ґрунту: середня витрата води в лютому

Визначення середньої добавки снігу до максимальних снігозапасів dS: Розрахувати dS

Дощові опади періоду танення снігу X1: Очікуються близько норми

Дощові опади періоду спаду водопілля X2: Очікуються близько норми

Коефіцієнт допустимого діапазону прогнозової величини: В 10%-му діапазоні

Прогноз

Шарів стоку Y

Максимальних витрат води Qm

Прогноз дат початку весняного водопілля D1

Прогноз дат максимальних витрат (рівнів) води D2

Рисунок 3.19 – Діалогове вікно для випуску прогнозу характеристик стоку весняного водопілля

Прогноз

Тип даних: ☒ Результат ☐ Розрахунок

Таблиця: Умовні позначення

Index	Q _г Hydro	Hydro	QIP	KIP	LSR	KL	SSR	SSRL	SR	X10	KB1	X1	X20	KB2
81361	187	Падений Буг - с.Тростяник	16,81372	0,35	26	0,49	38	39	39	25	0,76	19,27	40	0,84
81363	188	Падений Буг - с.Підгір'я	24,1	0,4	22	0,41	38	39	39	26	0,74	19,27	39	0,84
81393	193	Рав. с.Демидова	1,2	0,39	24	0,45	44	45	45	41	0,76	31,19	20	0,84
81414	197	Кодляк - с.Катеринка	2,55	1,01	6	0,14	35	35	35	36	0,66	23,63	37	0,82
81417	198	Сивака - с.Сиваків Брід	13,4	0,36	18	0,35	62	62	62	20	0,73	14,68	31	0,83
81430	200	Волка Вись - с.Ямпіль	2,72498	0,52	22	0,42	41	41	41	14	0,73	10,17	22	0,83
81433	201	Ятрань - с.Покотилово	1,69	0,31	12	0,23	66	67	67	15	0,72	10,75	22	0,83
81438	203	Чорний Ташлик - с.Тарасівка	1,84	0,27	19	0,36	41	41	41	24	0,69	16,53	34	0,82
81446	207	річка Глинь - с.Кропивницький	0,8117	0,43	20	0,37	34	34	34	30	0,72	21,55	25	0,83
81450	209	річка Глинь - с.Новгородка	4,9	0,34	14	0,29	28	28	28	29	0,67	19,56	26	0,82
81439	204	Мертводік - с.Крива Пустощ	0,24351	0,34	9	0,19	27	27	27	28	0,66	18,51	26	0,82
81442	205	Чичеляк - с.Василівка	0,42131	0,78	6	0,14	35	35	35	24	0,63	15,24	34	0,81
81444	206	Глинь - с.Славен - с.Жітчево - Кривороза	1,1499	0,34	9	0,19	27	27	27	28	0,63	17,72	26	0,81
81454	210	Громиця - с.Михайлівка	1,36249	0,7	9	0,19	27	27	27	28	0,63	17,77	26	0,81
81336	211	Титулів - с.Новоукраїнка	0,78271	0,67	6	0,14	35	35	35	24	0,64	15,32	26	0,81
81338	212	Титулів - с.Березівка	0,01	0,01	9	0,21	27	27	27	24	0,62	14,82	34	0,81
81475	139	Великий Курялик - с.Северинівка	0,01	0,06	11	0,26	20	20	20	15	0,58	8,66	40	0,8
81327	213	Ботна - м.Кацків	1,16923	0,8	9	0,28	21	22	22	25	0,55	13,8	14	0,79
81001	214	Копитинки - Катюшків	0,17297	0,39	9	0,28	21	22	22	19	0,54	10,32	20	0,79
42231	215	Януш-зал-ст.Комар	0,23268	0,58	5	0,13	14	14	14	20	0,52	10,5	11	0,78

Рисунок 3.20 – Таблиця результатів прогнозу шарів стоку Y_m весняного водопілля 2017-2018 р.

В результаті розробки програмного комплексу «Південний Буг» для випуску довгострокового прогнозу характеристик стоку весняного водопілля був розроблений продукт, що надає користувачу наступні функціональні можливості:

- введення оперативної інформації по метеорологічним станціям;
- відновлення оперативної інформації по метеорологічним станціям;
- введення оперативної інформації по гідрологічним постам;
- відновлення оперативної інформації по гідрологічним постам;
- розрахунок прогнозних величин;
- перегляд і друк таблиць з вихідними даними й результатами розрахунку.

Подальші перспективи роботи пов'язані з автоматизацією прив'язки вихідних рядів спостережень з мережі Інтернет (при використанні автоматизованого програмного комплексу УкрГМЦАРМ-гідро) в таблиці програмного прогностичного комплексу «Південний Буг». Крім того, планується блок програми, який дозволить на основі ГІС карт робити прив'язку прогностичної інформації до картографічної основи, що дозволить оцінювати ступінь ризику при проходженні весняних водопіль високої водності для значних територій, у тому числі й невивчених в гідрологічному відношенні річок. Таким чином, розроблений комплекс «Південний Буг» дозволяє автоматизувати та прискорити процес випуску прогнозу весняного водопілля в басейні р. Південний Буг і зараз використовується в практичній діяльності ГМЦ ЧАМ.

4 ОБҐРУНТУВАННЯ МЕТОДИКИ ДОВГОСТРОКОВИХ ПРОГНОЗІВ ХАРАКТЕРИСТИК ВЕСНЯНОГО ВОДОПІЛЛЯ ДЛЯ НЕВИВЧЕНИХ РІЧОК БАСЕЙНУ ПІВДЕННОГО БУГУ

4.1 Методичні підходи до методики довгострокового прогнозу характеристик весняного водопілля річок басейну р. Південний Буг для невивчених річок

Обґрунтована у попередньому розділі регіональна методика довгострокового прогнозу характеристик стоку весняного водопілля річок басейну р. Південний Буг базується на даних багаторічних гідрометеорологічних спостережень та може бути застосована для річок басейну в широкому діапазоні площ водозборів (від 92,5 км² – р. Соб – с. Зозів до 46200 км² – р. Південний Буг – смт Олександрівка), розташованих в межах встановлених у розд. 1, п. 1.3.4 однорідних за умовами формування весняних водопіль річок районів (підрайонів).

Однак, на деяких річках регулярні гідрологічні спостереження за витратами води зазвичай не ведуться, що не дає можливості прогнозування стокових характеристик за традиційними методами гідрологічних прогнозів [1]-[3]. Регіональна методика довгострокових прогнозів характеристик весняного водопілля в басейні р. Південний Буг, що розроблена автором роботи (розд. 3), дає можливість складання прогнозів й для річок невивчених в гідрологічному відношенні при використанні метеорологічних та агрометеорологічних даних спостережень або за картосхемами прогнозних модульних коефіцієнтів шарів стоку чи максимальних витрат води весняних водопіль. При цьому необхідним є визначення таких базових характеристик прогнозованої методики як середньобагаторічні шари стоку та максимальні витрати води весняного водопілля річок, на яких часові ряди стокових спостережень відсутні.

В науковій літературі відомі методи узагальнення та визначення для невивчених річок території величин шарів весняного стоку шляхом районування території [4]-[6], побудови карт ізоліній річкового стоку [4], [7]-[10] або карт з інтерполяційною поверхнею (ГІС) [11], а також шляхом їх розрахунку за регіональними рівняннями [7], [8].

На відміну від шарів стоку, максимальні витрати води періоду весняного водопілля не можуть бути узагальнені по території через їх редукцію під впливом зміни площ річкових водозборів та інших

морфометричних характеристик басейнів. Тому, в роботі здійснено обґрунтування методики визначення середньобагаторічних максимальних витрат води весняного водопілля в басейні р. Південний Буг. З цією метою застосовано операторну модель формування стоку весняного водопілля річок (автор Є.Д. Гопченко [12], [13]), а саме її модифікованого варіанту, запропонованого В.А. Овчарук [14], але реалізованої авторами моделі для визначення максимальних витрат води весняного водопілля рідкісної ймовірності перевищення.

Розроблену методику щодо визначення базової характеристики прогнозованої схеми – середньобагаторічних величин максимальних витрат води весняного водопілля річок басейну р. Південний Буг буде використано автором роботи при довгостроковому прогнозуванні характеристик максимального стоку весняного водопілля невивчених у гідрологічному відношенні річок розглядуваної території.

4.2 Методика визначення середньобагаторічних величин характеристик максимального стоку весняного водопілля для невивчених річок басейну р. Південний Буг

4.2.1 Сучасний стан нормування розрахункових характеристик максимального стоку весняного водопілля річок

Нормування максимальних витрат води весняного водопілля річок базується на використанні формул різної структури. У численних працях вітчизняних науковців, зокрема науковцями кафедри гідрології суші Одеського державного екологічного університету, широко застосовуються сучасні напрацювання Є.Д. Гопченка, який удосконалив нормативну базу СНіП 2.01.14-83 [16] та поділив усі відомі розрахункові формули та методики на дві групи [12], [17].

Перша група включає формули, що спираються на геометричну схематизацію схилового і (або) руслових гідрографів стоку, а друга група – це формули, що засновані на теорії руслових ізохрон.

Перша група формул є науково-методичною основою для редукційних і об'ємних формул. Методи розрахунку максимального стоку засновані на першій групі формул представлені у роботах Є.Д. Гопченка та його послідовників [7], [8], [12]-[15], [19]-[22]. Базове розрахункове рівняння має наступний вигляд

$$q_m = \frac{k_0 Y_m}{F + t_p / T_0} k_n k_m, \quad (4.1)$$

де q_m – максимальний модуль стоку весняного водопілля, $\text{м}^3/(\text{с} \cdot \text{км}^2)$;
 Y_m – розрахунковий шар стоку за весняне водопілля, мм;
 k_0 – коефіцієнти схилової трансформації весняного водопілля (коефіцієнт «дружності» водопілля);
де F – площа річкових водозборів, км^2 .

При цьому, за дослідженнями автора [23] коефіцієнт k_0 являє собою коефіцієнт схиловоїрегульованості весняного водопілля, оскільки $k_0 Y_m = q'_m$

$$k_0 = \frac{n+1}{n} \cdot \frac{1}{T_0}, \quad (4.2)$$

де $\frac{n+1}{n}$ – коефіцієнт нерівномірності схилового припливу у часі (n – характеризує форму графіку припливу);

T_0 – тривалість схилового припливу під час весняного водопілля до руслової мережі, год;

t_p – тривалість добігання повеневих хвиль, год;

k_n – коефіцієнт русло-заплавного регулювання весняного водопілля

$$k_n = \frac{T_0 + t_p}{T_n} \leq 1,0; \quad (4.3)$$

T_n – тривалість весняного водопілля;

k_m – коефіцієнт форми гідрографу весняного водопілля

$$k_m = \frac{m+1}{m} / \frac{n+1}{n}, \quad (4.4)$$

$\frac{m+1}{m}$ – коефіцієнт часової нерівномірності руслового стоку під час весняного водопілля.

Для отримання з базового рівняння (4.1) структури відомих редукційних формул та спрощення рівняння необхідно тривалість схилового припливу під час весняного водопілля до руслової мережі T_0 осереднити в межах досліджуваного водозбору або території. Завдяки цьому рівняння (4.1) можна

спростити описавши редукційні коефіцієнти $\frac{1}{1+t_p/T_0}$, k_n та k_m інтегрально при залученні морфометричної характеристики – площі річкових водозборів (F , км)

$$q_m = \frac{k_0 Y_m}{(F+1)^{n_1}}. \quad (4.5)$$

Структура рівняння (4.5) є класичним прикладом редукційної розрахункової методики. Свого часу дана формула була рекомендована для розрахунку максимальних модулів стоку весняного водопілля (для усієї території колишнього СРСР) у нормативних документах СН 435-72 і СНіП 2.01.14-83, але в дещо зміненому вигляді, при введенні параметру b

$$q_m = \frac{k_0 Y_m}{(F+b)^{n_1}}, \quad (4.6)$$

де b – емпіричний параметр, що враховує зниження інтенсивності редукції модуля максимального стоку в області невеликих водозборів (змінюється від 1 до 10 км²).

За умови, що осередненню підлягають як тривалість схилового припливу T_0 , так і шар стоку Y_0 рівняння (4.5) можна спростити та записати у наступному вигляді

$$q_m = \frac{q'_m}{(F+1)^{n_1}}, \quad (4.7)$$

де q'_m – максимальний модуль схилового припливу, який розраховується за рівнянням

$$q_m = k_0 Y_m = \frac{n+1}{n} \cdot \frac{1}{T_0} \cdot Y_m. \quad (4.8)$$

Виходячи з формули (4.7), очевидно, що параметр q'_m підлягає осередненню, причому у тих просторових межах, у яких припускалось осереднення T_0 та Y_0 .

У нормативних документах СН 435-72, СНіП 2.01.14-83 і сучасному варіанті російського нормативного документа СП 33-101-2003 від цих положень, на сьогодні, відійшли. Отже, якщо в рівняння (4.1) підставити (4.2), (4.3) та (4.4), то отримаємо наступне рівняння

$$q_m = \frac{m+1}{m} \cdot \frac{Y_m}{T_n}. \quad (4.9)$$

Рівняння структури (4.9) є класичним варіантом редакції формул об'ємного типу. На сьогодні, використання спрощених структур (4.5) і (4.7) для нормування розрахункових характеристик максимального стоку річок України є недоцільним, виходячи з того, що в нормативних документах СН 435-72 і СНіП 2.01.14-83 при розрахунках максимального стоку весняних водопіль використовуються поправки на залісеність і заболоченість, що порушує умови можливого спрощення (4.1) до рівня (4.5) [24].

Розробниками методик з використанням теорії руслових ізохрон в Україні були представники київської наукової школи (А.В. Огієвський [25], Й.А. Железняк [26], В.І. Мокляк [27], П.Ф. Вишневський [28] та ін.) й одеської наукової школи (Н.Ф. Бефані, А.М. Бефані, Є.Д. Гопченко [29], Є.Д. Гопченко та ін. [7], [12], [18]-[23], [29], [30]). Теорія руслових ізохрон також рекомендована ВМО як базова для побудови моделей формування максимального стоку річок [31].

Найбільш відомою і теоретично обґрунтованою серед формул другого типу, що спираються на теорію руслових ізохрон є розрахункова схема А.М. Бефані, яка наведена в роботі [29]. У запропонованій А.М. Бефані розрахунковій схемі за вихідну прийнята розгорнута модель руслових ізохрон.

Максимальні витрати води за такою моделлю визначаються за рівняннями:

а) при $t_p < T_0$,

$$Q_m = V \int_0^{t_p} q'_t B_t \varepsilon_t dt; \quad (4.10)$$

б) при $t_p \geq T_0$,

$$Q_m = V \int_0^{T_0} q'_t B_t \varepsilon_t dt, \quad (4.11)$$

де Q_m – максимальна витрата води, м³/с;

V – швидкість руслового добігання, м/с;

B_t – ширина водозборів по ізохронах руслового добігання, м;

q'_t – ординати упорядкованих гідрографів схилового припливу, м³/(с·км²);

ε_t – коефіцієнт русло-заплавного регулювання паводків і водопіль.

Авторами [12] після інтегрування формул (4.10) і (4.11), відповідно, по t_p і T_0 , та деяких перетворень і узагальнень, обґрунтовано розрахункову формулу операторного типу, яка надалі була застосована в [12], [13] для визначення максимальних модулів стоку річок (різної ймовірності перевищення P , %) при врахуванні трансформації водопіль під впливом руслового добігання, русло-заплавного водообміну та озер і водосховищ руслового типу

$$q_m = q'_m \psi(t_p/T_0) \varepsilon_F \delta, \quad (4.12)$$

де q_m – модуль максимального стоку весняного водопілля, що сформований талими та дощовими водами, $\text{м}^3/(\text{с} \cdot \text{км}^2)$;

q'_m – модуль схилового припливу талих і дощових вод, $\text{м}^3/(\text{с} \cdot \text{км}^2)$;

$\psi(t_p/T_0)$ – трансформаційна функція розпластування повеневих хвиль під впливом руслового добігання;

ε_F – коефіцієнт русло-заплавного регулювання;

δ – коефіцієнт трансформації водопіль під впливом озер і водосховищ руслового типу.

В рамках типових гідрографів [23] модуль схилового припливу розраховується за формулою

$$q'_m = 0,28 \cdot \frac{n+1}{n} \cdot \frac{1}{T_0} \cdot Y_m, \quad (4.13)$$

де 0,28 – коефіцієнт розмірності.

Розрахункова модель (4.12) апробована у численних працях з розрахунку характеристик максимального стоку весняного водопілля різної ймовірності перевищення для різних фізико-географічних зон України [7], [12], [13], [19]-[21]. Слід зазначити, що модель (4.12) є універсальною і використовувалася для визначення максимальних модулів стоку не тільки весняних водопіль, а й дощових паводків [18], [19], [22].

Так, свого часу методика нормування характеристик максимального стоку річок у вигляді операторної моделі, була науково обґрунтована авторами [12], [13] для встановлення величин максимальних витрат води та об'ємів повеней різної ймовірності перевищення (наприклад, 1 %, 5 %, 10 % та ін.) для річок рівнинної території України. Така ж методика була використана й при розробці методу територіальних довгострокових прогнозів характеристик максимального стоку весняного водопілля, зокрема, при визначенні максимальних витрат води весняних водопіль, як базової характеристики

прогнозна методика автора [8], для невивчених у гідрологічному відношенні річок. При цьому розрахунок схилового припливу води в операторній моделі здійснювався за даними про шари стоку весняного водопілля.

Пізніше, розрахункова методика для визначення максимальних модулів стоку рідкісної ймовірності перевищення [13] була удосконалена авторами [14] для умов нестійкого клімату. При цьому, в модифікованому варіанті моделі в якості вхідних даних використані метеорологічні характеристики – снігозапаси та опади.

Авторами дослідження вперше реалізовано операторну модель формування стоку в редакції авторів [13], [14] для визначення середньобогаторічних величин максимальних витрат води весняного водопілля в басейні р. Південний Буг, де як вихідні, окрім морфо метричних характеристик водозборів, використані метеорологічні величини (снігозапаси та опади) та коефіцієнти стоку, за якими визначені й середньобогаторічні шари весняного стоку.

Врахування змін клімату в оцінках характеристик весняного водопілля річок буде здійснено шляхом введення до структури операторної моделі «кліматичних поправок» розрахованих за даними сценарних метеорологічних даних.

4.2.2 Використання операторної моделі формування стоку для визначення середньобогаторічних модулів максимальних витрат води весняного водопілля в басейні р. Південний Буг

Для визначення середньобогаторічних модулів максимальних витрат води весняного водопілля в басейні р. Південний Буг, які є базовими величинами в методі довгострокового прогнозування характеристик стоку, в роботі використано операторну модель формування максимального стоку весняного водопілля (4.12), в редакції авторів [7], [13], [14].

При цьому, для обґрунтування параметрів операторної моделі (4.12), при розрахунку середньобогаторічних модулів максимальних витрат води схилового припливу в формулі (4.13) середньобогаторічні величини шарів стоку весняного водопілля (Y_0 , мм) представлено з урахуванням стокоутворюючих характеристик, а саме як добуток середньобогаторічних величин коефіцієнтів весняного стоку (η_0) та сумарних запасів вологи на басейні, що формують стік весняного водопілля – середньобогаторічних максимальних запасів води в сніговому покриві та опадів періоду водопілля ($S_0 + \sum X_0$), мм у вигляді

$$Y_0 = (S_0 + \sum X_0) \eta_0. \quad (4.14)$$

Таким чином, середньобагаторічний модуль максимальної витрати води схилового припливу (4.13) представлений у вигляді

$$q'_0 = 0,28 \frac{n+1}{n} \frac{1}{T_0} (S_0 + \sum X_0) \eta_0. \quad (4.15)$$

Вихідною інформацією при розробці методики середньобагаторічних величин максимальних витрат води весняного водопілля на основі операторної моделі формування стоку річок є дані багаторічних гідрологічних спостережень в басейні р. Південний Буг по 37 гідрологічних постах та залученні трьох постів на малих річках між Дністром та Південним Бугом з періодом від 22 до 102 років (по 2015 рік включно). Діапазон водозбірних площ річок коливається від 36,5 км² (р. Південний Буг – с. Чорнява) до 46200 км² (р. Південний Буг – смт Олександрівка).

Для визначення метеорологічних характеристик (величин максимальних запасів води в сніговому покриві та опадів періоду весняного водопілля) в роботі використані дані по 25 метеорологічним станціям за період 1966-2015 р., які рівномірно розміщені по території басейну.

Обґрунтування параметрів розрахункової моделі виконувалось шляхом послідовного визначення складових схилового припливу (у т.ч. середньобагаторічних величин максимальних запасів води в сніговому покриві, опадів періоду водопілля та коефіцієнтів весняного стоку, на основі яких визначені й величини середньобагаторічних шарів весняного стоку), трансформаційної функції максимального стоку та руслозаплавного регулювання в період весняного водопілля на досліджуваній території. Розглянемо окремо результати визначення складових та базових параметрів пропонованої моделі, які представлені автором у публікації [15].

4.2.2.1 Визначення середньобагаторічних максимальних запасів води в сніговому покриві, дощових опадів періоду весняного водопілля та коефіцієнту стоку весняного водопілля в басейні р. Південний Буг

Максимальні запаси води в сніговому покриві та дощові опади періоду весняного водопілля. Визначення середньобагаторічних величин максимальних запасів води в сніговому покриві S_0 здійснено за багаторічними даними снігомірних зйомок шляхом статистичної обробки часових рядів максимальних снігозапасів (розд.3, п. 3.3.3). Середньобагаторічні величини максимальних снігозапасів картовано (рис. 3.2), що дає можливість визначення їх величин для будь-якого річкового водозбору розглядуваної території [15].

Опади періоду формування весняного стоку розглядаються як сума опадів періоду сніготанення та опадів, що випали у період спаду водопілля. Тому складова формули (4.15) представляється як $\sum X_0 = X_{1_0} + X_{2_0}$, де X_{1_0} – середньобаторічні дощові опади періоду сніготанення, мм; X_{2_0} – середньобаторічні дощові опади періоду спаду водопілля, мм. Середньобаторічні величини дощових опадів періоду танення снігу X_{1_0} , мм та опадів періоду спаду весняного водопілля X_{2_0} , мм розраховані в роботі згідно з рекомендаціями автора [8], тобто за регіональними рівняннями вигляду

$$X_1 = 0,77 \cdot T_{X_1} + 7,0, \quad (4.16)$$

$$X_2 = 1,09 \cdot T_{X_2} + 3,35, \quad (4.17)$$

де T_{X_1} – середня тривалість періоду від дати максимальних снігозапасів до дати завершення сніготанення, діб;

T_{X_2} – тривалість спаду водопілля, діб.

Своєю чергою величини T_{X_1} та T_{X_2} визначаються за рівняннями вигляду [8]

$$T_{X_1} = 2,0 \cdot (\varphi^0 - 48) + 24; \quad (4.18)$$

$$T_{X_2} = 10 \cdot \lg(F + 1), \quad (4.19)$$

де φ^0 – географічна широта геометричних центрів водозборів, в частках град. півн. ш.

Визначення середньобаторічних коефіцієнтів стоку весняного водопілля. Середньобаторічні коефіцієнти стоку весняного водопілля η_0 визначаються як відношення величини середньобаторічних шарів стоку весняного водопілля Y_0 (одержаних за даними статистичної обробки їх часових рядів) до величин середньобаторічних сумарних запасів вологи на басейні $(S_0 + X_{1_0} + X_{2_0})$, які випали на площу водозбору і зумовили виникнення стоку весняного водопілля. Розрахункові величини η_0 узагальнені від широти геометричних центрів водозборів річок в басейні р. Південний Буг (рис. 4.1).

Наявність вираженої закономірності зростання величин η_0 зі збільшенням географічної широти центрів водозборів річок (при коефіцієнті кореляції $r=0,76$) стала підставою для їх картування в межах досліджуваної території (рис. 4.2). Встановлено, що коефіцієнти стоку весняного водопілля η_0 зменшуються в напрямку з північного заходу від 0,60 – 0,50 на південь басейну – до 0,1 – 0,05.

Таким чином, при узагальненні середньобаторічних максимальних запасів води в сніговому покриві та коефіцієнтів стоку (у вигляді картосхем їх розподілу по території), розрахунку дощових опадів періоду весняного водопілля (за регіональними рівняннями) є можливість визначення цих характеристик для будь-яких річкових басейнів розглядуваної території.

Крім того, за визначеними таким чином стокоутворюючими характеристиками весняного водопілля автором були одержані (за формулою (4.14) й середньобаторічні величини шарів стоку весняного водопілля, які є базовою характеристикою в регіональній методиці довгострокового прогнозу весняного водопілля в басейні р. Південний Буг.

Розраховані середньобаторічні шари стоку весняного водопілля в басейні р. Південний Буг мають добру збіжність з їх величинами, отриманими при статистичній обробці (при значущому коефіцієнті кореляції – $r = 0,98$ (рис. 4.3).

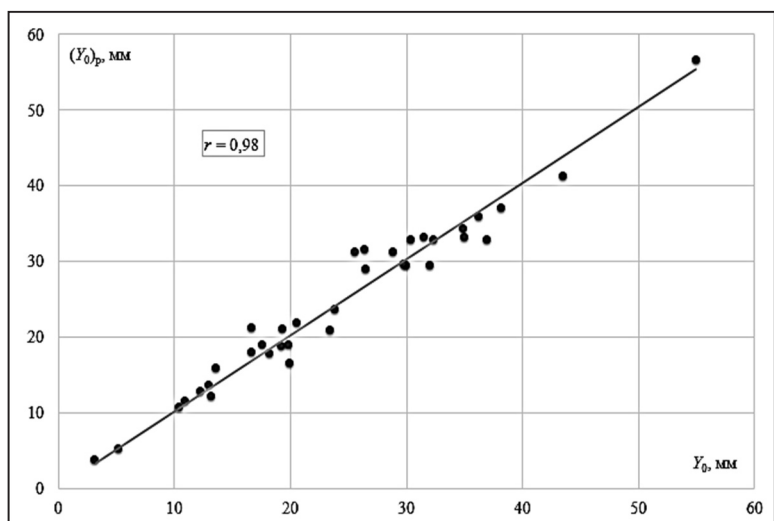


Рисунок 4.3 – Зв’язок середньобаторічних шарів стоку весняного водопілля, розрахованих за рівнянням (4.14) і середньобаторічних величин шарів сток, визначених шляхом статистичної обробки(станом на 2015 р.) в басейні р. Південний Буг

В результаті, одержані середньобаторічні величини шарів стоку весняного водопілля в басейні р. Південний Буг при використанні метеорологічних характеристик (снігозапасів та опадів) та коефіцієнтів стоку

дозволяють визначити їх для річок невивчених у гідрологічному відношенні, а також врахувати зміни клімату в їх оцінках за даними сценарних метеорологічних даних.

4.2.2.2 Визначення коефіцієнтів часової нерівномірності схилового припливу $(n+1)/n$

Характеристики схилового припливу тало-дощових вод на річкових басейнах можливо встановити лише розрахунковими методами у зв'язку з відсутністю даних їх спостережень. При цьому в роботі прийнятий методичний підхід, що запропонований в [23]. Коефіцієнт часової нерівномірності схилового припливу $(n+1)/n$ має визначатися за коефіцієнтом нерівномірності руслового стоку $(m+1)/m$.

У роботах [32], [33] коефіцієнт нерівномірності руслового стоку рекомендується обчислювати за середньобагаторічними характеристиками весняного водопілля такими, як максимальні витрати води весняного водопілля Q_0 , м³/с, шари стоку періоду весняного водопілля Y_0 , мм, тривалості водопілля $(T_n)_0$, доби, у вигляді рівняння

$$\frac{m+1}{m} = \frac{Q_0(T_n)_0}{Y_0 F} \cdot 86,4. \quad (4.20)$$

Отримані в басейні р. Південний Буг коефіцієнти часової нерівномірності руслового стоку $(m+1)/m$ коливаються в досить великому діапазоні – від 1,72 (р. Південний Буг – с. Селище, $F = 9100$ км²) до 13,7 (р. Синиця – смт Любашівка, $F = 86$ км²). Встановлені коефіцієнти узагальнено залежно від площ річкових водозборів. Зі збільшенням розмірів водозбірних площ, значення коефіцієнтів нерівномірності руслового стоку зменшуються (при коефіцієнті кореляції зв'язку $r=0,53$).

В басейні р. Південний Буг регіональне рівняння для визначення коефіцієнтів часової нерівномірності руслового стоку $(m+1)/m$ має вигляд [15]

$$\frac{m+1}{m} = 12,2 - 2,05 \cdot \lg(F + 1). \quad (4.21)$$

Екстраполяція $(m+1)/m$ на вісь ординат графіків зв'язку $[(m+1)/m] = f[(F+1)]$ дозволила набути шуканого регіонального значення коефіцієнтів нерівномірності схилового припливу $(n+1)/n = 12,2$. Звідки показник степені в рівнянні схилового припливу (n) дорівнює 0,09 [15].

4.2.2.3 Визначення тривалості схилового припливу до руслової мережі

Тривалість схилового припливу T_0 визначено числовим шляхом, запропонованим в роботі [34] в рамках розрахункової формули максимального стоку (4.12). Спираючись на результати дослідження [8], в межах рівнинної території України формування максимального стоку відбувається переважно за співвідношенням $t_p/T_0 < 0,5$. Згідно з роботами [12], [23] розрахункове рівняння для визначення T_0 набуло наступного вигляду (при $t_p < T_0$)

$$T_0 = \left(\frac{\varepsilon_F Y_m}{n q_m} \right)^{\frac{n+1}{n}} \left[(n+1) T_0 - \frac{m_1+1}{n+m_1+1} t_p^n \right]^{\frac{1}{n+1}}. \quad (4.22)$$

В басейні р. Південний Буг складові n , m_1 та t_p рівняння (4.22) можна визначити наступним чином: n виходячи з рівняння (4.21) дорівнює 0,09; m_1 – відповідно до рекомендацій [29] приймається рівним одиниці ($m_1=1$); t_p – тривалість руслового добігання, год, була визначена за гідрографічною довжиною річки (L) та за швидкістю руслового добігання (V_∂) на басейні у вигляді співвідношення

$$t_p = L/V_\partial. \quad (4.23)$$

Швидкості руслового добігання для рівнинних річок України (у т.ч. досліджуваної території) можна визначити за наступним рівнянням

$$V_\partial = a_2 F^{\alpha_2} I_{36}^{0,33}, \text{ км/год}, \quad (4.24)$$

де a_2 та α_2 – швидкісні параметри, які отримано в роботі [35] для кожного фізико-географічного району України (табл. 4.1).

Таблиця 4.1 – Значення швидкісних параметрів a_2 і α_2 [35]

Географічна зона	a_2	α_2
Полісся	1,27	0,12
Лісостепова	1,51	0,17
Степова	1,19	0,14

Складність використання рівняння (4.22) для визначення T_0 полягає у тому, що воно містить дві невідомі складові – коефіцієнт русло-заплавного регулювання (ε_F) і тривалість схилового припливу (T_0). Задача встановлення невідомих ε_F і T_0 у рівнянні (4.22) може бути вирішена за допомогою методу простої однокрокової ітерації з накладенням обмеження на параметр ε_F [12], [23]. Алгоритм однокрокової ітерації при визначенні T_0 побудований таким чином, що початкове його наближення відноситься до рівняння (4.21). При цьому, на першому етапі виконання ітераційних процедур ε_F приймається рівним одиниці. У рівнянні (4.22) встановлення ε_F і T_0 вирішується алгебраїчним шляхом.

Розрахунок середньобагаторічних величини T_0 виконаний на основі програмного комплексу «Сагуа», який дозволяє чисельним методом [34] в автоматичному режимі здійснювати розрахунки та будувати розрахункові залежності в межах розглядуваної території. Розрахунки виконано у два етапи (у двох наближеннях).

На першому етапі (першому наближенні) було прийнято $\varepsilon_F=1,0$, що дозволило визначити «наближені» значення T'_0 . Далі значення T'_0 узагальнено залежно від площ річкових водозборів F , км². Залежність описується наступним рівнянням [15]

$$T'_0 = 450 \cdot e^{0,27 \cdot \lg(F+1)}, \quad (4.25)$$

з коефіцієнтом кореляції, отриманим після логарифмування (4.25), рівним 0,39.

Використовуючи екстраполяцію залежностей $T'_0 = f[\lg(F+1)]$ на вісь ординат, отримано орієнтовне для розглядуваної території значення $T_0=450$ год (значення T_0 отримано при $F \rightarrow 0$). Встановлене фіксоване значення T_0 далі приймається при розрахунку коефіцієнтів русло-заплавного регулювання ε_F для кожного гідрологічного поста на річках досліджуваної території. При цьому використовується наступне рівняння [23]

$$\varepsilon_F = \frac{(q_0/q'_0)}{[\psi(t_p/T_0)\delta]}. \quad (4.26)$$

Розраховане за (4.26) значення коефіцієнту русло-заплавного регулювання ε_F узагальнено залежно від площ річкових водозборів F , км².

Побудована залежність описується рівнянням [15]

$$\varepsilon_F = e^{-0,24 \cdot \lg(F+1)}, \quad (4.27)$$

з коефіцієнтом кореляції прологарифмованої залежності (4.27), рівним 0,32.

На другому етапі (другому наближенні) при розрахунку шуканої величини T_0 для кожного гідрологічного поста басейну вводиться окреме значення коефіцієнту русло-заплавного регулювання ε_F , яке отримано з рівняння (4.27).

Наступним етапом дослідження, після виконаних розрахунків, є просторовий аналіз та узагальнення розрахункової тривалості схилового припливу T_0 по території басейну. В межах розглядуваної території досліджено закономірності, пов'язані з внеском географічної складової та впливу на T_0 місцевих чинників – залісеності (до 19 %), заболоченості (до 11 %) та висоти місцевості (від 100 до 396 м).

Побудований графік зв'язку тривалості припливу води зі схилів до руслової мережі, під час весняного водопілля, від широти геометричних центрів водозборів річок досліджуваної території $T_0 = f(\varphi^0 - 48)$, показав, що на описуваній території значення T_0 змінюються в широтному напрямку (коефіцієнт кореляції $r = 0,38$).

Подальше дослідження можливого впливу залісеності та заболоченості на тривалість схилового припливу показало його відсутність. Досліджено також залежність тривалості припливу води зі схилів до руслової мережі під час весняного водопілля від середньої висоти водозборів річок $H_{сер}$ розглядуваної території. Залежність $T_0 = f(H_{сер})$ вказує, що значення T_0 збільшуються з висотою місцевості (коефіцієнт кореляції $r = 0,34$). При цьому ж спостерігається тісна залежність середньої висоти водозборів від географічної широти геометричних центрів водозборів річок досліджуваної території $H_{сер} = f(\varphi^0)$, при коефіцієнті кореляції ($r = 0,89$) [15].

На підставі статистично значущого зв'язку тривалості схилового припливу з широтою місцевості φ^0 , величини T_0 було картовано по території (рис. 4.4). Ізолінії розподілу T_0 проведені через 200 год.

Величини ізоліній змінюються в напрямку з північного заходу на південь від 1000 до 200 год. Найбільші значення тривалості схилового припливу відмічаються у верхів'ях та південно-західній частині басейну р. Південний Буг (1000-600 год), а найменші – в басейні р. Інгул (200 год). В середньому по території середньобагаторічна тривалість припливу становить 400-500 год [15].

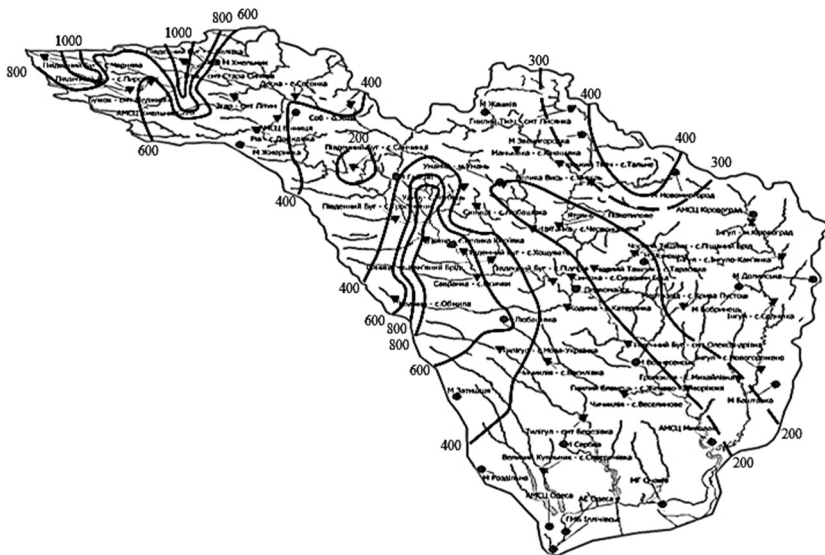


Рисунок 4.4 – Розподіл середньобагаторічної тривалості силового припливу до руслової мережі в період весняного водопілля в басейні р. Південний Буг, год.

4.2.2.4 Визначення трансформації водопіль під впливом тривалості руслового добігання

Середньобагаторічний максимальний модуль стоку води зі схилів до руслової мережі q'_0 під впливом трансформаційних процесів, пов'язаних з переміщенням хвиль водопілля, їх регулюванням русло-заплавною ємністю і водоймами проточного типу (озерами, сховищами, ставками) піддається редукції. При цьому значення q'_0 зменшуються при зростанні площ водозборів річок.

З урахуванням отриманого для досліджуваного басейну значення $n=0,09$ та, вважаючи, що $m_1=1,0$, виконано наступні розрахунки. Для кожного водозбору визначення трансформаційної функції $\psi(t_p/T_0)$ відбувалося за такими етапами: величина t_p визначена за рівнянням (4.23); тривалість схилового припливу T_0 визначається за картосхемою розподілу по території (рис. 4.4); для кожного пункту досліджуваної території знаходиться співвідношення t_p/T_0 . З урахуванням співвідношення для досліджуваної території $t_p/T_0 < 1,0$, значення трансформаційної функції $\psi(t_p/T_0)$ розраховується за регіональним рівнянням

$$\psi(t_p/T_0) = 1 - 0,88 \cdot \left(\frac{t_p}{T_0}\right)^{0,09}. \quad (4.28)$$

В результаті розрахунків одержані значення $\psi(t_p/T_0)$ узагальнено в залежності від співвідношення t_p/T_0 . Залежність $\psi(t_p/T_0)=f(t_p/T_0)$ наведена на рис. 4.5. Значення трансформаційної функції $\psi(t_p/T_0)$ змінюються від 0,14 (р. Південний Буг – Первомайська ГЕС, $t_p/T_0=0,76$; р. Південний Буг – с. Підгір'я, $t_p/T_0=0,78$; р. Південний Буг – смт Олександрівка, $t_p/T_0=0,82$) до 0,48 (р. Південний Буг – с. Чорнява, $t_p/T_0=0,003$).

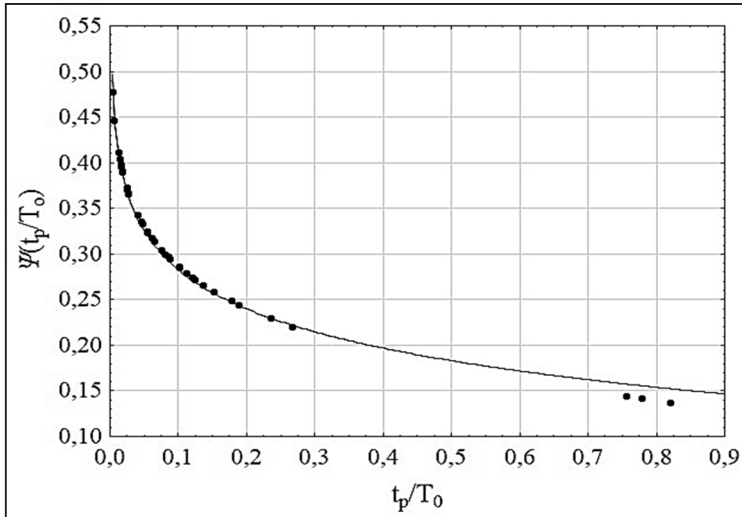


Рисунок 4.5 – Залежність трансформаційної функції $\psi(t_p/T_0)$ від співвідношення t_p/T_0 в басейні р. Південний Буг

4.2.2.5 Визначення коефіцієнту русло-заплавного регулювання

В рамках розрахункової формули максимального стоку (4.12) русло-заплавне регулювання враховується за допомогою коефіцієнта ε_F [12], [23].

Визначення коефіцієнта ε_F відбувається на етапі чисельного визначення тривалості схилового припливу T_0 з рівняння (4.12).

Розраховані величини коефіцієнтів русло-заплавного регулювання ε_F узагальнено в залежності від площ річкових водозборів. Встановлена чітко виражена закономірність убуття ε_F з ростом площі водозборів (рис. 4.6), яка може бути представлена рівнянням вигляду

$$\varepsilon_F = e^{-0,23 \cdot \lg(F+1)}, \quad (4.29)$$

коефіцієнт кореляції цієї залежності, представленою у лінійному виді дорівнює 0,79.

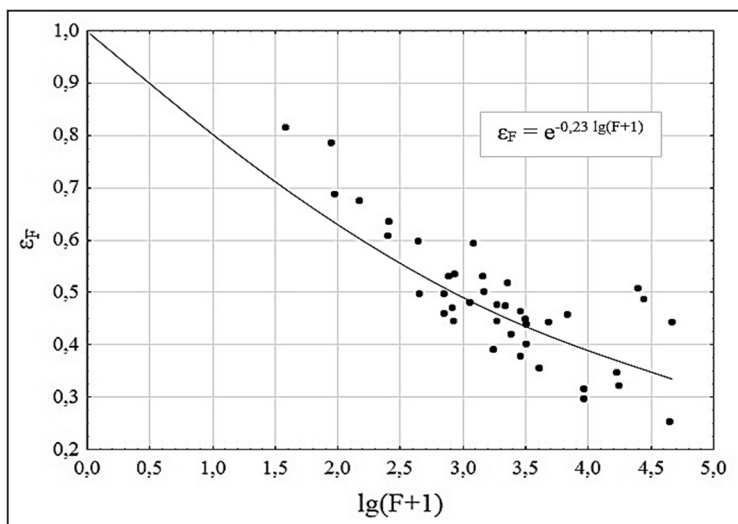


Рисунок 4.6 – Залежність коефіцієнтів русло-заплавного регулювання ε_F від площ водозборів річок в басейні р. Південний Буг

4.2.2.6 Визначення трансформації водопіль під впливом водойм проточного типу

До водойм проточного типу відносять: озера, водосховища, ставки. Маючи регулюючі ємності, вони, в залежності від їх розмірів, спроможні у тій або іншій степені трансформувати гідрографи водопіль.

В рамках розрахункової формули (4.12) трансформація водопіль під впливом водойм проточного типу враховується за допомогою коефіцієнта δ [12], [23]. Оцінка коефіцієнта δ можлива при наявності вичерпної інформації про водойми руслового типу, їхнє місце розташування, морфометрію і кількість. Практична схема розрахунку коефіцієнта δ представлена у чинному нормативному документі СНіП 2.01.14-83 [16].

На досліджуваній території в басейні р. Південний Буг середньозважена озерність f_{oz} не перевищує 1 % і лише на деяких водозборах малих річок коливається в межах 1-3 %. Виходячи з майже відсутності на досліджуваній території озер проточного типу, значення коефіцієнту δ прийнято на рівні 1,0.

4.2.2.7 Оцінка запропонованої методики

Оцінка запропонованої методики визначення середньобаторічних модулів максимальних витрат води весняного водопілля в басейні р. Південний Буг проведена за результатами перевірочних розрахунків цих величин за розрахунковою моделлю (4.12) та представлена у табл. 4.2.

Порівняння середньобаторічних модулів максимальних витрат води весняного водопілля, розрахованих за моделлю (4.12) на базі метеорологічних даних із середньобаторічними величинами максимальних модулів стоку річок в басейні р. Південний Буг, за даними спостережень до 2015 р. включно, показано на рис. 4.7.

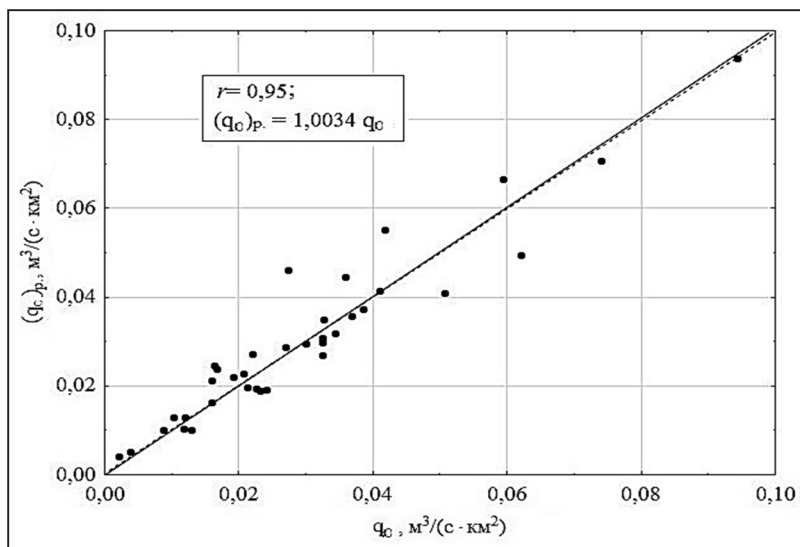


Рисунок 4.7 – Зв'язок середньобаторічних модулів максимальних витрат води весняного водопілля, розрахованих за операторною моделлю (4.12) і середньобаторічними величинами модулів максимальних витрат води річок (станом на 2015 р.) в басейні р. Південний Буг

Таблиця 4.2 – Перевірочні розрахунки визначення середньобаторічних модулів максимальних витрат води весняного водопілля річок в басейні р. Південний Буг

Індекс поста	Річка – пост	F , км ²	q_0' м ³ /(с·км ²)	$\psi(t_p/T_0)$	ε_F	$(q_0)p'$ м ³ /(с·км ²)	q_0' м ³ /(с·км ²)	$ \Delta $, %	$\varepsilon_{от}$, %
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
81343	Південний Буг – с. Чорнява	36,5	0,21	0,48	0,69	0,07	0,07	4,37	23,7
81346	Південний Буг – с. Пирогівці	827	0,11	0,39	0,50	0,02	0,02	15,7	13,9
81348	Південний Буг – с. Лелітка	4000	0,21	0,32	0,42	0,03	0,03	6,69	15,3
81352	Південний Буг – с. Сабарів	9010	0,23	0,30	0,39	0,03	0,03	16,8	13,4
81353	Південний Буг – с. Селище	9100	0,11	0,31	0,39	0,01	0,01	28,0	17,9
81361	Південний Буг – с. Тросянчик	17400	0,22	0,24	0,36	0,02	0,02	7,81	11,1
81363	Південний Буг – с. Підгір'я	24600	0,50	0,14	0,35	0,02	0,02	50,0	12,4
81365	Південний Буг – м. Первомайськ	44000	0,13	0,24	0,33	0,01	0,01	21,5	16,4
81801	Південний Буг – смт Олександрівка	46200	0,36	0,14	0,33	0,02	0,02	2,25	11,8
81376	Бужок – смт Меджибож	698	0,16	0,37	0,51	0,03	0,03	7,61	16,8
81381	Іква – смт Стара Синява	439	0,15	0,41	0,53	0,03	0,03	7,14	13,7
81386	Згар – смт Літин	692	0,15	0,40	0,51	0,03	0,03	5,07	11,9
81393	Рів – с. Демидівка	1130	0,22	0,33	0,48	0,04	0,04	2,47	9,6
81396	Соб – с. Зозів	92,5	0,24	0,45	0,62	0,07	0,06	12,1	18,5
81408	Савранка – с. Осички	1740	0,08	0,37	0,46	0,01	0,01	8,29	20,1
81409	Синиця – смт Любашівка	86	0,37	0,40	0,63	0,09	0,09	0,60	17,7
81410	Синиця – с. Кам'яний Брід	753	0,27	0,34	0,50	0,04	0,04	24,4	16,1
81411	Кодима – с. Обжила	145	0,09	0,40	0,60	0,02	0,02	32,9	19,7

Кінець таблиці 4.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
81414	Кодима – с. Катеринка	2390	0,07	0,31	0,45	0,01	0,01	16,4	26,7
81417	Синюха – с. Синюхин Брід	16700	0,28	0,23	0,36	0,02	0,02	10,3	13,9
81421	Гнилий Тікич – смт. Лисянка	1450	0,25	0,30	0,47	0,04	0,03	7,46	17,1
81430	Велика Вись – с. Ямпіль	2820	0,16	0,27	0,44	0,02	0,02	13,9	17,9
81433	Ятрань – с. Покотилове	2140	0,36	0,29	0,45	0,05	0,03	69,2	22,6
81437	Чорний Ташлик – с. Піщаний Брід	1830	0,22	0,30	0,46	0,03	0,03	1,55	44,0
81438	Чорний Ташлик – с. Тарасівка	2230	0,36	0,26	0,45	0,04	0,04	1,50	15,9
81439	Мертвовід – с. Крива Пустош	252	0,26	0,37	0,56	0,06	0,04	32,3	22,0
81442	Чичиклія – с. Василівка	436	0,10	0,34	0,53	0,02	0,02	18,6	19,9
81444	Гнилий Єланець – с. Женево-Криворіжжя	1190	0,32	0,27	0,48	0,04	0,05	19,3	24,4
81446	Інгул – м. Кропивницький	840	0,23	0,32	0,50	0,04	0,04	3,35	18,4
81447	Інгул – с. Інгудо-Кам'янка	3080	0,42	0,27	0,43	0,05	0,06	20,4	16,1
81449	Інгул – с. Седнівка	4770	0,27	0,25	0,41	0,03	0,02	24,0	19,9
81450	Інгул – с. Новогорожене	6670	0,22	0,22	0,40	0,02	0,02	20,8	14,9
81454	Громоклія – с. Михайлівка	1410	0,18	0,29	0,47	0,02	0,02	42,6	17,9
Середнє							±16,8%	18,7%	

Коефіцієнт кореляції зв'язку $r=0,95$ відноситься до вельми значущих, а лінія зв'язку практично збігається з лінією рівних значень, що дозволяє оцінити відповідність розрахункових і фактичних величин як задовільну. Точність визначення середньобагаторічних модулів максимальних витрат води весняного водопілля оцінювалася за середнім відносним відхиленням між розрахованими за методикою (4.12) і фактичними величинами визначеними шляхом статистичної обробки(станом на 2015 р.)

$$|\Delta| = \frac{|(q_0)_p - q_0|}{q_0} \cdot 100\% = \pm 16,8\%, \quad (4.30)$$

де $(q_0)_p$ – розрахована за формулою (4.12) величина середньобагаторічного модуля максимальних витрат води весняного водопілля.

Одержане значення $|\Delta| = \pm 16,8\%$ знаходиться на рівні точності вимірювання максимальних витрат води в період проходження весняного водопілля і відповідає точності обчислення середньобагаторічних максимальних витрат води ε_{Q_m} , яка розрахована за формулою [16]

$$\varepsilon_{Q_m} = \frac{100 \cdot C_v}{\sqrt{n}} = 18,7\%, \quad (4.31)$$

де C_v – коефіцієнти варіації часових рядів максимальних витрат води весняного водопілля.

Отримані результати дозволяють рекомендувати операторну модель виду (4.12) для визначення середньобагаторічних модулів максимальних витрат води весняного водопілля в басейні р. Південний Буг при відсутності спостережень за річковим стоком [15].

4.3 Обґрунтування регіональної методики довгострокових прогнозів характеристик максимального стоку весняного водопілля для невивчених річок басейну Південного Бугу

Обґрунтування методики довгострокових прогнозів характеристик весняного водопілля в басейні р. Південний Буг, що запропонована в розд. 3, виконано й для невивчених у гідрологічному відношенні річок досліджуваної території.

При цьому, методика визначення базових характеристик прогнозової методики – середньобагаторічних величин максимального модуля та шарів

стоку весняного водопілля в басейні р. Південний Буг представлена у підрозд. 4.2.

Для обґрунтування методики довгострокових прогнозів характеристик максимального стоку весняного водопілля для невивчених річок басейну Південного Бугу було обрано низку опорних гідрологічних постів, що мають часові ряди стокових спостережень та рівномірно розташовані по території водозбору. Для таких гідрологічних постів здійснене обґрунтування параметрів прогнозової методики та оцінки перевірних прогнозів як для невивчених річок території. При цьому, обґрунтування методики довгострокових прогнозів характеристик весняного водопілля в басейні р. Південний Буг для невивчених річок території здійснено у двох варіантах.

У *першому варіанті* прогнозування шарів стоку та максимальних витрат води весняного водопілля здійснюється відповідно розробленої методики довгострокового прогнозування характеристик весняного водопілля річок басейну Південного Бугу (розд. 3), тобто за регіональними залежностями модульних коефіцієнтів від метеорологічних характеристик періоду формування весняного водопілля річок, які входять в вектор-предиктор дискримінантної функції при встановленні типу водності весняного водопілля.

У *другому варіанті* прогнозування шарів стоку та максимальних витрат води весняного водопілля здійснюється за картосхемами прогнозних величин (представлених у модульних коефіцієнтах), які будуються при прогнозуванні стокових характеристик весняного водопілля за методикою довгострокових прогнозів характеристик весняного водопілля в басейні р. Південний Буг (розд. 3).

Довгострокові прогнози характеристик весняного водопілля річок (як невивчених у гідрологічному відношенні) басейну р. Південний Буг у *першому варіанті*, тобто за метеорологічними та агрометеорологічними вихідними даними здійснюється відповідно етапам випуску прогнозів, що представлені блок-схемою у програмному комплексі «Південний Буг» (рис. 3.15) у такій послідовності.

1. Для формування вектор-предиктору дискримінантної функції типу (3.16) здійснюється визначення метеорологічних та агрометеорологічних величин (максимальних запасів води в сніговому покриві, дощових опадів періоду танення снігу та максимальних глибин промерзання ґрунтів). При цьому, для визначення їх модульних коефіцієнтів необхідним є отримання як щорічних, так і встановлення середньобагаторічних величин:

а) отримання максимальних запасів води в сніговому покриві S_m та максимальних глибин промерзання ґрунтів L_m на дату випуску прогнозу для будь-якого басейну території можливе при побудові картосхем їх розподілу по території у кожному році. Такі картосхеми будуються на основі даних автоматизованих програм АРМ-гідро та АРМ-агро Українського Гідрометцентру ДСНС України (УкрГМЦ) [36], [37], які містять інформацію по запасах води в сніговому покриві на кінець кожної пентади та глибинах промерзання ґрунтів на кінець кожної декади.

Середньобогаторічні величини максимальних запасів води в сніговому покриві S_0 та максимальних глибин промерзання ґрунтів L_0 , своєю чергою, також можна отримати з побудованих у розд. 3, п. 3.3.3 картосхем розподілу по території басейну р. Південний Буг – для S_0 (рис. 3.2) та для L_0 (рис. 3.3);

б) визначення дощових опадів періоду танення снігу X_1 (за їх відсутності на дату випуску прогнозу) ведеться відповідно узагальнень з урахуванням метеорологічного прогнозу, як опади, що очікуються вище, на рівні або нижче середньобогаторічних значень (шляхом введення відповідного коефіцієнту до норм опадів за рівнянням (3.32) та табл. 3.2 у розд. 3, підрозд. 3.3).

Розрахунок середньобогаторічних величин дощових опадів X_{1_0} здійснюється за регіональною залежністю (3.33), тобто від середньої тривалості періоду їх підсумовування T_{X_1} за рівнянням (3.34).

2. За визначенням вектор-предикторомдискримінантної функції та за рівняннями (3.36) ведеться встановлення типу водності весняного водопілля. При цьому коефіцієнти рівнянь дискримінантних функцій при прогнозуванні шарів стоку весняного водопілля встановлюються за табл. 3.4, а для максимальних витрат води – з табл. 3.5 відповідно розташування річки в одному з районів (підрайонів) з однорідними умовами формування характеристик весняного водопілля.

3. Прогнозування шарів стоку та максимальних витрат води весняного водопілля (у вигляді модульних коефіцієнтів $k_{y\alpha k_D}$) здійснюється за регіональними рівняннями типу (3.37), які приймаються в залежності від умов їх застосування відповідно знаку DF (в межах виділених однорідних за умовами формування стоку весняного водопілля районів чи підрайонів). Коефіцієнти регіональних рівнянь представлені для шарів стоку весняного водопілля в табл. 3.6, а для максимальних витрат води – в табл. 3.7.

4. Встановлення прогнозних забезпеченостей характеристик весняного водопілля для невивчених річок басейну Південного Бугу можливе при

визначенні коефіцієнтів варіації шарів стоку $(C_v)_Y$ та максимальних витрат води весняних водопіль $(C_v)_Q$. Для їх встановлення в роботі обґрунтовані регіональні рівняння за даними статистичної обробки:

- для шарів стоку у вигляді

$$(C_v)_Y = 1,2 - 0,39 \cdot (\varphi^0 - 48), \text{ (при } r = 0,75); \quad (4.32)$$

- для максимальних витрат води у вигляді

$$(C_v)_Q = 1,66 - 0,44 \cdot (\varphi^0 - 48), \text{ (при } r = 0,58). \quad (4.33)$$

Визначення прогнозної забезпеченості настання гідрологічної величини у багаторічному розрізі здійснюється за кривою трипараметричного гама-розподілу С.М. Крицького і М.Ф. Менкеля [31] для інтервалу забезпеченостей (3.20) (розд. 3, підрозд. 3.4).

У *другому варіанті* випуск довгострокового прогнозу характеристик весняного водопілля здійснюється за картосхемами спрогнозованих за методикою величин модульних коефіцієнтів шарів стоку k_Y та максимальних витрат води k_Q весняного водопілля та картосхем їх забезпеченостей P_Y чи P_Q , %.

Приклади, таких картосхем наведені у розд. 3, підрозд. 3.5 для весняного водопілля 2017-2018 р. (для шарів стоку на рис. 3.10 (а, б) та для максимальних витрат води – рис. 3.11 (а, б). Прогнозна гідрологічна величина встановлюється для геометричного центру будь-якого водозбору басейну р. Південний Буг.

Таким чином, у вище зазначених схемах прогнозної методики одержаним результатом є спрогнозовані модульні коефіцієнти весняного водопілля k_Y та k_Q .

Перехід від спрогнозованих k_Y чи k_Q доочікуваних значень шарів стоку Y_m чи максимальних витрат води Q_m весняного водопілля здійснюється за рівняннями (3.18) та (3.19) відповідно, тобто шляхом помноження на їх середньобагаторічні величини. При цьому, для невивчених річок території басейну Південного Бугу середньобагаторічні величини стокових характеристик встановлюються за обґрунтованою вище методикою їх визначення (підрозд. 4.2):

- максимальних витрат води весняного водопілля за операторною моделлю формування максимального стоку у вигляді (4.12) та (4.15);
- шарів стоку весняного водопілля за формулою (4.14).

В роботі здійсненого оцінку точності методики довгострокових прогнозів характеристик весняного водопілля як для невивчених у гідрологічному відношенні річок басейну р. Південний Буг (для першого варіанту їх складання за метеорологічними та агрометеорологічними характеристиками) для 8 річкових водозборів досліджуваної території.

Оцінка ефективності методики довгострокового прогнозу характеристик весняного водопілля в басейні р. Південний Буг для шарів стоку представлена у табл. 4.3, а для максимальних витрат води весняного водопілля – у табл. 4.4.

При цьому, середньоквадратичне відхилення прогнозних гідрологічних величин σ від середньобаторічного значення встановлюється за отриманими в роботі регіональними рівняннями:

- для шарів стоку весняного водопілля

$$\sigma = 6,27(\varphi^0 - 48) + 16,2, \text{ мм}; \quad (4.30)$$

- для максимальних витрат води весняного водопілля

$$\sigma = 0,0194 \cdot F + 31,0, \text{ м}^3/\text{с}. \quad (4.31)$$

Допустима похибка прогнозів $\delta_{\text{дон}}$ встановлюється за отриманими регіональними рівняннями

- для шарів стоку весняного водопілля

$$\delta_{\text{дон}} = 3,72(\varphi^0 - 48) + 11, \text{ мм}; \quad (4.32)$$

- для максимальних витрат води весняного водопілля

$$\delta_{\text{дон}} = 0,0145 \cdot F, \text{ м}^3/\text{с}. \quad (4.33)$$

Виконана оцінка ефективності методики довгострокових прогнозів шарів стоку та максимальних витрат води весняного водопілля в басейні р. Південний Буг для річок, невивчених в гідрологічному відношенні, показала, що розроблена методика належить до категорії «добра» та «задовільна».

Таблиця 4.3 – Оцінка якості методики довгострокового прогнозу шарів стоку весняного водопілля по опорних створах в басейні річки Південний Буг та малих річок між Дністром та Південним Бугом, як невивчених річок території

Індекс поста	Річка – пост	Площа водозбору, км ²	n, років	σ , мм	$\delta_{\text{доп}}$, мм	S, мм	S/σ	P, %
Район І								
81348	Південний Буг – с. Лелітка	4000	50	25	16	16	0,64	70
81353	Південний Буг – с. Селище	9100	14	24	16	11	0,45	100
81381	Іква – с. Стара Синява	439	50	26	17	12	0,46	84
Район ІІ								
підрайон Іа								
81411	Кодима – с. Обжила	145	23	16	11	5	0,30	98
підрайон Іб								
81421	Гнилий Тікіч – смт Лисянка	1450	50	25	16	13	0,52	84
81439	Мертвовід – с. Крива Пустош	252	50	16	11	8	0,50	84
81449	Інгул – с. Седнівка	4770	50	19	12	10	0,52	82
підрайон Ів								
81454	Громоклія – с. Михайлівка	1410	23	14	10	5	0,38	78

Таблиця 4.4 – Оцінка якості методики довгострокового прогнозу максимальних витрат води весняного водопілля по опорних створах в басейні річки Південний Буг та малих річок між Дністром та Південним Бугом, як невивчених річок території

Індекс поста	Річка – пост	Площа водозбору, км ²	n, років	σ , м ³ /с	$\delta_{доп}$, м ³ /с	S , м ³ /с	S/σ	P, %
Район І								
81348	Південний Буг – с. Лелітка	4000	50	109	58	48	0,44	94
81353	Південний Буг – с. Селище	9100	14	208	132	66	0,32	98
81381	Іква – с. Стара Синява	439	50	40	6	10	0,25	72
Район ІІ								
підрайон Іа								
81411	Кодима – с. Обжила	145	23	34	2	4	0,12	70
підрайон Іб								
81421	Гнилий Тікіч – смт Лісянка	1450	50	59	21	35	0,59	74
81439	Мертвовід – с. Крива Пустош	252	50	36	4	16	0,44	84
81449	Інгул – с. Седнівка	4770	50	124	69	77	0,62	80
Район ІІІ								
81454	Громокля – с. Михайлівка	1410	23	58	20	14	0,24	74

Критерій якості методики S/σ для шарів стоку весняного водопілля змінюється від 0,30 до 0,64 зі справджуваністю перевірних прогнозів P , % в межах від 70 до 100 %, а для максимальних витрат води весняного водопілля – S/σ змінюється від 0,12 до 0,62 зі справджуваністю перевірних прогнозів P , % в межах від 70 до 98 %.

Таким чином, результати перевірних прогнозів характеристик весняного водопілля та оцінки регіональної методики довгострокового прогнозування дозволяють використовувати її для невивчених в гідрологічному відношенні річок басейну р. Південний Буг.

5 ОЦІНКА ХАРАКТЕРИСТИК ВЕСНЯНОГО ВОДОПІЛЛЯ В УМОВАХ ЗМІН КЛІМАТУ

5.1 Глобальні зміни клімату та можливі сценарії поведінки кліматичної системи

Клімат України, як і всієї Земної кулі, за весь період інструментальних спостережень потеплів, а динаміка зміни клімату країни значною мірою є синхронною зі змінами глобального клімату. Це підтверджується подібністю багаторічного ходу глобальної [1] та регіональних температур повітря [2]. У зв'язку з тим, що проблема глобальних змін клімату є надзвичайно актуальною в усьому світі, у вчених виникла нагальна потреба в науковому обґрунтуванні та методичному забезпеченні оцінки змін клімату, розробці можливих сценаріїв поведінки кліматичної системи з метою розробки рекомендацій для проведення упереджувальних заходів [1].

Так, в 1988 році Всесвітня метеорологічна організація (WMO) спільно з програмою Організації об'єднаних націй по навколишньому середовищу (UNEP) заснували Міжурядову групу експертів зі змін клімату (IPCC) [3]. Метою IPCC є надання урядам різних країн науковообґрунтованої інформації стосовно оцінок масштабів та швидкості змін клімату та їх можливого впливу на навколишнє середовище, соціально-економічний розвиток та ін., що дасть можливість урядам використовувати інформацію для створення планів адаптації структурних секторів економіки країни до змін кліматичної системи.

IPCC публікує результати своєї роботи у вигляді наукових доповідей [3]. Періодично (раз в 5-7 років) готуються найбільш вагомі «оціночні» доповіді, які узагальнюють інформацію з проміжних доповідей, наукових публікацій журналів, монографій, збірників наукових праць та інших джерел. На сьогодні, опубліковано п'ять «оціночних» доповідей IPCC – у 1990, 1995, 2001 і 2007, 2014 роках. При цьому, на сорок третій сесії IPCC, проведеної у квітні 2016 р. була досягнута домовленість того, що робота над шостою «оціночною» доповіддю буде завершена до 2022 р. до терміну першого глобального підведення підсумків Рамкової конвенції ООН про зміни клімату, коли країни проведуть огляд проведення роботи по досягненню мети утримання приросту глобальної середньої температури набагато нижче 2 °С, одночасно докладаючи зусилля щодо обмеження зростання температури до 1,5 °С. Підготовка вкладів трьох робочих груп IPCC в шостій «оціночній» доповіді буде завершена у 2021 р. [4].

Звіти IPCC є достатньо авторитетними серед урядів різних країн і несуть ключовий внесок під час міжнародних переговорів щодо змін клімату [4].

Наразі, до складу Міжурядової групи експертів зі змін клімату (IPCC) входять 195 членів [3]. Проте, слід зазначити, що IPCC не проводить власних досліджень. Для складання звітів про оцінку змін клімату вчені, що входять до складу експертів IPCC присвячують свій час аналізу великої кількості наукових праць, що публікуються щороку, щоб забезпечити вичерпне резюме того, що відомо про причини змін клімату, їх можливі наслідки та майбутні ризики пов'язані зі змінами клімату. Така інформація важлива при розробці стратегії та адаптації до змін клімату на різних рівнях – від регіонального до державного [5], [6]. Оцінки змін клімату, які публікують експерти IPCC, визначають силу наукової згоди в різних областях та формують вектор подальших досліджень в цій області. Кожна нова «оціночна» доповідь Міжурядової групи експертів зі змін клімату (IPCC) представляє більш надійні прогностичні дані сценарних характеристик температур повітря, опадів та ін. (враховуючи технологічний та економічний розвиток людства).

Так, на відміну від попереднього 4-го спеціального звіту IPCC (SRES – SpecialReport on Emissions Scenarios) [7], у якому моделювання велося при використанні сценаріїв, заснованих на вмісті емісій парникових газів та соціально-економічних показниках, в останній, 5-й «оціночній» доповіді (AR5) [1] для моделювання змін клімату було обрано чотири траєкторії концентрацій парникових газів родини RCP (Representative Concentration Pathways) на кінець XXI століття.

Репрезентативні траєкторії концентрацій (RCP) описують різні очікувані зміни кліматичної системи, в залежності від антропогенного навантаження, і всі вони вважаються можливими залежно від обсягу парникових газів, що будуть надходити в атмосферу у подальші десятиліття. Чотири репрезентативні траєкторії концентрацій RCP, а саме RCP2.6, RCP4.5, RCP6 та RCP8.5 (рис. 5.1), залежать від прогнозованого діапазону викидів CO₂ (2,6, 4,5, 6,0 та 8,5 Вт/м² відповідно) до 2100 року [1].

5.2 Оцінка можливих змін водності річок України за сценаріями глобального потепління

Сучасні кліматичні зміни та їх вплив на формування весняного водопілля річок України підтверджено низкою наукових праць вітчизняних вчених (розд.1, підрозд. 1.7).

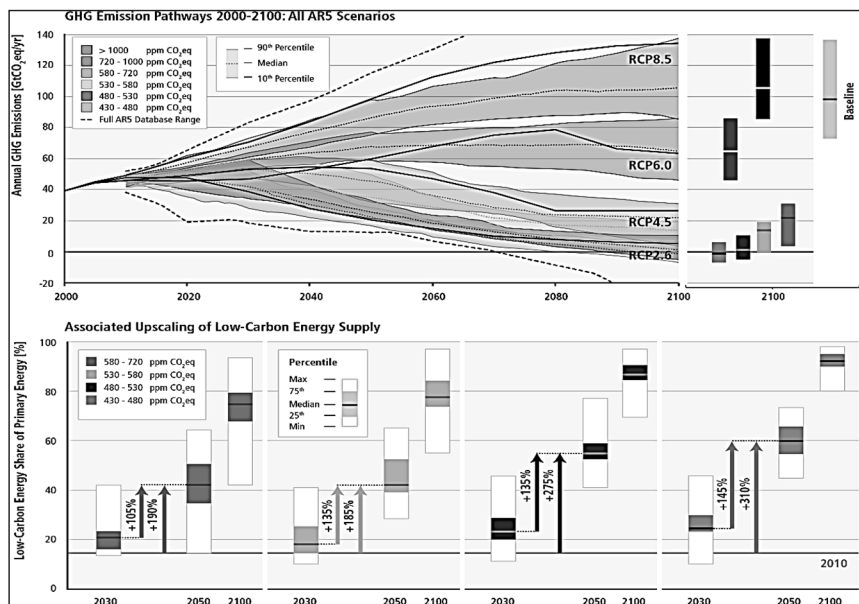


Рисунок 5.1 – Результати розрахунків траєкторії концентрацій парникових газів родини RCP з 2010 по 2100 рр. [1]

У зв'язку з цим, в останні десятиліття особлива увага вітчизняних науковців направлена на оцінку майбутніх кліматичних змін на території України на основі даних сценаріїв глобальних і регіональних чисельних кліматичних моделей, що дозволяють оцінити кліматичні ризики функціонування галузей економіки України в умовах змін клімату [8]-[10]. Майбутні тенденції змін характеристик гідрологічного режиму річок України під впливом глобального потепління досліджено у роботах Н.С. Лободи [11]-[19], Є.Д. Гопченка [11], [14], В.В. Гребеня [20]-[22], С.І. Сніжка [23]-[26], Л.О. Горбачової [27], В.А. Овчарук [28] та ін.

Прогноз змін водних ресурсів для низки річок України в умовах змін клімату виконано у роботах Н.С. Лободи [11]-[19], де встановлені основні тенденції змін водних ресурсів України на основі моделі «клімат-стік» з використанням різних сценаріїв глобального потепління. Так, у роботі [12] Н.С. Лободою у співавторстві з В.П. Дорофієвою досліджено стан водних ресурсів р. Дністер за різними сценаріями глобального потепління. Встановлено, що за сценаріями CCCM, GISS, UKMO очікується зменшення водних ресурсів на 25-26 %, а за сценарієм GFDL – на 22 %.

Також, встановлено, що для річок басейну Дністра в період 2030-2040 рр. зменшення водних ресурсів становитиме – до 33 %, а до 2080 р. сягне – 50 %.

У дослідженні [15] на основі установлених тенденцій змін кліматичних чинників під впливом глобального потепління виявлено тенденції до зменшення водності на р.Тилігул, а саме – річного стоку, витрат середньобогаторічних величин максимального стоку весняного водопілля та дощових паводків. Також, встановлено, що зросла кількість місяців із нульовими значеннями стоку у багатоводні роки.

В оцінках річкового стоку в басейні р. Дунай у XXI сторіччі у роботі [17] встановлено, що за даними моделі REMO для кліматичного сценарію A1B, в період 2031-2070 рр. зменшення водних ресурсів в басейні р. Дунай становитиме – 17,9 %, а в період 2071-2100 рр. – 22,0 %.

В роботі [18] за моделлю REMO та кліматичним сценарієм A1B встановлено, що, в період 2021-2050 рр., внаслідок потепління клімату на річці Великий Куяльник та її притоках не буде вистачати річкового стоку для заповнення побудованих штучних водойм (за виключенням верхньої течії). Результати досліджень авторів [18] підтверджено в роботі [19], де на основі аналізу кліматичних чинників формування стоку, а саме метеорологічних даних (опадів та температур повітря) середньостатистичної моделі (осереднення виконано за 14 моделями сценарію RCP 4.5) та розрахованого середньобогаторічного максимально можливого випаровування у період 2021-2050 рр. встановлено, що очікується зменшення водних ресурсів на річці Великий Куяльник на 25,5 % у порівнянні із їх станом до 1989 р. Слід зазначити, що автором [20] встановлено початок суттєвого впливу змін клімату на водний режим річок України з 1989 року.

У роботі [21] авторами Е.Р. Рахматуліною та В.В. Гребенем виконано оцінку майбутніх тенденцій змін характеристик гідрологічного режиму річок басейну р. Південний Буг в зимовий період. Встановлено, що в період 2031-2050 рр. в басейні річки температура повітря взимку збільшиться на 1,8 °C, а весною – на 0,7 °C. Безумовно, підвищення температури холодного періоду впливатиме і на формування характеристик стоку в період весняного водопілля.

У роботі [22] авторами В.В. Гребенем та К.В. Мудрою виконано аналіз тенденцій зміни температури повітря в басейні Дністра показав, що до 2070 року в басейні очікується зростання температури повітря для всіх місяців року (у порівнянні із контрольним періодом 1971-2000 рр.). Також, авторами [22] виконано аналіз зміни кількості опадів по місяцях. При цьому,

виявлено що в період 2011-2040 рр. відбуватиметься зростання кількості опадів, а в період 2041-2070 рр. – зменшення їх кількості.

При використанні регіональної кліматичної моделі REMO авторами [22] виконано прогноз змін річкового стоку в басейні Дністра. Прогноз, виконаний по 30-ти річним періодам показав, що в першому періоді 2011-2040 рр. на р. Дністер відбудеться зменшення стоку, в середньому по басейну, на 10,1%, а в період 2041-2070 рр. на 16,7 %.

Оцінкою можливих змін водних ресурсів в Україні в XXI столітті присвячено низку робіт автора С.І. Сніжка у співавторстві [23]-[26].

Так, у роботі авторами [26] з використанням регіональної моделі REMO виконано оцінку можливих змін водного стоку на території України в XXI столітті. При цьому, встановлено, що в період 2021-2040 рр. водність більшості рівнинних річок буде вище їх середньобаторічних величин, а в період 2041-2060 рр. – водність прогнозується нижче середньобаторічних величин (за винятком р. Лугань та р. Сіверський Донець). Значне зменшення стоку очікується на р. Південний Буг та р. Рось для двох досліджуваних періодів, а для р. Самари – можливе повне припинення стоку.

За дослідженнями Л.О. Горбачової у роботі [27] встановлено, що очікувані можливі майбутні зміни середньорічного стоку води річок України на середину XXI століття за даними 4 РКМ (REMO, RCA3-E, RCA3-B, RRCM) за сценарієм A1B (по відношенню до базового періоду 1991-2010 рр.) найімовірніше будуть знаходитися в межах природних коливань водності.

У роботі В.А. Овчарук [28] вперше запропоновано врахування можливих змін клімату при визначенні величин максимального стоку рівнинних річок України заданої ймовірності перевищення (за модифікованою операторною моделлю формування стоку [28]-[30]) при введенні коефіцієнту змін клімату $k_{зм}$. Так, автором [28] встановлено, що за різними моделями та сценаріями (четвертої та п'ятої «оціночної» доповідей IPCC) до 2050 р. прогнозується зменшення стоку весняного водопілля 1 %-ої ймовірності перевищення ($P=1\%$) до 20-30 % на півночі й до 50-60 % на півдні (відносно 2010 р.). При цьому, для басейну р. Південний Буг за сценарієм RCP4.5 в період 2011-2039 рр. зменшення максимального річкового стоку весняного періоду становитиме до 50 %, а в період 2040-2050 рр. – до 55%. За сценарієм RCP8.5 в період 2011-2039 рр. таке зменшення стоку буде на рівні 40 %, а в період 2040-2050 рр. – досягне 60 %.

За виконаним аналізом можливих змін водності річок України у XXI ст. за різними моделями та сценаріями глобального потепління можна дійти висновку, що переважна більшість досліджень вказує на зменшення стоку рівнинних річок України. Метою даного розділу є виявлення впливу

кліматичних змін на характеристики стоку весняного водопілля шляхом визначення кліматичних поправок до їх середньобагаторічних величин, що є базовими в регіональній методиці довгострокового прогнозування шарів стоку та максимальних витрат води весняного водопілля в басейні р. Південний Буг, при використанні сценарію змін клімату RCP 4.5 п'ятої «оціночної» доповіді IPCC [1].

5.3 Можливість врахування змін клімату в методиці довгострокових прогнозів характеристик весняного водопілля в басейні р. Південний Буг

5.3.1 Методичний підхід щодо врахування впливу змін клімату на стік весняного водопілля

В умовах сучасних коливань клімату та наявності, у зв'язку з цим, часових тенденцій до зменшення як шарів стоку (об'ємів), так і максимальних витрат води весняних водопіль рівнинних річок України (у т.ч. в басейні р. Південний Буг (розд.1, підрозд. 1.7) [31] важливим питанням є оцінка їх величин на довготривалий період у майбутньому.

Так, автором В.А. Овчарук в роботі [28] застосовано науково-методичний підхід для врахування змін клімату при розрахунках величин модулів максимального стоку весняного водопілля 1 %-ої ймовірності перевищення ($P=1\%$) для річок рівнинної території України за операторною моделлю формування стоку (4.12), яка представлена в [28], [29] у її модифікованому варіанті

$$q_m = q'_m \psi(t_p / T_0) \varepsilon_F \cdot \delta \cdot \lambda_P \cdot k_{зм}, \quad (5.1)$$

де q_m – модуль максимального стоку весняного водопілля, $\text{м}^3/(\text{с} \cdot \text{км}^2)$;
 q'_m – модуль схилового припливу, $\text{м}^3/(\text{с} \cdot \text{км}^2)$;
 $\psi(t_p / T_0)$ – трансформаційна функція розпластування повеневих хвиль під впливом руслового добігання;
 ε_F – коефіцієнт русло-заплавного регулювання;
 δ – коефіцієнт трансформації водопіль під впливом озер і водосховищ руслового типу;
 λ_P – коефіцієнт переходу від опорної 1 %-ої ймовірності перевищення до будь-якої іншої;
 $k_{зм}$ – коефіцієнт змін клімату.

Тобто, для врахування змін клімату при розрахунку максимальних витрат води весняних водопіль 1 %-ої ймовірності перевищення в роботах [28], [29] запропоновано введення до (5.1) коефіцієнту змін клімату $k_{зм}$, визначення якого обґрунтовано раніше авторами у роботі [30].

Приймаючи в якості вхідних даних при розрахунку модуля схилового припливу q'_m в (5.1) за (4.15) метеорологічні характеристики – максимальні снігозапаси та сума опадів за період весняного водопілля, визначення коефіцієнту $k_{зм}$ здійснювалося автором [28] при використанні як спостережених, так і отриманих за даними кліматичних сценаріїв метеорологічних величин (снігозапасів та опадів) та коефіцієнту стоку у вигляді

$$k_{зм} = \frac{[(\overline{S_m} + \sum \overline{X}) \cdot \eta]_{прогн.}}{[(\overline{S_m} + \sum \overline{X}) \cdot \eta]_{сучасн.}}, \quad (5.2)$$

де $\overline{S_m}$ – середньобаторічні максимальні снігозапаси запаси весняного водопілля, мм;

$\sum \overline{X}$ – сума опадів періоду весняного водопілля, мм;

η – коефіцієнт стоку весняного водопілля;

$[(\overline{S_m} + \sum \overline{X}) \cdot \eta]_{прогн.}$ – прогнози за кліматичними сценаріями значення максимальних запасів води в сніговому покриві, опадів періоду весняного водопілля та коефіцієнту стоку весняного водопілля;

$[(\overline{S_m} + \sum \overline{X}) \cdot \eta]_{сучасн.}$ – сучасні значення максимальних запасів води в сніговому покриві перед початком весняного водопілля, опадів періоду весняного водопілля та коефіцієнту стоку весняного водопілля (в редакції автора [28]).

В даній роботі при визначенні базових параметрів регіональної методики довгострокових прогнозів характеристик стоку весняного водопілля в басейні р. Південний Буг – середньобаторічних шарів стоку та максимальних витрат весняного водопілля для врахування можливих впливів змін клімату на середньобаторічний максимальний стік річок, враховуючи досвід [28], пропонується використання коефіцієнту змін клімату $k_{зм}$.

Для визначення такого коефіцієнту автори запропонували, аналогічно формулі (5.2), розраховувати $k_{зм}$ за середньобаторічними метеорологічними чинниками весняного водопілля річок – максимальними

снігозапасами перед початком весняного водопілля, опадами періоду водопілля та коефіцієнтами стоку, що отримуються за спостереженими та сценарними даними. При цьому, автором даної роботи пропонується формула вигляду [35]

$$k_{зм} = \frac{[(S_0 + X_{10} + X_{20}) \cdot \eta_0]_{\text{сценарн.}}}{[(S_0 + X_{10} + X_{20}) \cdot \eta_0]_{\text{спостер.}}}, \quad (5.3)$$

де $[(S_0 + X_{10} + X_{20}) \cdot \eta_0]_{\text{сценарн.}}$ – середньобаторічні величини максимальних запасів води в сніговому покриві перед початком весняного водопілля, опадів періоду весняного водопілля та коефіцієнту стоку весняного водопілля встановлені за даними кліматичних сценаріїв;

$[(S_0 + X_{10} + X_{20}) \cdot \eta_0]_{\text{спостер.}}$ – середньобаторічні величини максимальних запасів води в сніговому покриві перед початком весняного водопілля, опадів періоду весняного водопілля та коефіцієнту стоку весняного водопілля встановлені за даними багаторічних спостережень.

У формулі (5.3) середньобаторічні (станом на 2015 р.) максимальні запаси води в сніговому покриві S_0 отримані за даними спостережень і статистичної обробки та узагальнені у вигляді картосхеми розподілу їх величин по території басейну р. Південний Буг, представленої на рис. 3.2 (в п. 3.3.2). Опади періоду водопілля встановлені, як сума опадів періоду танення снігу X_{10} та періоду спаду весняного водопілля X_{20} за результатами спостережень і статистичної обробки та узагальнені у вигляді регіональних рівнянь (4.16) та (4.17) (в п. 4.2.2.1). Середньобаторічні величини коефіцієнтів весняного стоку η_0 визначені за даними гідрометеорологічної мережі спостережень (снігозапасів і опадів та шарів стоку) та узагальнені у вигляді картосхеми розподілу цих величин по території басейну р. Південний Буг (рис. 4.2) (в п. 4.2.2.1).

По сценарним даним визначення середньобаторічних чинників весняного водопілля (максимальних снігозапасів S_0 і опадів $(X_{10} + X_{20})$ та встановлення коефіцієнту стоку η_0 в басейні р. Південний Буг виконано за даними низки кліматичних моделей сценарію RCP 4.5 глобальних змін клімату (в період 2021-2050 рр.), що представлено у наступному пункті розділу.

За таких умов, одержання прогностичних стокових величин за регіональною методикою довгострокових прогнозів характеристик

весняного водопілля в басейні р. Південний Буг (розд. 3), у тому числі невивчених в гідрологічному відношенні (розд. 4), буде здійснюватися за формулою (3.18) з урахуванням коефіцієнту змін клімату $k_{зм}$ до середньобогаторічних шарів стоку весняного водопілля (Y_0 , мм) у вигляді

$$Y_m = k_Y \cdot Y_0 \cdot k_{зм}, \quad (5.4)$$

де k_Y – спрогнозовані за регіональною методикою модульні коефіцієнти шарів стоку весняного водопілля;

та за формулою (3.20) до середньобогаторічних максимальних витрат води весняного водопілля (модулів стоку q_0 , м³/(с·км²)) у вигляді

$$Q_m = k_Q \cdot q_0 \cdot F \cdot k_{зм}, \quad (5.5)$$

де k_Q – спрогнозовані за методикою модульні коефіцієнти максимальних витрат води весняного водопілля;

F – площі річкових водозборів, км².

Слід зазначити, що в формулах (5.4) та (5.5) середньобогаторічні величини шарів стоку та максимальних витрат води весняного водопілля визначені за статистичною обробкою часових рядів спостережень (станом на 2015 р.). Для невивчених у гідрологічному відношенні річок території визначення цих характеристик обґрунтовано у розділі 4, а саме величин середньобогаторічних модулів стоку q_0 за операторною моделлю (4.12), а при визначенні шарів стоку весняного водопілля Y_0 – за (4.14).

5.3.2 Визначення середньобогаторічних максимальних снігозапасів, опадів весняного водопілля та коефіцієнту стоку в басейні р. Південний Буг за кліматичними моделями сценарію RCP 4.5

Виходячи з доступності даних глобальних і регіональних кліматичних моделей в дослідженні були використані дані проєкту CORDEX (<https://cordex.org/>), які запозичено з відкритого порталу Climate4impact[33] на якому містяться дані для території Європи – проєкт EURO-CORDEX. Проєкт EURO-CORDEX є підпроєктом Всесвітньої кліматичної програми ВМО та містить дані близько 30 наукових інститутів.

За даними проєкту EURO-CORDEX було обрано 10 кліматичних моделей п'яти європейських інститутів (табл. 5.1) сценарію RCP 4.5, прив'язані до 10 метеорологічних станцій, рівномірно розташованих по території басейну р. Південний Буг та двох метеорологічних станцій в басейнах річок між Дністром та Південним Бугом. Таким чином всього для встановлення коефіцієнту змін клімату $k_{зм}$ залучено 12 метеорологічних станцій. Кліматичні моделі проєкту EURO-CORDEX надають різноманітні щоденні сценарні метеорологічні дані, з яких в роботі прийняті – температури повітря, опади та дані по снігу (за період 2021-2050 pp.).

Таблиця 5.1 – Кліматичні моделі проєкту EURO-CORDEX

№ з/п	Назва моделі	Інститут-розробник
1.	DMI	Danish Meteorological Institute (DMI), https://www.dmi.dk/ , Данія
2.	KNMI1	The Royal Netherlands Meteorological Institute (KNMI), https://www.knmi.nl/ , Нідерланди
3.	SMHI1	Swedish Meteorological and Hydrological Institute (SMHI), http://www.smhi.se/ , Швеція
4.	SMHI5	
5.	SMHI21	
6.	MPI-CSC1	Max Planck Institute for Meteorology (MPI), https://www.mpimet.mpg.de/ , Німеччина
7.	MPI-CSC2	
8.	CLMcom1	Climate Limited-area Modelling Community (CLM-Community), (CLMcom), https://wiki.coast.hzg.de/clmcom , Німеччина
9.	CLMcom2	
10.	CLMcom4	

Для визначення у рівнянні (5.3) сценарних середньобогаторічних максимальних снігозапасів, опадів та коефіцієнту стоку весняного водопілля прийнятий такий методичний прийом.

Щодо визначення середньобогаторічних максимальних снігозапасів, які накопичилися на басейні перед початком весняного водопілля за сценарними даними, то дана задача доволі складна, оскільки навіть за наявності в кліматичних моделях щоденних величин по снігу, одержання їх максимальних величин, що накопичилися до початку весняного водопілля не

може бути здійснено тому, що потребує наявної інформації про дати проходження весняного водопілля кожного року сценарного періоду.

В такому разі, були проаналізовані залежності середньобагаторічних максимальних запасів води в сніговому покриві S від середнього значення середньомісячних температур повітря (грудень-лютий) $\bar{T}_{XII-II}$, $^{\circ}\text{C}$ та сум річних опадів X , мм. Такі залежності були побудовані за даними метеорологічних спостережень багаторічного періоду (1966-2015 рр.) та встановлені рівняння вигляду

$$S_0 = 28 - 6,9\bar{T}_{XII-II}, \text{ при } r=0,82; \quad (5.6)$$

$$S_0 = 0,16 \cdot X, \text{ при } r=0,75, \quad (5.7)$$

які оцінюються значущими коефіцієнтами кореляції [34]. Опираючись на тісніший зв'язок максимальних запасів води в сніговому покриві з середнім значенням середньомісячних температур повітря (грудень-лютий) $\bar{T}_{XII-II}$ для визначення S_0 за даними кліматичних моделей була прийнята залежність (5.6).

Аналогічно, для встановлення середньобагаторічних коефіцієнтів стоку весняного водопілля η_0 за сценарними даними були проаналізовані їх залежності від середньорічних температур повітря $\bar{T}$ та сум річних опадів X

$$\eta_0 = 0,76 - 0,07 \cdot \bar{T}, \text{ при } r=0,80; \quad (5.8)$$

$$\eta_0 = 0,0003X, \text{ при } r=0,61. \quad (5.9)$$

Найбільш тісний зв'язок середньобагаторічних коефіцієнтів стоку весняного водопілля η_0 отриманий з середньорічними температурами повітря $\bar{T}$ у вигляді (5.8). Тому, розрахунок величин η_0 відбувався при використанні середньорічних температур повітря $\bar{T}$, розрахованих за даними кліматичних моделей.

Середньорічні температури повітря $\bar{T}$ та середні значення середньомісячних температур повітря (грудень-лютий) $\bar{T}_{XII-II}$ були встановлені по 10-ти обраним моделям (табл. 5.1) сценарію RCP 4.5, використовуючи при цьому дані їх щоденних величин. Суміщені хронологічні графіки

середньорічних температур повітря $\overline{T}$ за окремими моделями представлені на рис. 5.2 (на прикладі метеорологічної станції м. Хмельницький, за період 2021-2050 рр.). Як видно з рис. 5.2, окремі моделі показують значні розбіжності в змодельованих середньорічних температурах повітря.

Оскільки кожній з моделей окремо властиві систематичні помилки, найвищу успішність відтворення середніх метеорологічних характеристик показує результат усереднення за ансамблем кліматичних моделей [19]. Тому, в роботі розраховані величини середньорічних температур повітря за середньостатистичною моделлю (за осередненими даними обраних 10 моделей), хронологічний хід яких для метеорологічної станції м. Хмельницький показаний на рис. 5.2.

Для всіх прийнятих в розрахунок 12 метеорологічних станцій в басейні р. Південний Буг (за період 2021-2050 рр.) хід середньорічних температур повітря, визначених по середньостатистичній моделі представлений на рис. 5.3, значення яких змінюються по території в залежності від географічного положення метеорологічних станцій.

При цьому, слід зазначити, що на розглядуваній території спостерігається тенденція до підвищення середньорічних температур повітря, при значущому коефіцієнті кореляції – $r=0,44$ для м. Хмельницький (рис. 5.2) та $r=0,45$ в середньому по 12-ти метеорологічним станціям (рис. 5.3). Визначення середньобагаторічних опадів періоду танення снігу X_{10} та спаду весняного водопілля X_{20} у формулі (5.3) здійснювався за даними кліматичних моделей наступним чином. Аналізуючи середньобагаторічні строки весняних водопіль в басейні р. Південний Буг встановлено, що опади X_{10} припадають переважно на березень місяць, а опади X_{20} – на квітень.

В такому разі, при визначенні сценарних величин опадів періоду весняного водопілля ($X_{10} + X_{20}$), прийнята сума опадів березня та квітня місяців.

За даними щоденних опадів по 10-ти обраним моделям сценарію RCP 4.5 були встановлені суми опадів періоду весняного водопілля (березня та квітня місяців), а також розраховані їх величини за середньостатистичною моделлю для кожної з 12-ти метеорологічних станцій.

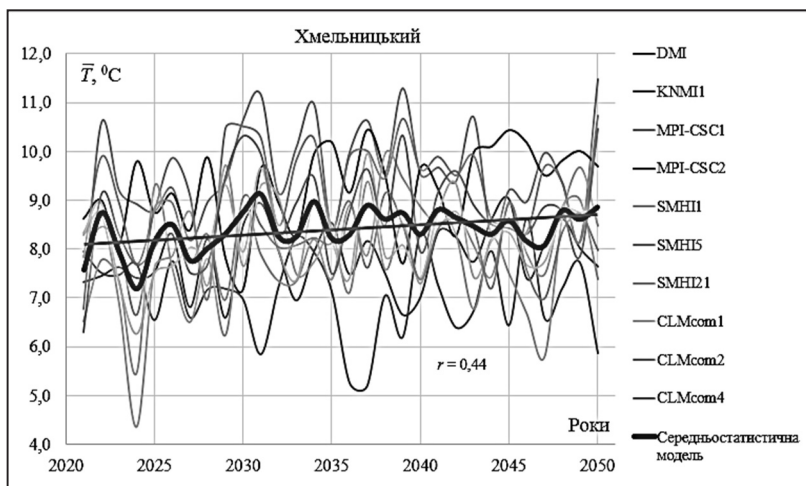


Рисунок 5.2 – Суміщені хронологічні графіки середньорічних температур повітря за окремими моделями та їх величини за середньостатистичною моделлю для метеорологічної станції м. Хмельницький (за період 2021-2050 рр.).

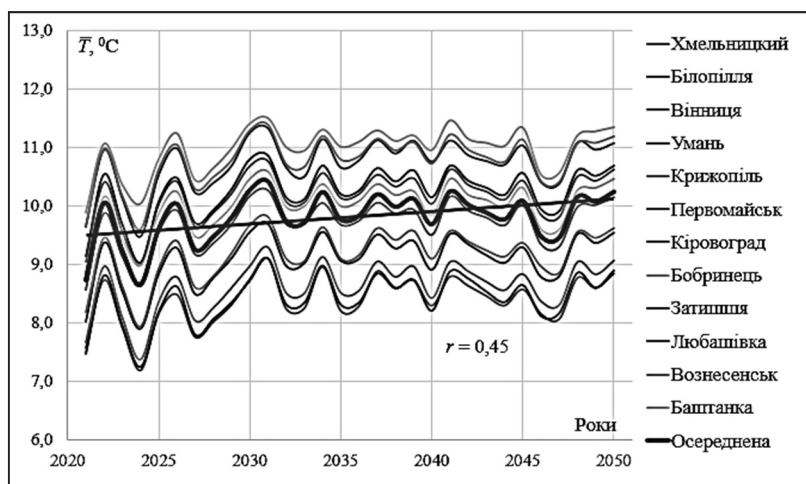


Рисунок 5.3 – Суміщені хронологічні графіки середньорічних температур повітря за середньостатистичною моделлю по метеорологічним станціям в басейні р. Південний Буг (у період 2021-2050 рр.)

Для метеорологічної станції м. Хмельницький суміщені хронологічні графіки сум опадів періоду весняного водопілля за окремими моделями та їх величини за середньостатистичною моделлю представлені на рис. 5.4 (за період 2021-2050 рр.).

Розраховані суми опадів періоду весняного водопілля (березень-квітень) за середньостатистичною моделлю для 12 метеорологічних станцій (за період 2021-2050 рр.) показані на рис. 5.5. При цьому спостерігається часова періодичність їх величин в період 2021-2050 рр., при не значущому коефіцієнті кореляції – $r=0,01$ для м. Хмельницький (рис. 5.4) та за середньостатистичною моделлю по 12-ти метеорологічним станціям в басейні р. Південний Буг при $r=0,15$ (рис. 5.5).

5.4 Виявлення впливу кліматичних змін на характеристики стоку весняного водопілля в басейні р. Південний Буг

Виявлення впливу кліматичних змін на характеристики стоку весняного водопілля виконано шляхом введення кліматичних поправок (коефіцієнтів змін клімату $k_{зм}$) до їх середньобаторічних величин, що є базовими в регіональній методиці довгострокового прогнозування шарів стоку та максимальних витрат води весняного водопілля в басейні р. Південний Буг, у формулах (5.4) та (5.5).

Для розрахунку коефіцієнтів змін клімату $k_{зм}$ автором запропонована формула (5.3), методика визначення всіх складових якої представлено у підрозд. 5.2. Тобто, у формулі (5.3) значення максимальних запасів води в сніговому покриві перед початком весняного водопілля, опадів періоду весняного водопілля та коефіцієнту стоку весняного водопілля в басейні р. Південний Буг встановлені за даними спостережень (для метеорологічних станцій) (станом на 2015 р.). наступним чином:

1) середньобаторічні максимальні запаси води в сніговому покриві S_0 – за даними статистичної обробки їх часових рядів або з картосхеми розподілу по території (рис. 3.2);

2) середньобаторічні опади періоду весняного водопілля X_{10} та X_{20} – за рівняннями (4.16), (4.17) (п. 4.2.2.1);

3) коефіцієнти стоку весняного водопілля η_0 – з картосхеми їх розподілу по території (рис. 4.2).

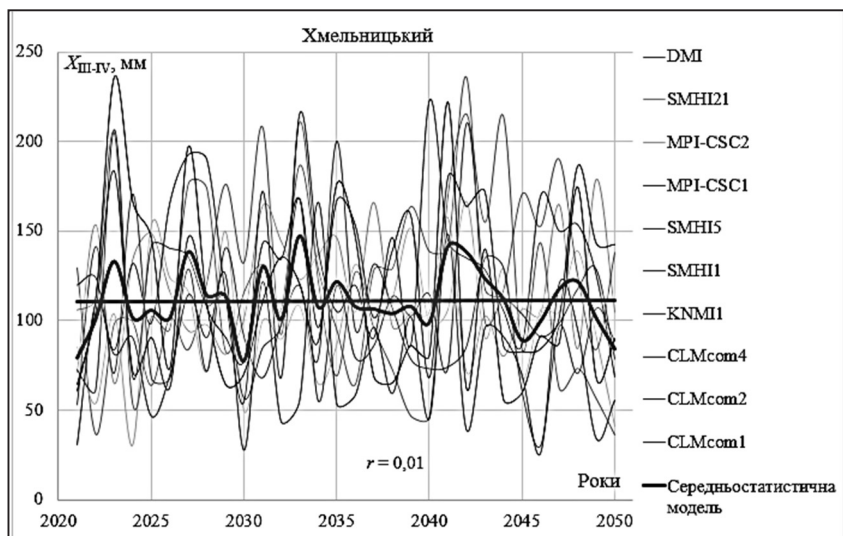


Рисунок 5.4 – Суміщені хронологічні графіки сум опадів періоду весняного водопілля за окремими моделями та їх величини за середньостатистичною моделлю для метеорологічної станції м. Хмельницький (за період 2021-2050 рр.)

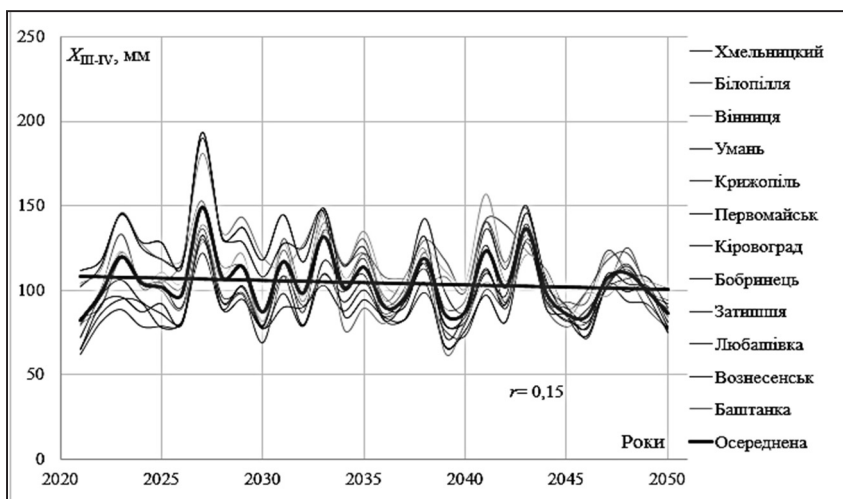


Рисунок 5.5 – Суміщені хронологічні графіки сум опадів періоду весняного водопілля (березень-квітень) за середньостатистичною моделлю по метеорологічним станціям в басейні р. Південний Буг (у період 2021-2050 рр.)

Значення середньобаторічних максимальних запасів води в сніговому покриві, опадів періоду весняного водопілля та коефіцієнту стоку весняного водопілля встановлені за середньостатистичною моделлю (по 10-ти обраним моделям) сценарію RCP 4.5 (в період 2021-2050 рр.). наступним чином:

1) середньобаторічні максимальні запаси води в сніговому покриві S_0 – за рівнянням (5.6);

2) середньобаторічні коефіцієнти стоку весняного водопілля η_0 – за рівнянням (5.9).

3) сума середньобаторічних опадів періоду весняного водопілля – як сума опадів за березень-квітень (рис. 5.5).

В такому разі для 12 метеорологічних станцій басейну р. Південний Буг за формулою (5.3) визначені коефіцієнти змін клімату $k_{зм}$ для періоду 2021-2050 рр. Аналіз розрахованих значень коефіцієнтів змін клімату $k_{зм}$ до середньобаторічних характеристик максимального стоку весняного водопілля дав змогу осереднити їх величини за 30-річний період в межах встановлених однорідних за умовами формування весняних водопіль річок районів (підрайонів) басейну р. Південний Буг.

Отримані результати показали, що в басейні р. Південний Буг в районі I у період 2021-2050 рр. середнє значення $k_{зм}$ становитиме в середньому 0,77, а в районі II: підрайоні Па – 0,63, підрайоні Пб – 0,49, підрайоні Пв – 0,25 (рис. 5.6).

У відсотковому відношенні, в районі I басейну р. Південний Буг у період 2021-2050 рр. очікується зменшення середньобаторічних величин характеристик стоку (шарів стоку та максимальних витрат води) весняного водопілля в середньому по району на 23 %, а в районі II: підрайоні Па – 37 %, підрайоні Пб – 51 %, підрайоні Пв – 75 %.

При цьому, за дослідженнями В.А. Овчарук [28] встановлено, що максимальний стік весняного водопілля 1 %-ої ймовірності перевищення в басейні р. Південний Буг на кінець 2050 р. (за сценарієм RCP 4.5) буде зменшуватися на величину від 20 % на півночі й до 50 % – на півдні водозбору.

В загалі ж, для річного стоку, за дослідженнями Н.С. Лободи [19] за даними сценарію RCP 4.5 показано, що в басейні р. Великий Куяльник його величини зменшаться на 25,5 % до 2050 р. В роботах [9], [10] встановлено, що за сценарієм А1В зменшення річного стоку на річках півдня України (в межах Одеської області) внаслідок змін клімату становитиме 50 % у 2011-2030 рр. та досягне 70 % – у 2031-2050 рр.



Рисунок 5.6 – Середні значення коефіцієнтів змін клімату $k_{зм}$ до середньобаторічних характеристик максимального стоку весняного водопілля (в період 2021-2050 рр.) в межах районування басейну р. Південний Буг за умовами формування весняних водопіль річок

За дослідженнями С.І.Сніжка [26] також вказується зменшення середньорічного стоку в басейні р. Південний Буг (в розрахункові періоди 2021-2040 рр., 2041-2060 рр. та 2061-2080 рр.) в порівнянні з їх середньобаторічними значеннями.

5.5 Оцінка умов формування весняного водопілля у майбутньому в період 2021-2050 рр.

В роботі з метою оцінки умов формування весняного водопілля у майбутньому (в період 2021-2050 рр.) побудовано графіки ходу температур повітря холодного періоду (грудень-лютий) за середньостатистичною моделлю (по 10-ти обраним моделям) сценарію RCP 4.5 на метеорологічних станціях в басейні р. Південний Буг (рис. 5.8).

Аналізуючи рис. 5.8 можна дійти висновку, що на досліджуваній території у зимовий період (грудень-лютий) впродовж 2021-2050 рр. на переважній більшості метеорологічних станцій будуть спостерігатися від'ємні температури повітря, що створюватимуть (за наявності опадів) сприятливі умови снігонакопичення та промерзання ґрунтів та відповідно – формування весняного водопілля на річках. Але слід зазначити, що на метеорологічних станціях розташованих у південній частині водозбору (Баштанка, Вознесенськ, Затишшя) температури повітря зимових місяців будуть переважно близькими або на рівні додатних значень. Так, від'ємні значення середньомісячних температур повітря (грудень-лютий) на даних метеорологічних станціях будуть спостерігатися лише в окремі роки (2021, 2024-2028, 2040, 2041, 2043, 2044-2047).

Дані висновки підтверджуються дослідженнями авторів роботи [19], в якій встановлено, що на метеорологічних станціях, які знаходяться в басейнах річок між Дністром та Південним Бугом прогнозовані за кліматичними сценаріями середні температури повітря за період, який охоплює зиму і перший місяць весни (з грудня по березень) в основному є додатними, а у 2024, 2027, 2040, 2041 рр. будуть знаходитися в області від'ємних значень. При цьому, в даній роботі досліджено й часовий хід сум опадів зимового періоду (грудень-лютий) в період 2021-2028 рр., який свідчить, про їх деякі коливання в розглядуваний період (рис. 5.9).

Враховуючи вище викладене можна констатувати, що формування весняних водопіль в басейні р. Південний Буг можливо майже кожного року майбутнього 30-ти річного періоду (особливо в північній частині (район І) і центральній (район ІІ, підрайон ІІа), а запропонована автором регіональна методика довгострокового прогнозу характеристик стоку весняного водопілля річок дає змогу за метеорологічними чинниками весняного стоку моделювати шари стоку та максимальні витрати води водопіль для річок розглядуваної території у всьому діапазоні водозбірних площ і географічної приналежності річки до виділених однорідних за умовами формування весняного стоку районів (підрайонів).

Тож, виходячи з наявності даних кліматичних моделей сценарію RCP 4.5 (температур повітря та опадів) є можливість випуску прогнозу стоку весняного водопілля за розробленою у розділі 3 методикою довгострокового прогнозування характеристик весняного водопілля в басейні річки Південний Буг.

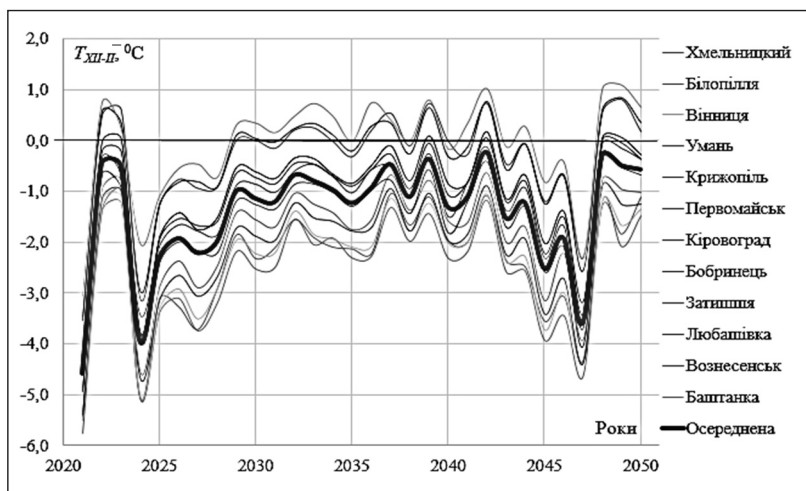


Рисунок 5.8 – Суміщені хронологічні графіки середньомісячних температур повітря (грудень-лютий) за середньостатистичною моделлю по метеорологічним станціям в басейні р. Південний Буг (у період 2021-2050 рр.)

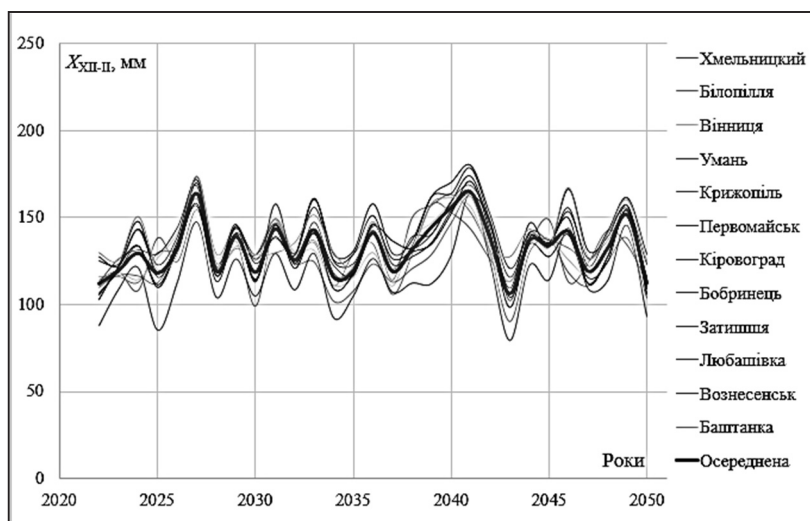


Рисунок 5.9 – Суміщені хронологічні графіки сум опадів зимового періоду (грудень-лютий) за середньостатистичною моделлю по метеорологічним станціям в басейні р. Південний Буг (у період 2021-2050 рр.)

При цьому, основні чинники, які входять до дискримінантної функції у рівнянні (3.16) визначені за сценарними даними – середньої температури повітря зимового періоду (грудень-лютий) $\bar{T}_{XII-II}$. Максимальні запаси води в сніговому покриві визначені за (5.6), максимальні глибини промерзання ґрунтів за рівнянням виду

$$L_m = 31 - 7,7 \bar{T}_{XII-II}, \text{ при } r = 0,82. \quad (5.10)$$

Опади періоду танення снігу X_{10} прийняті як опади березня місяця за отриманими щоденними сценарними даними.

Хронологічний графік спостережених (1930-2015 рр.) та змодельованих (прогнозних за період з 2021-2050 рр.), при використанні даних середньостатистичної кліматичної моделі сценарію RCP 4.5 шарів весняного стоку за регіональною методикою довгострокових прогнозів характеристик весняного водопілля в басейні р. Південний Буг – с. Тростянчик представлений на рис. 5.10.

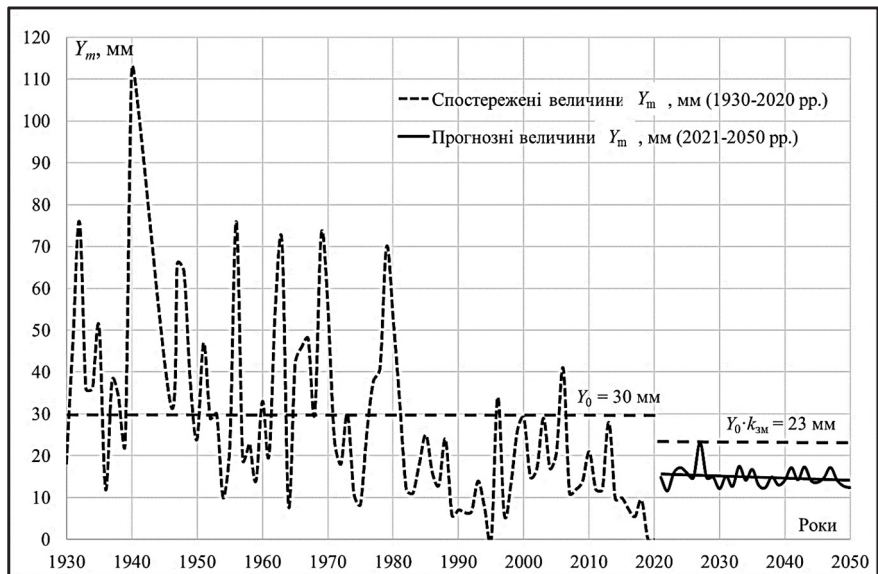


Рисунок 5.10 – Хронологічний графік спостережених та змодельованих (прогнозних) за даними середньостатистичної кліматичної моделі сценарію RCP 4.5 шарів стоку весняного водопілля в басейні р. Південний Буг – с. Тростянчик(район І)

З графіку на рис. 5.10 видно, що в басейні р. Південний Буг – с. Тростянички в цілому спостерігається зменшення шарів стоку весняного водопілля відносно попереднього періоду (1930-2020 рр.).

Шари стоку весняного водопілля в основному очікуються нижчими за середньобогаторічне значення (з урахуванням $k_{зм}$), яке становить 23 мм, при цьому формування катастрофічно високих водопіль не прогнозується.

Таким чином, в запропонованій автором регіональній методиці довгострокових прогнозів характеристик стоку весняного водопілля річок здійснено оцінку впливу майбутніх кліматичних змін (при введенні коефіцієнту $k_{зм}$) до середньобогаторічних характеристик весняного стоку річок, що є базовими параметрами прогнозної методики шарів стоку та максимальних витрат води весняного водопілля в басейні р. Південний Буг. Це дасть можливість довгострокового прогнозування характеристик стоку весняного водопілля річок розглядуваної території за розробленою прогностичною методикою (з встановленими її коефіцієнтами й параметрами) у будь-якому році подальшого періоду за умови виникнення весняного водопілля на них.

ВИСНОВКИ

В результаті дослідження розроблено регіональну методику довгострокового прогнозування характеристик стоку весняного водопілля в басейні р. Південний Буг, що дало змогу створення єдиної методичної бази нормування та прогнозування гідрологічних характеристик весняного стоку (шарів стоку та максимальних витрат води), визначення їх ймовірнісних величин настання в багаторічному розрізі.

В результаті роботи можна зробити також наступні основні висновки.

1. Виконане гідрологічне районування басейну р. Південний Буг за умовами формування весняного водопілля річок при застосуванні методів факторного та кластерного аналізів дозволило виділити два гідрологічні райони з однотипними умовами формування весняних водопіль – район І (до гідрологічного поста р. Південний Буг – с. Тростянчик) та район ІІ (нижче за течією від с. Тростянчик) з підрайонами Іа, Іб, Ів.

2. Дослідження сучасних кліматичних змін та їх впливу на формування весняного водопілля у межах басейну р. Південний Буг показало, що зниження весняного стоку річок в останні десятиліття викликане змінами клімату у зв'язку з підвищенням температури повітря холодного періоду, відсутністю стійкого снігового покриву та суттєвим зменшенням глибин промерзання ґрунтів (в період з 1989 р.); спостерігається тенденція до зміщення строків настання як максимальних снігозапасів, так і весняних водопіль до більш ранніх дат. Часові ряди максимальних витрати води та шарів стоку весняного водопілля за циклічністю коливань є синхронними, а з кінця 80-х рр. минулого сторіччя до 2015 р. на річках спостерігається маловодна фаза. Вплив зарегульованості річкового стоку на максимальний стік весняного водопілля виявлений не суттєвим.

3. Виконано розробку, оцінку та реалізацію регіональної методики довгострокового прогнозування характеристик (шарів стоку та максимальних витрат води) весняного водопілля в басейні р. Південний Буг. Розрахунковий період (для 14 опорних гідрологічних постів) обумовлений наявністю спільних рядів спостережень за стоковими характеристиками, метеорологічними та агрометеорологічними чинниками весняного водопілля (за період 1966 р. по 2015 р.). При цьому:

3.1) типізацію водності весняних водопіль здійснено при використанні методу дискримінантного аналізу за сформованим вектор-предиктором, до якого обрані (за методом факторного аналізу) основні фактори формування

весняного стоку річок розглядуваної території – максимальні запаси води в сніговому покриві, опади та максимальна перед водопіллям глибина промерзання ґрунтів; виділено три групи водності (високої, середньої та низької) і отримані коефіцієнти дискримінантних рівнянь для опорних гідрологічних постів в межах однорідних за умовами формування весняного водопілля районів (підрайонів). При цьому, розв'язальним правилом дискримінації угруповань є встановлення максимального значення дискримінантної функції.

По одержаних дискримінантних рівняннях оцінка значущості дискримінації показала, що середні значення обраних груп значимо різняться, тобто доведено наявність дискримінантних особливостей обраних чинників. Перевірка достовірності результатів показала, що похибка розрахунків не перевищує 5%;

3.2) по виділених угрупованнях весняних водопіль за типом їх водності отримані регіональні залежності (у вигляді модульних коефіцієнтів) для річок однорідного району (підрайону) при прогнозуванні шарів стоку чи максимальних витрат води весняного водопілля в басейні р. Південний Буг;

3.3) представлення прогнозних величин та їх прогнозних забезпеченостей у багаторічному розрізі, що встановлені за трипараметричним гама-розподілом С.М. Крицького і М.Ф. Менкеля (при врахуванні визначених автором середніх по району співвідношень коефіцієнтів варіації та асиметрії) здійснюється у картографічній формі, що дає можливість просторового моніторингу розмірів очікуваних весняних водопіль;

3.4) виконана оцінка ефективності методики довгострокових прогнозів шарів стоку та максимальних витрат води весняного водопілля в басейні р. Південний Буг (за період 1966-2015 рр.), показала, що розроблена методика переважно належить до категорії «добра» та «задовільна» (критерій якості методики S/σ для шарів стоку та максимальних витрат води весняного водопілля змінюється в межах від 0,20 до 0,60 з відсотком справджуваності перевірених прогнозів в межах від 76 до 100 %). Завчасність прогнозів характеристик весняного водопілля в басейні р. Південний Буг збільшується зі збільшенням широти геометричних центрів водозборів та коливається для шарів стоку від 46 до 68 діб, а максимальних витрат води – від 21 до 34 діб. Таким чином, виконана оцінка якості методики довгострокових прогнозів (за період 1966-2015 рр.) та її перевірка на даних незалежних років (за період 2016-2018 рр.), показала, що розроблена методика може бути рекомендована для її практичного використання при

випуску оперативних прогнозів в практичній діяльності гідропрогностичних підрозділів.

4. Регіональна методика довгострокових прогнозів характеристик весняного водопілля в басейні р.Південний Буг обґрунтована й для невивчених у гідрологічному відношенні річок досліджуваної території. При цьому, одержання стокових величин здійснюється при визначенні їх середньобагаторічних значень (шарів стоку та максимальних витрат води весняного водопілля).

5. Для визначення середньобагаторічних максимальних витрат води весняного водопілля невивчених у гідрологічному відношенні річок за розрахункову прийнята операторна модель нормування максимального стоку з використанням на її вході основних параметрів – максимальних снігозапасів та опадів періоду весняного водопілля. В рамках операторної моделі визначені та узагальнені всі вхідні параметри розрахункової методики. Похибка розрахунку середньобагаторічних модулів максимальних витрат води весняного водопілля становить $\pm 16,8\%$ та відповідає точності обчислення середньобагаторічних максимальних витрат води ($\pm 18,7\%$), що дозволяє рекомендувати операторну модель для визначення середньобагаторічних величин максимальних витрат води весняного водопілля невивчених у гідрологічному відношенні річок в басейні р. Південний Буг. За визначеними стокоутворюючими характеристиками (максимальними снігозапасами, дощовими опадами та коефіцієнтами стоку) весняного водопілля одержана й інша базова характеристика прогнозу методикою – середньобагаторічні величини шарів стоку весняного водопілля, що дозволяє їх встановити й для річок, невивчених у гідрологічному відношенні.

6. Врахування кліматичних змін на формування весняного водопілля річок здійснено при визначенні коефіцієнту змін клімату $k_{зм}$ до базових параметрів регіональної методики довгострокових прогнозів характеристик стоку весняного водопілля в басейні р. Південний Буг (середньобагаторічних шарів стоку та максимальних витрат весняного водопілля), який розрахований за середньобагаторічними метеорологічними чинниками весняного водопілля річок – максимальними снігозапасами перед початком весняного водопілля, опадами періоду водопілля, коефіцієнтами стоку, що отримані за спостереженнями (станом по 2015 р.) та сценарними даними (за середньостатистичною кліматичною моделлю сценарію RCP 4.5) для 12 метеорологічних станцій басейну р. Південний Буг. Одержані результати показали, що в басейні р. Південний Буг у період 2021-2050 рр. очікується зменшення

середньобагаторічних величин характеристик стоку (шарів стоку та максимальних витрат води) весняного водопілля в середньому по району І на 23 % (при $k_{зм}=0,77$), а в районі ІІ: підрайоні ІІа – на 37 % (при $k_{зм}=0,63$), підрайоні ІІб – на 51 % (при $k_{зм}=0,49$), підрайоні ІІв – на 75 % (при $k_{зм}=0,25$).

7. При моделюванні шарів стоку весняного водопілля в басейні р. Південний Буг – с. Тростянчику майбутньому (період 2021-2050 рр.) встановлено, що в цілому буде спостерігатися зменшення шарів стоку весняного водопілля відносно минулого періоду (1930-2020 рр.). Змодельовані величини шарів стоку очікуються нижчими за їх середньобагаторічне значення (з урахуванням $k_{зм}$), що становить 23 мм. Формування катастрофічно високих водопіль в період 2021-2050 рр. не прогнозується.

8. Запропонована регіональна методика довгострокових прогнозів характеристик весняного водопілля в басейні р. Південний Буг реалізована авторами у вигляді створеного алгоритму розробленого програмного прогностичного комплексу «Південний Буг», який дозволяє автоматизувати та прискорити процес випуску прогнозу весняного водопілля і на даний час використовується в практичній діяльності Гідрометцентру Чорного та Азовського морів (м. Одеса).

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

У РОЗДІЛІ 1

1. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т.6. Украина и Молдавия. Вып.1. Западная Украина и Молдавия / под ред. М.С. Каганера. Ленинград: Гидрометеиздат, 1969. 884 с.
2. Мокін В.Б., Крижановський Є.М., Марушевський Г.Б. Розробка екологічного атласу басейну річки Південний Буг. Вінниця, 2009. 19 с.
3. Водні ресурси та якість річкових вод басейну Південного Бугу; за ред. В.К. Хільчевського. Київ: Ніка-Центр, 2009. 184 с.
4. Ободовський О.Г., Рахматулліна Е.Р., Тимуляк Л.М. Коротка історія розвитку та сучасний стан малої гідроенергетики на рівнинних річках України. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*. 2016. Т. 4. С. 94-106.
5. Енергетична стратегія України на період до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність». Схвалено розпорядженням Кабінету Міністрів України від 18 серпня 2017 р. № 605-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/605-2017-%D1%80> (дата звернення: 19.01.2019 р.).
6. Манукало В.О. Мережа гідрологічних спостережень у басейні річки Південний Буг: історія розвитку, сучасний стан та можливості. *Наук. праці УкрНДГМІ*. 2012. Вип. 263. С.165-181.
7. Докус А.О., Шакірманова Ж.Р. Гідрометеорологічна мережа спостережень та вивченість території у межах річкового басейну Південного Бугу. *Сучасна гідрометеорологія: актуальні проблеми та шляхи їх вирішення*: матеріали III міжнародної наукової конференції молодих вчених, 21-23 березня. Одеса, 2018. С. 89-90.
8. Руководство по гидрологической практике. Сбор и обработка данных, анализ, прогнозирование и другие применения. Всемирная Метеорологическая Организация (ВМО – №168). Пятое изд. 1994. 844 с.
9. Родевич В.М. К вопросу классификации рек. *Изв. ГГИ*. №35. 1931. С. 22-35.
10. Нежиховский Р.А. Русловая сеть бассейна и процесс формирования стока воды. Ленинград: Гидрометеиздат, 1971. 476 с.
11. Швебс Г.І., Ігошин М.І. Каталог річок і водойм України: навчально довідковий посібник. Одеса: Астропринт, 2003. 392 с.

12. Водна Рамкова Директива Європейського Союзу 2000/60/ЄС. Основні терміни та їх визначення. Київ, 2006. 240 с.
13. Водний кодекс України від 06.06.1995 р. № 213/95-ВР // Відом. Верхов. Ради України. 1995. № 24. 189 с.
14. Чеботарев А.И. Гидрологический словарь. Ленинград: Гидрометеиздат, 1978. 308 с.
15. Определение расчётных гидрологических характеристик. СНиП 2.01.14-83. Москва: Гос. комитет СССР по делам строительства, 1983. 97 с.
16. Гідрологія суші. Терміни та визначення основних понять: ДСТУ 3517-97. Київ: Держспоживстандарт України, 1997. 113 с.
17. Гребінь В.В., Хільчевський В.К. Ретроспективний аналіз досліджень річкової мережі України та застосування типології річок водної рамкової директиви ЄС на сучасному етапі. Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія. 2016. Т.2(41). С. 32-47.
18. Огиевский А.В. Гидрология суши. Москва: Сельхозиздат, 1952. 515 с.
19. Методики гідрографічного та водогосподарського районування території України відповідно до вимог Водної Рамкової Директиви Європейського Союзу / В.В. Гребінь, В.Б. Мокін, В.А. Сташук, В.К. Хільчевський, М.В. Яцюк, О.В. Чунарьов, Є.М. Крижановський, В.С. Бабчук, О.Є. Ярошевич. Київ: Інтерпрес ЛТД, 2013. 55 с.
20. Докус А.О. Сучасний стан гідрологічного районування за умовами формування річкового стоку. *Матеріали II-го Всеукраїнського Пленеру з питань природничих наук*. 26-28 липня. Одеса, 2018. С. 63-64.
21. Воскресенский К.П. Норма и изменчивость годового стока рек Советского Союза. Ленинград: Гидрометеиздат, 1962. 550 с.
22. Лобода Н.С. Расчеты и обобщения характеристик годового стока рек Украины в условиях антропогенного влияния. Одесса: Издательство «Астропринт», 2005. 208 с.
23. Мельник С.В., Лобода Н.С. Районирование бассейна Верхнего Днестра по характеру колебаний годового стока на основе кластерного анализа. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2010. № 6. С. 180-189.
24. Сербов Н.Г., Кириак С.Г. Застосування методів багатовимірного статистичного аналізу до гідрологічного районування (на прикладі річок рівнинної території України). *Вісник Одеського державного екологічного університету*. 2010. №9. С. 152-158.
25. Гребінь В.В. Сучасний водний режим річок України (ландшафтно-гідрологічний аналіз). Київ: Ніка-Центр, 2010. 316 с.

26. Горбачова Л.О. Сучасний внутрішньорічний розподіл водного стоку річок України. *Український географічний журнал*. 2015. № 3. С. 16-23.
27. Горбачова Л.О., Христюк Б.Ф. Гідрологічне районування території України за умовами формування річного стоку води на основі кривих Ендрюса. *Український географічний журнал*. 2016. № 3. С. 27-33.
28. Овчарук В.А. Максимальний стік весняного водопілля рівнинних річок України: Монографія. Одеса: Видавничий дім «Гельветика», 2020. 300 с.
29. Чорноморець Ю.О. Районування території Українських Карпат за умовами формування стоку води. *Вісник КНУ ім. Т. Шевченка*. 2005. Вип.51. С. 52-54.
30. Лоули Д., Масквелл А. Факторный анализ как статистический метод. Москва: Мир, 1967. 144 с.
31. Иберла К. Факторный анализ; пер. с англ. Москва: Статистика, 1980. 397 с.
32. Факторный, дискриминантный и кластерный анализ; пер. с англ. / Дж.- О. Ким, Ч.У. Мьюллер, У.Р. Клекка и др. Финансы и статистика, 1989. 215 с.
33. Школьний Є.П., Лосєва І.Д., Гончарова Л.Д. Обробка та аналіз гідрометеорологічної інформації: підручник. Київ: Міносвіти України, 1999. 538 с.
34. Лобода Н.С. Методи статистичного аналізу у гідрологічних розрахунках і прогнозах: навчальний посібник. Одеса: Екологія, 2010. 184 с.
35. Ромакін В.В. Комп'ютерний аналіз даних: навчальний посібник. Миколаїв: Видавництво МДГУ ім. Петра Могили, 2006. 144 с.
36. Дубровская Л.И., Князев Г.Б. Компьютерная обработка естественно-научных данных методами многомерной прикладной статистики: учебное пособие. Томск: ТМЛ-Пресс, 2011. 120 с.
37. Гопченко Е.Д., Шакирзанова Ж.Р. Территориальное долгосрочное прогнозирование максимальных расходов воды весеннего половодья: учебное пособие. Киев: КНТ, 2005. 240 с.
38. Шакирзанова Ж.Р. Довгострокове прогнозування характеристик максимального стоку весняного водопілля рівниннихрічок та естуаріїв територіїУкраїни. Одеса: ФОП Бондаренко М.О., 2015. 252 с.
39. Newell F. H. Results of steams measurements. *XIV Ann. Report of the Un. St. Geological Servey*, 1892-93. p. 2.
40. Докучаев В.В. Учение о зонах природы. Москва: АН СССР, 1948. 63 с.

41. Лебедев П.Н. О нормах стока. *Труды Первого Всероссийского гидрологического съезда*. 1925.
42. Кочерин Д.И. Вопросы инженерной гидрологии. Ленинград: Энергоиздат, 1932. 208 с.
43. Глушков В.Г. Географо-гидрологический метод. *Изв. ГГИ*. 1933. № 57-58. С. 5-10.
44. Зайков Б.Д. Белинков С.Ю. Средний многолетний сток СССР. *Труды ГГИ*. 1937. Вып. 2.
45. Львович М.И. Элементы водного режима рек земного шара. Свердловск. *Труды науч.-исследовательских учреждений ГУ ГМС СССР*. 1945. Серия 4. Вып. 18.
46. Зайков Б.Д. Средний сток и его распределение в году на территории СССР. *Труды НИУ ГУГМС*. 1946. сер.4. Вып. 24. 147 с.
47. Троицкий В. А. Гидрологическое районирование СССР. Москва: Ленинград, 1948.
48. Тихоцкий К. Г. Методы картографирования пространственного распределения среднего стока. *Изв. Забайкальского филиала Географического общества СССР*. 1968. т. 4. Вып. 2.
49. Физико-географический атлас мира. Москва: Академия наук СССР и главное управление геодезии и картографии ГГК СССР, 1964. 298 с.
50. Кузин П.С. Классификация рек и гидрологическое районирование СССР. Ленинград: Гидрометеиздат, 1960. 455 с.
51. Синайская Т.М., Швейкин Ю.В. Асинхронность стока и водные ресурсы основных рек районов орошения УССР. *Труды УкрНИГМИ*. 1971. Вып. 71. С. 124-136.
52. Оценка потерь талых вод и прогнозы объема стока половодья/ Вершинина Л.К., О.И. Крестовский, Калужный И.Л., Павлова К.К. Ленинград: Гидрометеиздат, 1985. 189 с.
53. Христофоров А.В. Надежность расчетов речного стока. Москва: Издательство МГУ, 1993. 168 с.
54. Ободовский А.Г. Руслоформирующие расходы воды рек равнинной части Украины: диссертация на соискание ученой степени кандидата географических наук: 11.00.07 / МГУ им. М. В. Ломоносова. Геогр. фак. Киев, 1987. 195 с.
55. Боровиков В. STATISTICA. Искусство анализа данных на компьютере: Для профессионалов. 2-е изд. (+CD). Санкт-Петербург: Питер, 2003. 688 с.

56. Докус А.О. Районування басейну Південного Бугу за умовами формування весняного водопіллярічок. *Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Рельєф, клімат та поверхневі води як об'єкти природничо-географічних досліджень (до 70-річчя кафедр землезнавства та геоморфології, метеорології та кліматології, гідрології та гідроекології)»*. 2-4 жовтня. Київ, 2019. С. 42-44.

57. Географические карты Украины. URL: <http://geomap.land.kiev.ua> (дата звернення: 11.01.2018).

58. Атлас України. Інститут географії Національної академії наук України, 1999-2000. URL: <https://atlas.igu.org.ua> (дата звернення: 11.01.2018).

59. Атлас: географія України [CD-розробок]. Інститут передових технологій, 2004.

60. План управління річковим басейном Південного Бугу: аналіз стану та першочергові заходи; за ред. С. Афанасьєва, А. Петерс, В. Шашука та О. Ярошевича. Київ: Видавництво ТОВ «НВП «Інтерсервіс», 2014. 188 с.

61. Клімат України; за ред. В.М. Ліпінського, В.А. Дячука, В.М. Бабіченко. Київ: Вид. Раєвського, 2003. 343 с.

62. Мартазінова В.Ф., Свердлик Т.А. Зміни великомасштабної атмосферної циркуляції повітря протягом ХХ ст. та її вплив на погодні умови і регіональну циркуляцію повітря в Україні. *Український географічний журнал*. 2001. №2. С. 28-34.

63. Клімат України: у минулому... і майбутньому; за ред. М.І. Кульбіди, М.Б. Барабаш. Київ: Вид-во Сталь, 2009. 234 с.

64. Агрокліматичний довідник по території України; за ред. Т.І. Адаменко, М.І. Кульбіди, А.Л. Прокопенка. Кам'янець-Подільський: ПП Галагодза Р.С., 2011. 108 с.

65. Агрокліматичний довідник по Вінницькій області (1986 – 2005 рр.); за ред. Т.І. Адаменко. Вінниця, 2011. 185 с.

66. Агрокліматичний довідник по Миколаївській області (1986 – 2005 рр.); за ред. Л.М. Дуранік, Т.І. Адаменко. Миколаїв, 2011. 190 с.

67. Агрокліматичний довідник по Одеській області: (1986-2005 рр.) / Міністерство надзвичайних ситуацій України; Гідрометеорологічний центр Чорного та Азовського морів; за ред. В.М. Ситова, Т.І. Адаменко. Одеса: Астропрінт, 2011. 204 с.

68. Український гідрометеорологічний центр Державної служби України з надзвичайних ситуацій (УкргМЦ). URL: <https://meteo.gov.ua> (дата звернення: 07.04.2019).

69. Настання весняного сезону в Україні (перехід середньої добової температури повітря через 0°C) в умовах сучасного клімату / Бабіченко В.М., Ніколаєва Н.В., Рудішина С.Ф. та ін. *Український географічний журнал*. 2009. №1. С. 25-35.

70. Шакірзанова Ж.Р., Казакова А.О. Гідрометеорологічні чинники і характеристики весняних водопіль в басейні р. Південний Буг в сучасних кліматичних умовах. *Вісник Одеського державного екологічного університету*. 2015. Вип. 20. С. 100-107.

71. Казакова А.О. Основні гідрометеорологічні чинники весняного водопілля в басейні р. Південний Буг в сучасних кліматичних умовах. *Матеріали XV наукової конференції молодих вчених*. Одеса, 2016. С. 69-70.

72. Кіптенко Є.М., Козленко Т.В. Вологість повітря в басейні Південного Буга в умовах сучасного клімату. *Тези доповідей I Всеукр. гідрометеорологічного з'їзду з міжнародною участю, 22-23 березня*. Одеса: ТЕС, 2017. С. 204-205.

73. Константинов А.Р. Испарение в природе. Ленинград: Гидрометиздат, 1968. 532 с.

74. Крестовский О.И., Постников А.Н., Сергеева А.Г. Оценка испарения с леса в ранний весенний период. *Труды ГГИ*. 1979. Вып. 259. С. 75-86.

75. Врублевська О.О., Катеруша Г.П. Клімат України та прикладні аспекти його використання: навчальний посібник. Одеса: ОДЕКУ, 2012. 180 с.

76. Державний водний кадастр. Багаторічні дані про режим та ресурси поверхневих вод суші (за 2011-2015 рр. та весь період спостережень). Ч. 1. Річки. Вип. 1. Басейни Західного Бугу, Дунаю, Дністра, Південного Бугу: довідкове видання. Київ, 2017. 465 с.

77. Гідрометеорологічний центр Чорного та Азовського морів. URL: <http://www.hmcbas.od.ua> (дата звернення: 15.05.2019).

78. Бойко В.М., Кульбіда М.І., Адаменко Т.І. Використання геоінформаційних технологій в оперативній гідрометеорології. *Гідрологія, гідрохімія, гідроекологія*. 2010. Вип.18. С.25-30.

79. Directive 2007/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2007 on the assessment and management of flood risks. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/card/994_b29 (Accessed: 21 December 2019).

80. 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

№ 153/31605 // Офіційний вісник України від 20.03.2018. 2018 р., № 22, стор. 294, стаття 749, код акта 89374/2018.

81. Угода про асоціацію між Україною, з однієї сторони, та Європейським Союзом, Європейським співтовариством з атомної енергії і їхніми державами-членами, з іншої сторони. URL: http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/984_011/page10 (дата звернення: 26.05.2019).

82. Под'яблонська Г.В., Докус А.О. Просторовий моніторинг стану річок басейну Південного Бугу у весняний період року. *Матеріали студентської конференції ОДЕКУ*. 23-26 квітня. Одеса, 2018. С. 92-96.

83. Кліматичні зміни та їх вплив на сфери економіки України / Степаненко С.М., Польовий А.М., Лобода Н.С. та ін.; за ред. С.М. Степаненка, А.М. Польового. Одеса: Вид. «ТЕС», 2015. 520 с.

84. Кліматичні ризики функціонування галузей економіки України в умовах змін клімату: монографія / Од. держ. еколог. ун-т; за ред. С.М. Степаненка, А.М. Польового. Одеса: Вид. «ТЕС», 2018. 548 с.

85. Лялько В.І., Єлістратова Л.О., Апостолов О.А. Використання даних наземного та космічного моніторингу для аналізу сучасних змін клімату в Україні. ДУ «Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук НАН України», Київ, Україна, 2014.

86. Мартазінова В.Ф., Щеглов А.А. Характер екстремальних опадів початку ХХІ століття на території України. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2018. № 22. С. 36-45.
<https://doi.org/10.31481/uhmj.22.2018.04>.

87. Савчук С.В., Ювченко Н.М., Тимофєєв В.Є. Районування України по впливу екстремальних значень максимальної температури повітря у теплий та холодний періоди року. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2018. № 22. С. 46-56.
<https://doi.org/10.31481/uhmj.22.2018.05>.

88. Хохлов В.М., Сіріченко К.С., Уманська О.В. Вплив змін клімату на періоди холодної погоди в Україні. *Вісник Одеського державного екологічного університету*. 2017. № 22. С. 39-44.

89. Посухи в контексті змін клімату України / Писаренко В.М., Писаренко П.В., Писаренко В.В. і др. *Вісник ПДАА*. 2019. № 1. С. 134-146. DOI: 10.31210/visnyk2019.01.15.

90. Вишневецький В.І., Косовець О.О. Гідрологічні характеристики річок України. Київ: Ніка-Центр, 2003. 324 с.

91. Гопченко Є.Д., Овчарук В.А., Шакірзанова Ж.Р. Зміни характеристик весняного водопілля на рівнинних річках України. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2012. №10. С. 133-142.

92. Рахматуліна Е.Р. Характеристики гідрологічного режиму річок басейну Південного Бугу в холодний період року та їх сучасні зміни. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*. 2015. Т.1(36). С. 71-81.

93. Blöschl, G. >Valeryia Ovcharuk<, et al. Changing climate shifts timing of European floods. *Science*. Vol.357. Issue 6351. pp. 588-590. DOI: 10.1126 / science.aan.2506. 2017. URL: <http://science.sciencemag.org/>.

94. Докус А.О., Шакірзанова Ж.Р. Часові тенденції у гідрологічному режимі весняного водопілля річок Північно-західного Причорномор'я. *Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції «Річки та лимани Причорномор'я на початку XXI сторіччя»*, 17-18 жовтня. Одеса: ТЕС. 2019. С. 73-75.

95. Пособие по определению расчетных гидрологических характеристик. Ленинград: Гидрометеиздат, 1984. 448 с.

96. Докус А.О. Дослідження часових рядів характеристик весняного стоку в басейні р. Південний Буг. *Матеріали конференції молодих вчених ОДЕКУ*, 2-8 травня. Одеса, 2018. С. 63-64.

97. Докус А.О., Шакірзанова Ж.Р., Швець Н.М. Методика просторового прогнозування строків початку та проходження максимальних витрат води весняних водопіль. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*. 2019. № 4(55). С. 8-22.

98. Гопченко Є.Д., Лобода Н.С., Овчарук В.А. Гідрологічні розрахунки: підручник. Одеса: ТЕС, 2014. 484 с.

99. Горбачова Л.О., Барандіч С.Л. Просторово-часова мінливість максимального стоку води весняного водопілля та паводків змішаного походження річок України. *Наукові праці Українського науково-дослідного гідрометеорологічного інституту*. 2016. Вип. 269. С. 107-114.

100. Гопченко Є.Д., Овчарук В.А., Гопцій М.В., Тодорова О.І. Статистичні параметри часових рядів максимального стоку весняного водопілля в басейні Дніпра в умовах мінливості клімату. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*. 2018. № 4 (51). С. 47-55.

101. Оцінювання однорідності рядів стокових характеристик річок районів річкових басейнів та суббасейнів України / Гребінь В.В., Ободовський О.Г., Жовнір В.В. та ін. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*. 2019. № 1 (52). С. 36-50.

У РОЗДІЛІ 2

1. World Meteorological Organization: Hydrological Models for Water-Resources System Design and Operation. Operational Hydrology Report. № 34. 1990. No. 740, Geneva.

2. Руководство по гидрологической практике. Сбор и обработка данных, анализ, прогнозирование и другие применения. Всемирная Метеорологическая Организация (ВМО, №168). Пятое изд. 1994. 844 с.

3. Лебедев В.Н. Метод предсказания высоты весеннего половодья рек. *Изв. ГГИ*. 1924. № 11. С. 3-12.

4. Огиевский А.В. Связь уровней р. Днепра у Киева и некоторых нижележащих притоков. *Наукові записки ВУАН*. 1924. Т. 2. С.15-23.

5. Назаров В.А. Долгосрочные предсказания высот половодий на Днепре, Десне, Припяти, Южном Буге по осадкам и температуре в бассейне и их результаты. *Труды II-го гидролог. съезда*, 20-27 / IV. 1928. С. 25-43.

6. Ольдекоп Э.М. Зависимость режима р. Чирчика от метеорологических факторов. *Материалы по вопросу о зависимости режима туркестанских рек от метеорологических факторов*. Гидр. ЧОЗУ в Турк. кр. Ташкент. 1918. Вып. 1.

7. Соколовский Д.А. Д.И. Кочерин и его роль в развитии советской гидрологии. *Метеорология и гидрология*. 1949. № 1.

8. Соколовский Д. А. Обзор исследований по вопросам речного стока и методики его расчетов. *Труды НИУ ГУГМС*, серия IV, 1946. Вып. 39.

9. Великанов М.А. Водный баланс суши. Москва: Гидрометеиздат, 1940. 170 с.

10. Огиевский А.В., Прядченко А.И. Долгосрочные прогнозы характеристик весеннего половодья. *Сборник «Основные итоги работ службы гидрологических оповещений Днепростроя»*. ОНТИ. Харьков. 1934.

11. Огиевский А.В. Основные закономерности в процессах стока на речных бассейнах. *Труды НИУ ГУГМС*, серия IV. 1945. Вып. 13. 191 с.

12. Комаров В.Д. Прогноз высоты половодья и объема талых вод р. Оки у г. Калуги. *Метеорология и гидрология*. 1936. №3. С.49-58.

13. Соколова Е.М. Прогнозы весеннего половодья р. Камы у г. Молотова по снегозапасам. *Труды ГГИ*. Вып. 10. Вопросы гидрологических прогнозов. Ленинград-Москва. 1940.

14. Спенглер О.А. Метод прогноза весеннего половодья Волги у Ярославля. *Труды ГГИ*. 1940. Вып. 10. С. 82-86.

15. Комаров В.Д. Основные факторы весеннего стока. *Труды ЦИП*. 1947. Вып. 2(29). С.34-45.
16. Салов М.С. Весенний сток в зоне недостаточного увлажнения и возможность его прогноза. *Труды ЦИП*. 1954. Вып. 32 (61). С. 77-133.
17. Калинин Г.П., Макарова Т.Т. Гидрометеорологические условия формирования высокого половодья на равнинных реках Европейской территории СССР. Ленинград: Гидрометеоиздат, 1957. 178 с.
18. Комаров В.Д. Весенний сток равнинных рек Европейской части СССР, условия его формирования и методы прогнозов. Москва: Гидрометиздат, 1959. 295 с.
19. Паршин В.Н., Салов М.С. Весенний сток в бассейне р. Дона и его предвычисление. Ленинград: Гидрометеоиздат, 1955. 102 с.
20. Попов Е.Г. Вопросы теории и практики прогнозов речного стока. Ленинград: Гидрометеоиздат, 1963. 395 с.
21. Попов Е.Г. Гидрологические прогнозы. Ленинград: Гидрометеоиздат, 1979. 255 с.
22. Салазанов В.В. Весенний сток рек бассейна Верхнего Днестра. Ленинград: Гидрометеоиздат, 1964. 141 с.
23. Романенко В.А. Расчет и прогноз объема весеннего половодья малых рек Украины по территориально общим зависимостям. *Труды УкрНИГМИ*. 1963. Вып. 39. С. 14-29.
24. Паршин В.Н. Территориально общий метод прогноза стока – основа гидрологического обслуживания сельского хозяйства. *Метеорология и гидрология*. 1965. № 2. С. 3-10.
25. Змиева Е.С. Климова В.В. Долгосрочный прогноз максимального весеннего стока. *Труды Гидрометцентра СССР*. 1983. Вып. 265. С. 3-16.
26. Аполлов Б.А., Калинин Г.П., Комаров В.Д. Курс гидрологических прогнозов. Ленинград: Гидрометеоиздат, 1974. 419 с.
27. Бефани А.Н., Бефани Н.Ф., Гопченко Е.Д. Региональные модели формирования паводочногосток на территории СССР. Обнинск. 1981. Вып. 2. 60 с.
28. Бефани Н.Ф. Прогнозирование дождевых паводков на основе территориально общих зависимостей. Ленинград: Гидрометиздат, 1977. 162 с.
29. Бефани Н.Ф., Калинин Г.П. Упражнения и методические разработки по гидрологическим прогнозам. Ленинград: Гидрометеоиздат, 1983. 390 с.

30. Лобода Н.С., Гопченко Є.Д. Стохастичні моделі у гідрологічних розрахунках. Навчальний посібник. Одеса: Екологія, 2006. 194 с.

31. Гопченко Е.Д., Шакирзанова Ж.Р. Территориальное долгосрочное прогнозирование максимальных расходов воды весеннего половодья: учебное пособие. Киев: КНТ, 2005. 240 с.

32. Гопченко Є.Д., Овчарук В.А., Шакирзанова Ж.Р. Розрахунки та довгострокові прогнози характеристик максимального стоку весняного водопілля в басейні р. Прип'ять. Одеса: Екологія, 2011. 336 с.

33. Шакирзанова Ж.Р. Довгострокове прогнозування характеристик максимального стоку весняного водопілля рівнинних річок та естуаріїв території України. Одеса: ФОП Бондаренко М.О., 2015. 252 с.

34. Університетська гідрологічна наука в Україні та перспективи подальшого її розвитку / Хільчевський В.К., Гопченко Є.Д., Лобода Н.С. та ін. *Український гідрометеорологічний журнал*, 2017, № 19. С. 90-105.

<https://doi.org/10.31481/uhmj.19.2017.11>

35. Оценка потерь талых вод и прогнозы объёма стока половодья / Вершинина Л.К., Крестовский О.И., Калюжный И.Л., Павлова К.К. Ленинград: Гидрометиздат, 1985. 188 с.

36. Калюжный И.Л., Павлова К.К. Формирование потерь талого стока. Ленинград: Гидрометеиздат, 1981. 160 с.

37. Руководство по гидрологическим прогнозам. Вып. 1. Долгосрочные прогнозы элементов водного режима рек и водохранилищ. Ленинград: Гидрометеиздат, 1989. 358 с.

38. Рудометов М.В. Об учете дружности развития половодья в расчетах и прогнозах весеннего максимума (на примере р. Десны). *Труды УкрНИГМИ*. 1969. Вып. 76. С. 23-33.

39. Крыжановская А.Б. Метод прогноза максимальных расходов притока воды в Киевское водохранилище. *Труды УкрНИГМИ*. 1969. Вып. 76. С. 17-22.

40. Вишневский П.Ф. Прогнозы максимальных расходов весеннего половодья. Сборник статей «Прогнозы элементов водного режима р. Днепра». Издательство АН УССР. Киев. 1954. С. 47-62.

41. Салазанов В.В. Об учете потерь талого стока на инфильтрацию при прогнозе элементов весеннего стока. *Метеорология и гидрология*. 1959. №2. С. 43-44.

42. Сербов Н.Г. К методике долгосрочного прогноза максимальных уровней половодья на реках Западно-Сибирской равнины. *Метеорология, климатология и гидрология*. 1992. Вып. 28. С. 3-10.

43. Shakirzanova Zh., Kazakova A., Volkov A. Territorial long-term forecasting of spring flood characteristics in the modern climatic condition utilizing geographical informational systems. *International Journal of Research In Earth & Environmental Sciences*. 2017. Vol. 7. No. 1. P. 13-16. <http://www.ijsk.org/ijrees.html>.

44. Шакірзанова Ж.Р., Казакова А.О. Територіальне довгострокове прогнозування характеристик максимального стоку весняного водопілля в басейні р. Південний Буг. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*. 2015. Т. 3(38). С. 25-33.

45. Розрахункові характеристики максимального стоку весняного водопілля річок півдня України / Шакірзанова Ж.Р., Докус А.О., Романова Е.О. та ін. *Науковий вісник Херсонського державного університету. Серія «Географічні науки»*. 2018. Вип. № 9. С. 183-193.

46. Руководство по гидрологическим прогнозам. Краткосрочный прогноз расхода и уровня воды на реках. Вып.2. Ленинград: Гидрометеиздат, 1989. 246 с.

47. Георгиевский Ю.М., Шаночкин С.В. Гидрологические прогнозы: учебник. Санкт-Петербург: изд. РГГМУ, 2007. 436 с.

48. Гопченко Є.Д, Шакірзанова Ж.Р., Овчарук В.А. Сучасні математичні моделі в гідрологічних розрахунках і прогнозах: конспект лекцій. Одеса: ОДЕКУ, 2015. 195 с.

49. Сусідко М.М. Математичне моделювання процесів формування стоку як основа прогностичних систем. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*. 2000. Том 1. С. 32-40.

50. Український гідрометеорологічний центр Державної служби України з надзвичайних ситуацій (УкрГМЦ). URL: <https://meteo.gov.ua> (дата звернення 15.03.2019)

51. Кочелаба Е.И., Окорский В.П., Соседко М.Н. Математическое моделирование процессов формирования половодного стока на территории Полесья с учетом оттепельных явлений. *Труды УкрНИГМИ*. 1990. Вып. 235. С. 3-18.

52. Соседко М.М., Будах І.В., Лук'янець О.І. Комплекс «Довготермінове прогнозування весняного стоку (призначення, структура та функції складових)». Рукопис УкрНДГМІ. Київ, 1997. 14 с.

53. Жидиков А. П., Левин А. Г., Нечаева Н. С., Попов Е. Г. Модели формирования весеннего стока и проблемы их применения для прогноза гидрографа половодья. *Труды Гидрометцентра*. 1972. Вып. 81. С. 33-45.

54. Бельчиков В.А., Корень В.И. Опыт использования модели формирования талого и дождевого стока рек лесной зоны Европейской территории СССР. *Труды Гидрометцентра СССР*. 1983. Вып. 246. С. 3-20.

55. Корень В.И. Математические модели в прогнозах речного стока. Ленинград: Гидрометеиздат, 1991. 200 с.

56. Математическое моделирование процесса стока горных рек / Боровикова Л.Н., Денисов Ю.М., Трофимова Е.Б. и др. *Труды СредАзНИГМИ*. 1972. Вып. 61(76).

57. Железняк И.А. Регулирование паводочного стока. Ленинград: Гидрометиздат, 1965. 326 с.

58. Sherman L.M. Streamflow from rainfall by the unitgraph method. *Eng. News Record*. 1932. Vol. 108. № 14.

59. Виноградов Ю.Б., Виноградова Т.А. Математическое моделирование в гидрологии. Москва: Академия, 2010. 304 с.

60. Водоласков В.П. Реализация и особенности применения модели формирования талого и дождевого стока для водосборов лесостепной зоны Европейской территории СССР. *Труды УкрНИГМИ*. 1991. Вып. 240. С. 32-39.

61. Сусідко М.М., Лук'янець О.І. Карпати – паводконебезпечний регіон України. Комплексна басейнова система прогнозування паводків у Закарпатті: методична та технологічна база її складових. Київ, 2010. 93 с.

62. Бойко О.В., Железняк М.Й. Оцінка ефективності протипаводкових заходів на малих річкових водозборах Закарпаття на основі розрахунків розподіленої моделі «опаді-стік». *Математичні машини і системи*. 2011. № 4. С. 149-160.

63. Бойко О.В. Технологія обробки просторових даних засобами ГІС для використання в розподілених гідрологічних моделях. *Математичні машини і системи*. 2012. № 1. С. 36-44.

64. Христюк Б.Ф. Краткосрочное прогнозирование уровней воды в Килийском рукаве Дуная. *Energetika*. 2014. Т. 60. № 1. С. 69-75.

65. Бойко В.М., Кульбіда М.І., Адаменко Т.І. Використання геоінформаційних технологій в оперативній гідрометеорології. *Гідрологія, гідрохімія, гідроекологія*. 2010. Вип. 18. С. 25-30.

66. Hydrologic Modeling of Landscape Functions of Wetlands / Demissie et al. Illinois State Water Survey, Champaign, Research Report 125, 1997. 42 p.

67. Crawford N.H., and Linsley R.K. Digital Simulation in Hydrology: Stanford Watershed Model IV. Technical Report 39, Department of Civil Engineering, Stanford University, Stanford, CA. 1966.

68. Dawdy D.R. and O'Donnell T. Mathematical models of catchment behavior. Proc. Amer. Soc. civ. Engrs. J. Hydr. Div. № 4, 1965. Pp. 123-137.

69. Dawdy David R., Robert W. Lichty and James M. Bergmann. A rainfall-run off simulation model for estimation of flood peaks for small drainage basins. A progress report. USGS Professional Paper 50GB. 1970.28 p.

70. Nash J.E., and Sutcliffe J.V. River Flow Forecasting through Conceptual Models, Part I - A Discussion of Principles. *Journal of Hydrology*. №10(3). 1971. Pp. 282-290.

71. O'Connell P. E., Nash J. E. and Farrell J. P. River flow forecasting through conceptual models. Part II - The Brosna catchment at Ferbane J. *Hydrology*. №10 (4). 1970. Pp. 317-329.

72. Zhao R. Watershed Hydrological Model-Xinjiang Model and Northern Shaanxi Model; Water Resources and Electric Power Press: Beijing, China. 1983.

73. Burnash R.J. C., Ferral R.L. and McGuire R.A. A Generalized Streamflow Simulation System: Conceptual Modelling for Digital Computers. National Weather Service and State of California Department of Water Resources, March. 1973.

74. Krysanova V., Wechsung F. SWIM (Soil and Water Integrated Model) User Manual. Potsdam Institute for Climate Impact Research. Potsdam, 2000.

75. Krysanova. V., Hattermann F., Wechsung F. Development of the ecohydrological model SWIM for regional impact studies and vulnerability assessment. *Hydrology*. Process. 2005. №19. Pp. 763-783.

76. Дідовець Ю.С., Павельчук Є.М., Сніжко С.І. Визначення калібраційного та валідаційного періодів для гідрологічної моделі SWIM (на прикладі р. Тетерів). *Фізична географія та геоморфологія*. 2014. Вип. 4(76). С. 58-67.

77. An introduction to the European Hydrological System-Systeme Hydrologique Europeen / M.B. Abbott et al. "SHE". 1 History and philosophy of a physically based distributed modelling system. *Journal of Hydrology*. 1986. №. 87. Pp. 45-59.

78. An Introduction to the European Hydrological System – Systeme Hydrologique Europeen / Abbott M.B. et al. "SHE," 2: Structure of a Physically-Based, Distributed Modelling System. *Journal of Hydrology*. № 87. 1986. Pp. 61-77.

79. Wigmosta M.S., Vail L., Lettenmaier D.P. A distributed hydrology-vegetation model for complex terrain. *Water Resources Research*. 1994. Vol. 30. Pp. 1665-1679.

80. MIKE 11 - a Modelling System for Rivers and Channels. Short Introduction Tutorial. Version 2007, DHI Water & Environment, 15 p.

81. Tank Model and its Application to Bird Creek /Sugawara M.et al. Wollombi Brook, Bikin River, Kitsu River, Sanaga River and Nam Mune. Research Note of the National Research Center for Disaster Prevention, Science and Technology Agency, Tokyo, Japan, June. 1974.

82. HydroProg: a system for hydrologic forecasting in real time based on the multimodelling approach /Niedzielski T.et al. *Meteorology Hydrology and Water Management*. 2014. Pp. 65-73.

83. Lindström G. Development and test of the distributed HBV-96 hydrological model. *Journal of Hydrology*. December 1997. №201(1-4). Pp. 272-288. DOI: 10.1016/S0022-1694(97)00041-3.

84. Estimation of uncertainty sources in the projections of Lithuanian river runoff / Kriauciuniene J. et al. *Stoch Environ Res Risk Assess*. 2013. 27. Pp. 769–784. DOI:10.1007/s00477-012-0608-7.

85. On the Operational Implementation of the European Flood Awareness System (EFAS) / Smith P.J. et al. *Flood Forecasting: A Global Perspective*. 2016. Pp. 313-348.

86. Wetterhall F., Di Giuseppe F. The benefit of seamless forecasts for hydrological predictions over Europe, *Hydrology and Earth System Sciences*, 2018. №22 (6). Pp. 3409-3420.

87. The European Flood Alert System / Thielen J. et al. Part 1: Concept and development, *Hydrology and Earth System Sciences*, 2009, Vol. 13, Pp. 125-140.

88. Ntelekos A.A., Georgakakos K.P. &Krajewski W.F. On the uncertainties of flash flood guidance: Toward probabilistic forecasting of flash floods.*Journal of Hydrometeorology*. 2006. Vol. 7(5). Pp. 896–915.

89. WSIM – Water Security Indicator Model. URL: <https://wsim.isciences.com> (дата звернення 25.05.2019)

90. Кучмент Л.С. Модели процессов формирования речного стока. Ленинград: Гидрометиздат, 1980. 144 с.

91. Кучмент Л.С., Гельфан А.Н., Демидов В.Н. Расчет вероятностных характеристик максимального стока по метеорологическим данным с использованием динамико-стохастических моделей. *Метеорология и гидрология*. 2002. № 5. С. 83-94.

92. Кучмент Л.С. Речной сток (генезис, моделирование, предвычисление). Москва, 2008. 394 с.

93. Кочелаба Є.І., Окорський В.П., Соседко М.Н. Оценка динамики промерзания и оттаивания почвы в Полесских районах по метеорологическим данным. *Труды УкрНИГМИ*. 1990. Вип. 235. С. 18-26.

94. На засадах математичного моделювання процесів формування весняного стоку з урахуванням ландшафтних умов розробити систему його прогнозування в басейні Західного Бугу. Звіт про НДР (заклучний) УкрНДГМІ 2000 р. Наук. кер. Сусідко М.М. № ДР 0100U003509.

95. Модернізація систем прогнозування стоку під час повеней і паводків у басейнах річок Карпатського регіону, Прип'яті, Десни та Дунаю. Звіт про науково-дослідну роботу (тема 5/12) (заклучний) УкрНДГМІ 2014 р. Наук. кер. Осадчий В.І. № ДР 0112U004678.

96. Гопченко Е.Д., Овчарук В.А. Формирование максимального стока весеннего половодья в условиях юга Украины. Одесса: ТЭС, 2002. 110 с.

97. Гопченко Е.Д., Романчук М.Е. Нормирование характеристик максимального стока весеннего половодья на реках Причерноморской низменности. Киев: КНТ, 2005. 148 с.

98. Факторный, дискриминантный и кластерный анализ; пер. с англ. / Дж.- О. Ким, Ч.У. Мьюллер, У.Р. Клекка и др. Финансы и статистика, 1989, 215 с.

99. Гопченко Є.Д., Лобода Н.С., Овчарук В.А. Гідрологічні розрахунки: підручник. Одеса: ТЕС, 2014: 484.

100. Пособие по определению расчётных гидрологических характеристик. Ленинград: Гидрометеиздат, 1984. 450 с.

101. Метод прогностичної оцінки характеристик гідрологічного режиму річок басейну Дніпра у весняний період року / Шакірзанова Ж.Р., Бойко В.М., Гощій М.В. та ін. *Український гідрометеорологічний журнал*, Вип. № 22, 2018. С. 80-99. <https://doi.org/10.31481/uhmj.22.2018.08>

102. Zhannetta Shakirzanova, Anhelina Dokus, Yelyzaveta Romanova. The long-term forecasting of hydrological condition of small rivers and filling of the lakes in Danube region during the spring period of year. *XXVIII conference of the Danubian countries on hydrological forecasting and hydrological bases of water management*, November 6-8. Kyiv. Ukraine, 2019. P.17.

103. Shakirzanova Zh., Dokus A. Hydrological modeling of spatial long-term forecasting of maximum water discharge of spring flood using the example of the rivers of the Baltic region. *Baltic Earth Workshop on Hydrology of the Baltic Sea Basin: Observation, Modelling, Forecasting* State Hydrological Institute (Co-

organized by Helmholtz-ZentrumGeesthacht, and State Hydrological Institute, 8-9 October. St. Petersburg, 2019. P. 37-38.

104. Комплексний метод довгострокового прогнозування гідрологічних характеристик весняного водопілля річок / Шакіризанова Ж.Р., Докус А.О., Тодорова О.І. та ін. *Проблеми гідрології, гідрохімії, гідроекології* / за ред. В.І. Осадного та ін. Київ: Ніка-Центр, 2019. С. 58-74.

105. Докус А.О., Шакіризанова Ж.Р., Швець Н.М. Методика просторового прогнозування строків початку та проходження максимальних витрат води весняних водопіль. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*. 2019. № 4(55). С. 8-22.

106. Шакіризанова Ж.Р. Прогнозування максимальних витрат води весняного водопілля в басейні Дніпра з використанням автоматизованих програмних комплексів. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*. 2011. Т.4(25). С. 48-55.

107. Шакіризанова Ж.Р., Андреевська Г.М., Бойко В.М. Довгострокове прогнозування максимальних витрат води весняних водопіль річок лівобережжя Дніпра (з використанням програмного комплексу). *Наукові праці Українського науково-дослідного гідрометеорологічного інституту*. Вип. 263. 2012. С. 89-95.

У РОЗДІЛІ 3

1. Бефани А.Н., Бефани Н.Ф., Гопченко Е.Д. Региональные модели формирования паводочного стока на территории СССР. Обнинск. 1981. Вып. 2. 60 с.

2. Шакіризанова Ж.Р. Довгострокове прогнозування характеристик максимального стоку весняного водопілля рівнинних річок та естуаріїв території України. Одеса: ФОБ Бондаренко М.О., 2015. 252 с.

3. Гопченко Е.Д., Шакіризанова Ж.Р. Территориальное долгосрочное прогнозирование максимальных расходов воды весеннего половодья: учебное пособие. Київ: КНТ, 2005. 240 с.

4. Гопченко Е.Д., Овчарук В.А., Шакіризанова Ж.Р. Розрахунки та довгострокові прогнози характеристик максимального стоку весняного водопілля в басейні р. Прип'ять. Одеса: Екологія, 2011. 336 с.

5. Шакіризанова Ж.Р., Казакова А.О. Територіальне довгострокове прогнозування характеристик максимального стоку весняного водопілля в басейні р. Південний Буг. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*. 2015. Т. 3(38). С. 25-33.

6. Факторный, дискриминантный и кластерный анализ. Пер. с англ. / Дж.- О. Ким, Ч.У. Мьюллер, У.Р. Клекка и др. Финансы и статистика, 1989, 215 с.

7. Школьный Є.П., Лоева І.Д., Гончарова Л.Д. Обробка та аналіз гідрометеорологічної інформації: підручник. Київ: Міносвіти України, 1999. 538 с.

8. Лобода Н.С. Методи статистичного аналізу у гідрологічних розрахунках і прогнозах: навчальний посібник. Одеса. Екологія, 2010. 184 с.

9. Дубровская Л.И., Князев Г.Б. Компьютерная обработка естественно-научных данных методами многомерной прикладной статистики: учебное пособие. Томск: ТМЛ-Пресс, 2011. 120 с.

10. Дубров А.М., Мхитарян В.С., Трошин Л.И. Многомерные статистические методы. Москва, 2003.

11. Боровиков В. STATISTICA. Искусство анализа данных на компьютере: Для профессионалов. 2-е изд. (+CD). СПб.: Питер, 2003. 688 с.

12. Дискриминантний аналіз. SPSS. Base 7.5 для Windows: руководство пользователя. Москва: Статис, 1997.

13. Державний водний кадастр. Багаторічні дані про режим та ресурси поверхневих вод суші (за 2011-2015 рр. та весь період спостережень). Частина 1. Річки. Випуск 1. Басейни Західного Бугу, Дунаю, Дністра, Південного Бугу. Довідкове видання. Київ, 2017. 465 с.

14. Аполлов Б.А., Калинин Г.П., Комаров В.Д. Курс гидрологических прогнозов. Ленинград: Гидрометеиздат, 1974. 419 с.

15. Бефани Н.Ф., Калинин Г.П. Упражнения и методические разработки по гидрологическим прогнозам. Ленинград: Гидрометеиздат, 1983. 390 с.

16. Оценка потерь талых вод и прогнозы объема стока половодья / Вершинина Л.К., Крестовский О.И., Калужный И.Л., Павлова К.К. Ленинград: Гидрометеиздат, 1985. 189 с.

17. Комаров В.Д. Весенний сток равнинных рек Европейской части СССР, условия его формирования и методы прогнозов. Москва: Гидрометеиздат, 1959. 295 с.

18. Попов Е.Г. Вопросы теории и практики прогнозов речного стока. Ленинград: Гидрометеиздат, 1963. 395 с.

19. Рахманов В.В. Влияние лесов на формирование снежных запасов. *Метеорология и гидрология*. 1956. № 11. С. 21-28.

20. Салазанов В.В. Весенний сток рек бассейна Верхнего Днестра. Ленинград: Гидрометеиздат, 1964. 141 с.

21. Пашова Л.Т. Расчет средних в бассейне снегозапасов с учетом снегонакопления в лесу. *Труды УкрНИГМИ*. 1965. Вып. 51. С. 53-58.

22. Крыжановская А.Б. О неравномерности снегозалегаания и ееучете при определении снегозапасов. *Труды УкрНИГМИ*. 1965. Вып. 51. С. 47-52.

23. Грун П.В., Сироткин Ю.Д. Формирование снежного покрова в сосновых лесах разной густоты. *Сб. работ гидрометцентров Белорусского УГКС и Литовского УГКС*. 1985. Вып. 1. С. 50-56.

24. Гопченко Е.Д., Овчарук В.А., Траскова А.В. Влияние типов подстилающей поверхности на величину максимальных снегозапасов к началу весеннего половодья (на примере бассейна р. Днестр) / *Актуальные вопросы аграрной науки*. Иркутск, 2014. Вып. 13. С. 30-37.

25. Овчарук В.А. Максимальний стік весняного водопілля рівнинних річок України: монографія. Одеса: Видавничий дім «Гельветика», 2020. 300 с.

26. Шакіряннова Ж.Р., Казакова А.О. Гідрометеорологічні чинники і характеристики весняних водопіль в басейні р. Південний Буг в сучасних кліматичних умовах. *Вісник Одеського державного екологічного університету*. 2015. Вип. 20. С. 100-107.

27. Докус А.О. Дослідження часових рядів характеристик весняного стоку в басейні р. Південний Буг. *Матеріали конференції молодих вчених ОДЕКУ*, 2-8 травня. Одеса, 2018. С. 63-64.

28. Пособие по определению расчётных гидрологических характеристик. Ленинград: Гидрометеиздат, 1984. 450 с.

29. Гопченко Є.Д., Лобода Н.С., Овчарук В.А. Гідрологічні розрахунки: підручник. Одеса: ТЕС, 2014. 484 с.

30. Directive 2007/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2007 on the assessment and management of flood risks. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/card/994_b29 (Accessed: 21 December 2019).

31. Український гідрометеорологічний центр Державної служби України з надзвичайних ситуацій (УкрГМЦ). URL: <https://meteo.gov.ua> (дата звернення 18.04.2019).

32. Настанова з оперативної гідрології. Прогнози режиму вод суші. Гідрологічне забезпечення і обслуговування: керівний документ. Київ: Український гідрометеорологічний центр, 2012. 120 с.

33. Оцінювання якості методики та точності (справджуваності) прогнозів режиму поверхневих вод суші: керівний документ. Київ: Український гідрометеорологічний центр, 2015. 70 с.

34. Гідрометеорологічний центр Чорного та Азовського морів.
URL: <http://www.hmcbas.od.ua> (дата звернення 18.04.2019).

35. Shakirzanova Zh., Kazakova A., Volkov A. Territorial long-term forecasting of spring flood characteristics in the modern climatic condition utilizing geographical informational systems. *International Journal of Research In Earth & Environmental Sciences*. 2017. Vol. 7. No.1. Pp. 13-16.
<http://www.ijsk.org/ijrees.html>.

36. Розрахункові характеристики максимального стоку весняного водопілля річок півдня України / Шакірзанова Ж.Р., Докус А.О., Романова Е.О. та ін. *Науковий вісник Херсонського державного університету*. Серія «Географічні науки». 2018. Вип. № 9. С. 183-193.

37. Комплексний метод довгострокового прогнозування гідрологічних характеристик весняного водопілля річок / Шакірзанова Ж.Р., Докус А.О., Тодорова О.І., Сербова З.Ф., Швець Н.М. *Проблеми гідрології, гідрохімії, гідро екології* / за ред. В.І. Осадчого та ін. Київ: Ніка-Центр, 2019. С. 58-74.

38. Докус А.О., Шакірзанова Ж.Р. Особливості методики довгострокового прогнозування характеристик весняного водопілля рівнинних річок в різних фізико-географічних зонах. *Матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Геологічне, гідрологічне та біологічне різноманіття Полісся»*. Рівне. 2019. С. 145-149.

39. Shatokhin V.S., Dokus A.A., Shuptar N.I. Development of the software complex for the ensemble forecasting of the spring river flood in the basin of the Yuzhny Bug river. *Матеріали III Міжнародної науково-практичної конференції молодих вчених «Теоретичні та прикладні аспекти застосування інформаційних технологій в галузі природничих наук»*. Одеса: ТЕС. 2018. С. 53-57.

У РОЗДІЛІ 4

1. Аполлов Б.А., Калинин Г.П., Комаров В.Д. Курс гидрологических прогнозов. Ленинград: Гидрометеиздат, 1974. 419 с.

2. Бефани Н.Ф., Калинин Г.П. Упражнения и методические разработки по гидрологическим прогнозам. Ленинград: Гидрометеиздат, 1983. 390 с.

3. Руководство по гидрологическим прогнозам. Вып. 1. Долгосрочные прогнозы элементов водного режима рек и водохранилищ. Ленинград: Гидрометеиздат, 1989. 358 с.

4. Гопченко Е.Д., Шакирзанова Ж.Р. Территориальное долгосрочное прогнозирование максимальных расходов воды весеннего половодья: учебное пособие. Киев: КНТ, 2005. 240 с.

5. Гребін В.В. Сучасний водний режим річок України (ландшафтно-гідрологічний аналіз). Київ: Ніка-Центр, 2010. 316 с.

6. Докус А.О. Районування басейну Південного Бугу за умовами формування весняного водопілля річок. *Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Рельєф, клімат та поверхневі води як об'єкти природничо-географічних досліджень (до 70-річчя кафедр землезнавства та геоморфології, метеорології та кліматології, гідрології та гідроекології)», 2-4 жовтня. Київ, 2019. С. 42-44.*

7. Гопченко Є.Д., Овчарук В.А., Шакирзанова Ж.Р. Розрахунки та довгострокові прогнози характеристик максимального стоку весняного водопілля в басейні р. Прип'ять. Одеса: Екологія, 2011. 336 с.

8. Шакирзанова Ж.Р. Довгострокове прогнозування характеристик максимального стоку весняного водопілля рівнинних річок та естуаріїв території України. Одеса: ФОП Бондаренко М.О., 2015. 252 с.

9. Шакирзанова Ж.Р., Казакова А.О. Територіальне довгострокове прогнозування характеристик максимального стоку весняного водопілля в басейні р. Південний Буг. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*. 2015. Т. 3(38). С. 25-33.

10. ShakirzanovaZh., Kazakova A., Volkov A. Territorial long-term forecasting of spring flood haracteristics in the modern climatic condition utilizing geographical informational systems. *International Journal of Research In Earth & Environmental Sciences*.2017. Vol. 7. No.1. Pp. 13-16. <http://www.ijsk.org/ijrees.html>.

11. Горбачева Л.О. Гідролого-генетичний аналіз просторово-часових закономірностей водного стоку річок України: методологія, тенденції, прогноз: дисертація на здобуття наукового ступеня доктора географічних наук за спеціальністю 11.00.07. Київ, 2017. 399 с.

12. Гопченко Е.Д., Овчарук В.А. Формирование максимального стока весеннего половодья в условиях юга Украины. Одесса: ТЭС, 2002. 110 с.

13. Гопченко Е.Д., Романчук М.Е. Нормирование характеристик максимального стока весеннего половодья на реках Причерноморской низменности. Киев: КНТ, 2005. 148 с.

14. Овчарук В.А., Гопченко Є.Д. Сучасна методика нормування характеристик максимального стоку весняного водопілля рівнинних річок України. *Український географічний журнал*. 2018. № 2 (102). С. 26-33.

15. Докус А.О., Овчарук В.А., Шакірзанова Ж.Р. Визначення середньобагаторічних величин максимальних витрат води весняного водопілля в басейні р. Південний Буг. *Український гідрометеорологічний журнал*, 2019, № 24. С. 49-63. <https://doi.org/10.31481/uhmj.24.2019.05>

16. Пособие по определению расчетных гидрологических характеристик / Государственный гидрологический институт. Ленинград: Гидрометеиздат, 1984. 447 с.

17. Гопченко Е.Д., Гушля А.В. Гидрология с основами мелиорации. Ленинград: Гидрометеиздат, 1989. 303 с.

18. Гопченко Є.Д., Гопцій М.В. Максимальний стік дощових паводків у Передкарпатті. Одеса: ТЕС, 2015. 128 с.

19. Гопченко Є.Д., Кічук Н.С., Овчарук В.А. Максимальний стік дощових паводків на річках Півдня України. Одеса: ТЕС, 2016. 212 с.

20. Овчарук В.А., Гопченко Є.Д., Траскова А.В. Нормування характеристик максимального стоку весняного водопілля в басейні річки Дністер. Харків: ФОП Панов А.М., 2017. 252 с.

21. Гопченко Є.Д., Погорелова М.П. Нормування розрахункових характеристик весняного водопілля в басейні річки Прип'ять на базі формули об'ємного типу. Одеса: ТЕС, 2018. 136 с.

22. Екстремальні гідрологічні явища: паводки і посухи на території гірських регіонів України; за ред. Гопченка Є.Д. Одеса: ТЕС, 2018. 324 с.

23. Гопченко Е.Д. О редуции максимальных модулей дождевого стока по площади. *Метеорология и гидрология*. 1975. № 2. С. 66-71.

24. Гопченко Е.Д., Овчарук В.А., Романчук М.Е., Ткаченко Т.Г. Научно-методическое обоснование нормативной базы по расчётам характеристик максимального стока рек Украины. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2011. №9. С.118-125.

25. Огиевский А.В. Гидрология суши. Москва: Сельхозгиз, 1952. 516 с.

26. Железняк И.А. Определение максимального расхода половодья по типовым характеристикам гидрометеорологических условий водосбора. *Труды УкрНИГМИ*. 1985. Вып. 201. С. 15-27.

27. Мокляк В.І. Максимальні витрати від талих вод на річках УРСР. Київ, 1957. 163 с.

28. Вишневецький П.Ф. Зливи і зливовий стік на Україні. Київ, 1964. 290 с.

29. Бефани А.Н., Бефани Н.Ф., Гопченко Е.Д. Региональные модели формирования паводочного стока на территории СССР. Обнинск. 1981. Вып. 2. 60 с.

30. Гопченко Є.Д., Лобода Н.С., Овчарук В.А. Гідрологічні розрахунки: підручник. Одеса: ТЕС, 2014. 484 с.
31. World Meteorological Organization. Guide to Hydrological Practices, Fifth Edition, TD No.168, 1994.
32. Гопченко Е.Д., Гнездилов Ю.А. Графоаналитический метод определения параметров гидрографов склонового стока (по материалам полевого обследования ГВВ). *Труды УкрНИГМИ*. 1974. Вып. 127. С. 54-61.
33. 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.
34. Гопченко Е.Д. Развитие представителями Одесской научной школы теоретической и прикладной гидрологии учения о максимальном стоке. *Метеорологія, кліматологія та гідрологія*. 2008. Вып. 50, ч. 2. С. 5-13.
35. Гопченко Є.Д., Овчарук В.А. Методика расчета скорости руслового добегания на реках Украины. *Причорноморський екологічний бюлетень*. 2007. № 2 (24) (червень). С.53-55.
36. Докус А.О. Обґрунтування регіональної методики довгострокових прогнозів характеристик весняного водопілля для невивчених річок басейну Південного Бугу. *Матеріали конференції молодих вчених ОДЕКУ*. 25-29 травня. Одеса, 2020. С. 119-120.
37. Український гідрометеорологічний центр Державної служби України з надзвичайних ситуацій (УкрГМЦ). URL: <https://meteo.gov.ua> (дата звернення 18.04.2019).
38. Гідрометеорологічний центр Чорного та Азовського морів URL:<http://www.hmcbas.od.ua> (дата звернення 18.04.2019).

У РОЗДІЛІ 5

1. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Working Group I contribution to the IPCC Fifth Assessment Report. The challenges of climate change: The outcomes of IPCC WGI. Thomas Stocher. Co-Chair IPCC Working Group I. University of Bern, Switzerland.
2. Лялько В.І., Єлістратова Л.О., Апостолов О.А. Використання даних наземного та космічного моніторингу для аналізу сучасних змін клімату в Україні. ДУ «Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук НАН України», Київ, Україна. 2014.
3. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). URL: <https://www.ipcc.ch/> (Accessed: 21 July 2019).

4. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). URL: https://archive.ipcc.ch/home_languages_main_russian.shtml (Accessed: 21 March 2020).

5. Енергетична стратегія України на період до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність». Схвалено розпорядженням Кабінету Міністрів України від 18 серпня 2017 р. № 605-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/605-2017-%D1%80> (дата звернення: 19.01.2020 р.).

6. Стратегія низько вуглецевого розвитку України до 2050 року. Київ. 2018. URL: <https://menr.gov.ua/news/31815.html> (дата звернення 25.01.2020).

7. Пачаури Р.К., Райзингер А. и др. Изменение климата, 2007: Обобщающий доклад. Вклад рабочих групп I, II и III в Четвертый доклад об оценке Межправительственной группы экспертов по изменению климата. МГЭИК: Женева, Швейцария, 2007. 104 с.

8. Оцінка впливу кліматичних змін на галузі економіки України / Степаненко С.М., Польовий А.М., Школьний Є.П. та ін.; за ред. Степаненка С.М., Польового А.М. Одеса: Екологія, 2011. 696 с.

9. Кліматичні зміни та їх вплив на сфери економіки України / Степаненко С.М., Польовий А.М., Лобода Н.С. та ін.; за ред. С.М. Степаненка, А.М. Польового. Одеса: Вид. «ТЕС», 2015. 520 с.

10. Кліматичні ризики функціонування галузей економіки України в умовах змін клімату: монографія / Од. держ. еколог. ун-т; за ред. С.М. Степаненка, А.М. Польового. Одеса: Вид. «ТЕС», 2018. 548 с.

11. Гопченко Е.Д. Лобода Н.С. Оценка возможных изменений водных ресурсов Украины в условиях глобального потепления. *Гидробиологический журнал*. 2000. Т. 36. № 3. С. 67-78.

12. Лобода Н.С. Дорофієва В.П. Стан водних ресурсів р. Дністер за сценаріями глобального потепління. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*. 2011. Т. 3 (30). С. 36-44.

13. Лобода Н.С. Влияние изменений климата на водные ресурсы Украины (моделирование и прогнозы по данным климатических сценариев. Глобальне и региональные изменения климата. Київ: Ника-Центр, 2011. С. 340-351.

14. Лобода Н.С. Гопченко Є.Д. Водні ресурси України у зв'язку з кліматичними умовами. Україна: географічні проблеми сталого розвитку. Київ: ВГЛ Обрії. 2004. Т. 3. С. 144-146.

15. Лобода Н.С., Божок Ю.В., Куза А.М. Зміни кліматичних чинників та характеристик стоку р. Тилігул під впливом глобального потепління. *Вісник Одеського державного екологічного університету*. 2014. Вип. 17. С. 116-127.

16. Лобода Н.С., Сербова З.Ф., Божок Ю.В. Вплив змін клімату на водні ресурси України у сучасних та майбутніх умовах (за сценарієм глобального потепління А1В). *Український гідрометеорологічний журнал*. 2014. №15. С. 149-159.

17. Лобода Н.С., Божок Ю.В. Оценка изменений водных ресурсов реки Дунай в XXI веке по сценарию А1В с использованием модели «климат-сток». *Український гідрометеорологічний журнал*. 2016. № 18. С. 112-120. <https://doi.org/10.31481/uhmj.18.2016.13>.

18. Лобода Н.С., Отченаш Н.Д., Гриб О.М. Опис штучних водойм на водозборі річки Великий Куяльник та регламентування їх роботи у сучасності та майбутньому. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2018. № 21. С.50-59. <https://doi.org/10.31481/uhmj.21.2018.06>.

19. Лобода Н.С., Куза А.М., Козлов О.М. Оцінка можливих змін водних ресурсів річок водозбору Куяльницького лиману на початку ХХІ сторіччя (2021-2050 pp.) за моделями кліматичного сценарію RCP4.5. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2019. № 23. С. 42-51. <https://doi.org/10.31481/uhmj.23.2019.05>

20. Гребін В.В. Сучасний водний режим річок України (ландшафтно-гідрологічний аналіз). Київ: Ніка-Центр, 2010. 316 с.

21. Рахматуліна Е.Р., Гребін В.В. Майбутні тенденції змін характеристик гідрологічного режиму річок басейну Південного Бугу в зимовий період. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2017, № 20. С. 91-98. <https://doi.org/10.31481/uhmj.20.2017.11>.

22. Grebin V., Mudra K. Forecasting the runoff on rivers of the Dniester river basin according to the REMO numeric climatic model. *World science*. № 9(37). 2018. Pp. 26-32. https://doi.org/10.31435/rsglobal_ws/30092018/6131.

23. Оцінка можливих змін водних ресурсів місцевого стоку в Україні в ХХІ столітті / С. Сніжко, М. Яцюк, І. Купріков та ін. *Водне господарство України*. 2012. № 6(102). С. 8-16.

24. Снежко С.И., Ободовский А.Г., Лопух П.С. Долгосрочный прогноз стока горных и равнинных рек для оценки их гидроэнергетического потенциала (на примере Украинских Карпат и Беларуси). *Журнал Белорусского государственного университета. География. Геология*. 2016. С. 50-61.

25. Didovets I., Krysanova V., Bürgera G., Snizhko S., Balabukh V., Bronstert A. Climate change impact on regional floods in the Carpathian region.

Journal of Hydrology: Regional Studies. Vol. 22, April 2019, 100590. P. 2-14.
<https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2019.01.002>

26. Снежко С.И., Куприков И.В., Шевченко О.Г., Павельчук Е.М., Дидовец Ю.С. Использование водно-балансовой модели Турка и численной региональной модели REMO для оценки водных ресурсов местного стока в Украине в XXI веке. *Вестник Брянского государственного университета*. 2014. Т. 4. С. 191-201.

27. Горбачова Л.О. Оцінка можливих майбутніх змін водного стоку річок України (на середину XXI століття). *Проблемы материальной культуры. Географические науки*. 2014. С. 89-94.

28. Овчарук В.А. Максимальний стік весняного водопілля рівнинних річок України: Монографія. Одеса: Видавничий дім «Гельветика», 2020. 300 с.

29. Овчарук В. А., Гопченко Є. Д. Сучасна методика нормування характеристик максимального стоку весняного водопілля рівнинних річок України. *Український географічний журнал*. 2018. № 2 (102). С. 26-33.

30. Гопченко Є. Д., Овчарук В. А., Семенова І. Г. Науково-методичні підходи до врахування глобальних змін клімату при розрахунках максимального стоку річок. *Вісник Одеського державного екологічного університету*. 2012. Вип. 14. С. 141-150.

31. Шакірзанова Ж.Р., Казакова А.О. Гідрометеорологічні чинники і характеристики весняних водопіль в басейні р. Південний Буг в сучасних кліматичних умовах. *Вісник Одеського державного екологічного університету*. 2015. Вип. 20. С. 100-107.

32. Докус А.О., Овчарук В.А., Шакірзанова Ж.Р. Визначення середньобазисних величин максимальних витрат води весняного водопілля в басейні р. Південний Буг. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2019. № 24. С. 49-63. <https://doi.org/10.31481/uhmj.24.2019.05>

33. IS-ENES climate 4 impact portal. URL: <https://climate4impact.eu/> (Accessed: 21 February 2020).

34. Казакова А.О. Можливості прогнозування характеристик весняного стоку за прогностичними кліматичними сценаріями в басейні Південного Бугу в сучасних кліматичних умовах. *Матеріали конференції молодих вчених ОДЕКУ*, 12-15 травня. Одеса, 2015. С. 74-76.

35. Докус А.О. Обґрунтування регіональної методики довгострокових прогнозів характеристик весняного водопілля для невивчених річок басейну Південного Бугу. *Матеріали конференції молодих вчених ОДЕКУ*, 25-29 травня. Одеса, 2020. С. 119-120.

АНОТАЦІЯ

У монографії розроблено регіональну методику довгострокових прогнозів характеристик весняного водопілля річок в басейні р. Південний Буг, яка основана на попередній типізації водопіль за їх водністю при виборі головних факторів формування весняного стоку, встановленні регіональних параметрів (в межах районування басейну за комплексом гідрометеорологічних чинників) для довгострокового прогнозування шарів стоку та максимальних витрат води, визначенні їх ймовірнісних величин у багаторічному періоді.

Виконані дослідження часових тенденцій і циклічності у багаторічних рядах характеристик максимального стоку весняного водопілля в басейні р. Південний Буг показали, що зниження весняного стоку річок в останні десятиліття викликане змінами клімату у зв'язку з підвищенням температур повітря холодного періоду, відсутністю стійкого снігового покриву та суттєвим зменшенням глибин промерзання ґрунтів (в період з 1989 р.); встановлено, що спостерігається тенденція до зміщення строків настання як максимальних снігозапасів, так і весняних водопіль до більш ранніх дат. Часові ряди максимальних витрати води та шарів стоку весняного водопілля за циклічністю коливань є синхронними, а з кінця 80-х рр. минулого сторіччя до 2015 р. на річках спостерігається маловодна фаза.

Аналіз сумарних кривих шарів стоку та максимальних витрат води весняного водопілля та їх різницевих інтегральних кривих в басейні р. Південний Буг (на постах з найбільшими ГЕС на них) показав, що в сучасний період формування весняного водопілля на басейні вплив зарегульованості на максимальний стік не суттєвий, відхилення на сумарних кривих переважно пояснюються природними циклами та впливом змін клімату на водність річок.

У даному дослідженні при застосуванні методів факторного та кластерного аналізів виконане гідрологічне районування за умовами формування весняного водопілля річок території басейну р. Південний Буг, яке дозволило виділити два гідрологічні райони (район I та район II з підрайонами Па, Пб, Пв). Проаналізовані природні умови показали, що в межах здійсненого гідрологічного районування вони мають певні особливості формування весняних водопіль.

Для розробки методики в якості вхідної інформації було використано дані багаторічних метеорологічних, агрометеорологічних та гідрологічних спостережень в басейні р. Південний Буг (станом на 2015 р.), при залученні даних спостережень в басейнах р. Великий Куяльник та р. Тилігул.

Для типізації водності весняних водопіль використано метод дискримінантного аналізу за сформованим вектор-предиктором, до якого обрані (за методом факторного аналізу) основні фактори формування весняного стоку річок розглядуваної території – максимальні запаси води в сніговому покриві, опади та максимальна перед водопіллям глибина промерзання ґрунтів. Виділено три групи водності (високої, середньої та низької) водопіль і отримані коефіцієнти дискримінантних рівнянь для опорних гідрологічних постів в межах однорідних за умовами формування весняного водопілля районів (підрайонів). При цьому, розв'язальним правилом дискримінації угруповань є встановлення максимального значення дискримінантної функції. По одержаних дискримінантних рівняннях було проведено оцінку значущості дискримінації. Оцінка значущості дискримінації за критерієм лямбда Вілкса λ показала, що середні значення обраних груп значимо різняться. Перевірка достовірності результатів показала, що похибка розрахунків не перевищує 5 %.

Для різних за типом водності весняних водопіль встановлені регіональні залежності (у вигляді модульних коефіцієнтів) для однорідних районів (підрайонів) формування весняного водопілля річок. Це дало змогу здійснювати прогнозування шарів стоку та максимальних витрат води весняного водопілля і для інших річок в межах районування басейну р. Південний Буг, а розроблену методику вважати регіональною.

Представлення прогнозних величин та їх прогнозних забезпеченостей у багаторічному розрізі, що встановлені за трипараметричним гамма-розподілом С.М. Крицького і М.Ф. Менкеля (при врахуванні визначених автором середніх по району співвідношень коефіцієнтів варіації та асиметрії), здійснюється у картографічній формі, що дає можливість просторового моніторингу розмірів очікуваних весняних водопіль.

Регіональна методика довгострокових прогнозів характеристик весняного водопілля в басейні р. Південний Буг обґрунтована й для невивчених у гідрологічному відношенні річок досліджуваної території. Як і для інших річок басейну, прогнозування здійснюється за метеорологічними даними, тобто на основі типізації водопіль за їх водністю і регіональних рівняннях (для модульних коефіцієнтів) або по картосхемах прогнозних модульних коефіцієнтів максимального стоку водопіль (шарів стоку чи максимальних витрат води). В обох випадках одержання стокових величин здійснюється при визначенні їх середньобагаторічних значень (шарів стоку та максимальних витрат води весняного водопілля).

Для визначення середньобаторічних максимальних витрат води весняного водопілля невивчених у гідрологічному відношенні річок за розрахункову прийнята операторна модель формування максимального стоку з використанням на її вході метеорологічних величин – середньобаторічних максимальних снігозапасів та опадів в період весняного водопілля.

В рамках операторної моделі визначені та узагальнені всі вхідні параметри розрахункової методики. При цьому встановлено, що середньобаторічні величини максимальних снігозапасів змінюються в межах басейну р. Південний Буг в напрямку з півночі та північного заходу на південь від 60-50 мм до 30-25 мм. Для одержання середньобаторічних величин опадів періоду весняного водопілля використані регіональні рівняння. Коефіцієнти стоку весняного водопілля представлені у вигляді карт ізоліній. Їх значення зменшуються в межах басейну Південного Бугу у напрямку з північного заходу на південь від 0,60-0,50 до 0,1-0,05.

Параметри, що не вимірюються гідрометеорологічною мережею, одержані чисельним шляхом: значення коефіцієнту нерівномірності схилового припливу становить 12,2; величини середньобаторічної тривалості схилового припливу картовано – вони змінюються в напрямку з північного заходу на південь від 1000 до 200 год; коефіцієнт трансформації водопілля під впливом тривалості руслового добігання коливається в межах від 0,48 до 0,14, а коефіцієнт русло-заплавного регулювання змінюється в діапазоні від 0,69 до 0,33 (при граничних значення для обох випадків рівних 1,0).

Розраховані за методикою середньобаторічні модулі максимальних витрат води весняного водопілля добре узгоджуються з вихідними даними при похибці їх визначення $\pm 16,8$ %. Одержані результати дозволяють рекомендувати операторну модель для визначення середньобаторічних величин максимальних витрат води весняного водопілля для невивчених у гідрологічному відношенні річок в басейні р. Південний Буг.

За визначеними стокоутворюючими характеристиками (максимальними снігозапасами, дощовими опадами та коефіцієнтами стоку) весняного водопілля одержана й інша базова характеристика прогнозної методики – середньобаторічні величини шарів стоку весняного водопілля, що дозволяє їх встановити й для річок, невивчених у гідрологічному відношенні.

Для оцінки впливу майбутніх кліматичних змін на водний режим річок в період весняного водопілля розраховані коефіцієнти змін клімату (за даними кліматичних моделей IPCC (проекту CORDEX) сценарію RCP 4.5 для періоду 2021-2050 рр.), які враховано при визначенні базових

характеристик прогнозної методики – середньобогаторічних шарів стоку та максимальних витрат води весняного водопілля, а також здійснено моделювання шарів весняного стоку в басейні р. Південний Буг у розглядуваний період. Одержані результати показали, що в басейні р. Південний Буг в районі І у період 2021-2050 рр. очікується зменшення середньобогаторічних величин характеристик стоку (шарів стоку та максимальних витрат води) весняного водопілля в середньому по району на 23 % (при $k_{зм}=0,77$), а в районі ІІ: підрайоні Па – на 37 % (при $k_{зм}=0,63$), підрайоні Пб – на 51 % (при $k_{зм}=0,49$), підрайоні Пв – на 75 % (при $k_{зм}=0,25$). Змодельовані за даними кліматичних моделей шари стоку весняного водопілля у період 2021-2050 рр. очікуються нижчими за їх середньобогаторічне значення (встановлене з урахуванням $k_{зм}$), що становить 23 мм.

Виконана оцінка якості регіональної методики довгострокових прогнозів (за період 1966-2015 рр.) та її перевірка на даних незалежних років (за період 2016-2018 рр.) показала, що розроблена методика переважно відноситься до категорій «добра» та «задовільна», що дозволяє рекомендувати її для практичного застосування у діяльності гідропрогностичних підрозділів, у тому числі й невивчених у гідрологічному відношенні річок басейну р. Південний Буг. Завчасність прогнозів характеристик весняного водопілля в басейні р. Південний Буг збільшується зі збільшенням широти геометричних центрів водозборів та коливається для шарів стоку від 46 до 68 діб, а максимальних витрат води – від 21 до 34 діб.

Для автоматизації та прискорення процесу випуску прогнозу весняного водопілля (з супроводом його розвитку у часі при змінних гідрометеорологічних умовах формування весняного стоку річок) авторами розроблено алгоритм програмного прогностичного комплексу «Південний Буг».

Картосхеми прогнозних величин, які будуються у програмному комплексі «Південний Буг», дозволяють оцінити ймовірні гідрологічні небезпеки підтоплення заплавної території річок (включаючи й водопілля річок рідкісної ймовірності перевищення, такі, як 1 раз на 100 років, тобто при забезпеченості 1 %) для своєчасного прийняття управлінських рішень з метою запобігання надзвичайним ситуаціям, зменшення руйнівних наслідків повеней, забезпечення безаварійного пропуску льодоходу та паводкових вод.

Ключові слова: регіональна методика, довгострокове прогнозування, районування, гідрометеорологічні чинники, максимальний стік, весняне водопілля.

SUMMARY

The monograph develops a regional methodology of long-term forecasts of characteristics of spring flood of the rivers in the Pivdenny Buh river basin is developed. The methodology based on the preliminary typification of floods by water content in choosing the main factors of spring runoff formation, establishing regional parameters (within the basin zoning by a set of hydrometeorological factors) for long-term forecasting of runoff layers and maximum discharge, determining their probabilistic values over many years.

Researches of temporal trends and cyclicity in long-term series of maximum runoff characteristics of spring floods in the Pivdenny Buh basin showed that the decrease of spring runoff of rivers in recent decades is caused by climate change due to rising air temperature in cold period, deficiency of stable snow covers and significant reducing the depth of soil freezing (since 1989); there is a rescheduling tendency of maximum snow reserves and spring floods to earlier dates.

The time series of the maximum discharge and runoff layers of spring floods are synchronous in terms of cyclical fluctuations, and from the end of the 1980s to 2015 the low-water phase was observed on the rivers.

Analysis of the total curves of runoff layers and maximum discharge of spring flood and their difference integral curves in the Pivdenny Buh river basin (at posts with the largest operating hydro-electric power stations on them) showed that in the modern period of spring flood formation in the basin, the impact of river control on the maximum runoff is not significant, the deviations on the total curves are mainly explained by natural cycles and the impact of climate change on river water content.

In the research using the methods of factor and cluster analyzes; hydrological zoning was performed under the conditions of spring flood of rivers in the basin of the Pivdenny Buh, which allowed to distinguish two hydrological regions (region I and region II with subregions IIa, IIb, IIc). The analyzed natural conditions have shown that within limits of the carried out hydrological zoning, these regions have specific features of spring floods formation.

Data from long-term meteorological, agrometeorological and hydrological observations in the Pivdenny Buh river basin (as of 2015) were used as input information for the development of the methodology, using data from observations in the VelykyiKuyalnyk and Tiligul rivers.

To typify the water content of spring floods, the method of discriminant analysis by the formed vector-predictor was used, to which the main factors of

spring runoff formation of the considered territory were selected (by the method of factor analysis) – maximum water reserves in snow cover, precipitation and maximum soil freezing depth. Three groups of water content (high, medium and low) of floods were distinguished and the coefficients of discriminant equations for reference hydrological station within the homogeneous areas (subdistricts) under the conditions of spring floods formation were obtained. In this case, the decisive rule of discrimination groups was to set the maximum value of the discriminant function. Based on the obtained discriminant equations, the estimation of significance of discriminant function was assessed. Assessment of the significance of discrimination according to the Wilks criterion λ showed that the average values of the selected groups differed significantly. Verification of the results showed that the calculating error did not exceed 5 %.

Regional dependences (in the form of modular coefficients) for homogeneous regions (subregions) of spring flood formation have been established for spring floods with different types of water content. This made it possible to predict the runoff layers and maximum discharge of the spring flood for other rivers within the zoning of the Pivdenny Buh river basin, and to consider the developed methodology as regional.

Representation of predicted values and their predicted sufficiency in a long-term context, established by the three-parameter gamma distribution of S.M. Kritsky and M.F. Menkel (taking into account the average-region ratios of coefficients of variation and asymmetry determined by the author) is carried out in cartographic form, which allows spatial monitoring of the size of the expected spring floods.

The regional methodology of long-term forecasts of the characteristics of spring floods in the Pivdenny Buh river basin is also justified for the hydrologically unexplored rivers of the study area. As for other rivers of the basin, forecasting is carried out according to meteorological data, that is on the basis of typification of floods by their water content and regional equations (for modular coefficients) or by maps of forecast modular coefficients of maximum runoff (runoff layers or maximum discharge). In both cases, the receipt of runoff values is carried out by determining their average long-term values (runoff layers and maximum water flow of spring flood).

To determine the average long-term maximum discharge of spring floods of hydrologically unexplored rivers, the operator model of maximum runoff formation using meteorological values at its inlet (average long-term maximum snow reserves and precipitation during spring flooding) was used.

Within the operator model, all input parameters of the calculation methodology are defined and generalized. At the same time, it was established that the average long-term values of maximum snow reserves vary within the basin of the Pivdenny Buh in the direction from north and northwest to south, from 60-50 mm to 30-25 mm. Regional equations were used to obtain the average long-term prediction values of the spring flood period. Runoff coefficients of spring flood were presented in the form of isoline maps. Their values decrease within the basin of the Pivdenny Buh in the direction from northwest to south from 0.60-0.50 to 0.1-0.05.

Parameters that are not measured by the hydrometeorological network were obtained numerically: the value of the irregularity coefficient of the slope inflow was 12.2; the values of the average long-term duration of the slope inflow were mapped – they changed in the direction from northwest to south from 1000 to 200 hours; the coefficient of transformation of floods under the influence of the duration of channel runoff ranged from 0.48 to 0.14, and the coefficient of channel-floodplain regulation varied in the range from 0.69 to 0.33 (with limit values for both cases equal to 1.0).

The average long-term modules of the maximum discharge of spring flood calculated by the method conforming with the initial data with an error of their determination $\pm 16,8\%$. The obtained results allow to recommend an operator model for determining the long-term average values of the maximum discharge of spring flood for hydrologically unexplored rivers in the basin of the Pivdenny Buh.

According to certain runoff-forming characteristics (maximum snow reserves, rainfall and runoff coefficients) of spring flood, another basic characteristic of the forecast method was obtained – average long-term values of spring flood runoff layers, which allows to establish them for rivers not studied hydrologically.

To assess the impact of future climate change on the water regime of rivers in the spring flood period, climate change coefficients were calculated (according to IPCC climate models (CORDEX project) of RCP 4.5 scenario for the period 2021-2050), which were taken into account in determining the basic characteristics of forecasting methods – average long-term runoff layers and maximum spring discharge rates; and modeling of spring runoff layers in the Pivdenny Buh basin in affected period was made. The results showed that in the Pivdenny Buh basin in the region I in the period 2021-2050 was expected to reduce the long-term average characteristics of runoff (runoff layers and maximum water flow) of spring floods on average by 23 % ($k_{ch} = 0.77$), and in region II: sub-district IIa – by 37 % ($k_{ch} = 0.63$), sub-region IIb – by 51 %

($k_{ch} = 0.49$), sub-region II_B – by 75 % ($k_{ch} = 0.25$). The layers of spring water runoff modeled according to climatic models in the period of 2021-2050 were expected to be lower than their long-term average value (established taking into account), which was 23 mm.

The performed assessment of the quality of the regional methodology of long-term forecasts (for the period 1966-2015) and its verification on the data of independent years (for the period 2016-2018) showed that the developed methodology mainly belongs to the category «good» and «satisfactory», which allows to recommend it for practical application in activity of hydroprognostic divisions, including the rivers of the Pivdenny Buh basin not studied hydrologically. The timeliness of forecasts of the characteristics of spring floods in the basin of the Pivdenny Buh increases with increasing latitude of geometric centers of catchments and ranges for runoff layers from 46 to 68 days, and maximum discharge – from 21 to 34 days.

To automate and accelerate the process of output a spring flood forecast (accompanied by its development over time under changing hydrometeorological conditions of spring river runoff formation), the author of the study developed an algorithm for the software forecasting complex «Pivdenny Buh».

Map-scheme of forecast values, which are built in the software complex «Pivdenny Buh» allows to assess the probable hydrological hazards of flooding of floodplains (including floodplains of rivers with a rare probability of exceedance, such as 1 per 100 years, or with 1 % of sufficiency) for timely adoption of management solutions to prevent emergencies, reduce the devastating effects of floods, ensure the safe passage of drift ice and flood waters.

Keywords: regional methodology, long-term forecasting, zoning, hydrometeorological factors, maximum runoff, spring flood.

Наукове видання

ШАКІРЗАНОВА ЖАННЕТТА РАШИДІВНА,

*доктор географічних наук, професор
Одеський державний екологічний університет*

ДОКУС АНГЕЛІНА ОЛЕКСАНДРІВНА,

*кандидат географічних наук
Одеський державний екологічний університет*

**ДОВГОСТРОКОВЕ ПРОГНОЗУВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК
ВЕСНЯНОГО ВОДОПІЛЛЯ В БАСЕЙНІ Р.ПІВДЕННИЙ БУГ**

Монографія

Одеський державний екологічний університет
65016, м. Одеса, вул. Львівська, 15

Підписано до друку 09.11.2021.
Обсяг 14,18 друк. арк. Формат 60х84/16.
Зам. № 1853/21. Наклад 60 прим.
Віддруковано з готового оригінал-макета

Надруковано у ФОП Бондаренко М. О.
м. Одеса, вул. В.Арнаутська, 60
т. +38 048 700 11 55
info@aprel.od.ua

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи
до державного реєстру видавців ДК № 4684 від 13.02.2014 р.
