

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ЕКОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Гідрометеорологічний інститут
Кафедра гідрології суші

Бакалаврська кваліфікаційна робота

на тему: Розрахунки річного стоку в басейнах річок Псел та Ворскла

Виконав студент 3 року навчання
групи МСГ-23б
спеціальності 103 Науки про Землю
Кривоपालов Ілля Анатолійович

Керівник канд. геогр. наук, доцент
Бурлуцька Марія Едуардівна
Консультант _____

Рецензент канд. геогр. наук, доцент
Романчук Марина Євгенівна

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ЕКОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Інститут, факультет Гідрометеорологічний інститут
Кафедра гідрології суші
Рівень вищої освіти бакалавр
Спеціальність 103 Науки про Землю
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри гідрології суші
Д-р.геогр.наук., проф. Шакерзанова Ж.Р.

“ 26 квітня 2019 ”

З А В Д А Н Н Я
НА БАКАЛАВРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Кривопалову Іллі Анатолійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту Розрахунки річного стоку в басейнах річок Псел та Ворскла

керівник проекту Бурлуцька Марія Едуардівна, канд.геогр.наук,
доцент.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від «07» грудня 2018 р.
№343-С

2. Строк подання студентом проекту 17.05.2019

3. Вихідні дані до проекту Матеріали ОГХ, , гідрологічні щорічники,
Ресурси поверхневих вод т.6 вып.2. Середньорічні модулі стоку

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1.Статистична обробка часових рядів середньорічних модулів стоку.

2.Визначення циклічності по всіх постах басейнів річок Псел і Ворскла.

3.Обґрунтування результатів розрахунку норми річного стоку в басейнах річок Псел і Ворскла.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

1.Карта - схема розташування гідрологічних постів в басейнах річок Псел та Ворскла.

2.Різницеві інтегральні криві.

3. Залежність середніх модулів річного стоку від середньої висоти водозборів. Залежності середніх модулів стоку, приведені до умовної висоти $H=200$ м, від лісистості, широти геометричних центрів водозборів.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання 26.04.2019

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту	Термін виконання етапів проекту	Оцінка виконання етапу	
			у %	за 4-х бальною шкалою
1.	Збір вихідних матеріалів по річному стоку басейнів річок Псел і Ворскла.	29.04-03.05.2019	80	добре
2.	Підготовка матеріалів основних фізико-географічних умов в басейнах досліджуваних річок.	04.05.2019-07.05.2019	90	вільмінно
3.	Статистичний аналіз часових рядів річного стоку з метою визначення коефіцієнтів варіації, асиметрії та середнього значення рядів. Визначення середньоквадратичних похибок.	08.05.2019-10.05.2019	90	відмінно
4.	Визначення наявності у розрахункових періодах рядів річного стоку маловодних та багатоводних суміжних фаз.	11.05.2019-12.05.2019	80	добре
	Рубіжна атестація	13.05-19.05.2019		
5.	Обґрунтування методики для розрахунку норми річного стоку.	12.05.2019-14.05.2019	80	добре
6.	Підготовка текстової частини і оформлення проекту.	14.05.2019-15.05.2019	80	добре
	Перевірка на плагіат	20.05-23.05.2019		
	Підготовка презентації і доповіді	23.05-02.06.2019		
	Інтегральна оцінка виконання етапів календарного плану (як середня по етапам)		83	добре

Студент _____ Кривопапов І.А.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник проекту _____ Бурлуцька М.Е.

ЗМІСТ

Вступ	6
1 Коротка фізико-географічна характеристика басейнів річок Псел і Ворскла	7
1.1 Геологічна будова та рельєф	7
1.2 Ґрунти та рослинність	9
1.3 Гідрологічна вивченість та особливості режиму стоку річок ..	11
2 Існуючі методи розрахунку річного стоку.....	14
2.1 Розрахунок статистичних параметрів річного стоку при наявності тривалих рядів спостережень	15
2.2 Вибір розрахункового періоду для визначення норми річного стоку. Методи згладжування хронологічних рядів	18
2.2.1 Метод різницевих інтегральних кривих	20
2.3 Обчислення статистичних параметрів річного стоку при коротких рядах спостережень	21
2.3.1 Приведення статистичних параметрів річного стоку рядів спостережень до багаторічного періоду графічним способом	22
2.3.2 Приведення статистичних параметрів коротких рядів спостережень до багаторічного періоду графо-аналітичним методом	24
2.3.3 Аналітичний спосіб приведення статистичних параметрів річного стоку	26
2.3.4 Приведення ряду до багаторічного періоду методом коефіцієнтів	28
2.4 Визначення статистичних параметрів річного стоку за відсутності гідрометричних спостережень	29

3	Статистична обробка рядів середньорічних модулів стоку в басейнах річок Псел та Ворскла	32
3.1	Методи розрахунку статистичних параметрів часових рядів	32
3.1.1	Метод моментів	32
3.1.2	Метод найбільшої правдоподібності	35
3.2	Точність обчислення параметрів статистичного розподілу ...	36
3.3	Статистична обробка рядів норм річного стоку в басейнах річок Псел та Ворскла	38
4	Удосконалення розрахунку норм річного стоку в басейнах річок Псел та Ворскла	44
4.1	Визначення та аналіз циклічності в розрахункових рядах норм річного стоку в басейнах річок Псел та Ворскла	44
4.2	Обґрунтування методики для розрахунку норм річного стоку	45
4.3	Перевірочні розрахунки	50
	Висновки.....	52
	Перелік посилань	54
	Додаток А.....	55
	Додаток Б.....	56
	Додаток В.....	69
	Додаток Г.....	70

ВСТУП

Бакалаврська кваліфікаційна робота присвячений розрахунку норми річного стоку як основній гідрологічній характеристиці.

Норма річного стоку має важливе значення при розрахунках стоку та водогосподарському проектуванні, так як вона визначає потенційні водні ресурси даного району або басейну.

Середнє значення річного стоку за достатньо тривалий час, який включає кілька (не менш двох) повних циклів коливань стоку, називається нормою річного стоку. Крім цього, норма річного стоку як результуючий елемент водного балансу, обумовлений властивим даному географічному ландшафту співвідношенням тепла та вологі, є при даних кліматичних умовах і рівні господарської діяльності людини стійкою гідрокліматичною характеристикою даного району.

При встановленні норми річного стоку треба пам'ятати про те, що часові ряди мають деяку закономірність у вигляді групування багатоводних та маловодних років різної тривалості. Врахувати цю обставину можна внесенням в розрахунковий ряд річного стоку однакової кількості багатоводних або маловодних груп водності. В протилежному разі можна отримати велику помилку.

Ціль бакалаврської кваліфікаційної роботи – удосконалення розрахунку норми річного стоку з урахуванням даних по 2015 рік.

Об'єкт визначення – річний стік в басейнах річок Псел і Ворскла.

Робота складається з чотирьох глав, в яких приводиться фізико – географічна характеристика досліджуваного району, аналіз методів розрахунку норми річного стоку як для вивчених, так і для невивчених в гідрологічному плані річок, аналіз результатів статистичної обробки часових рядів норми річного стоку, будова і аналіз різницевої інтегральної кривої та обґрунтування отриманих результатів розрахунку норми річного стоку.

1 КОРОТКА ФІЗИКО – ГЕОГРАФІЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА БАСЕЙНІВ РІЧОК ПСЕЛІ ВОРСКЛА

1.1 Геологічна будова та рельєф

Територія досліджуваного району розташована в лісостепової та степової зонах.

Фізико - географічна карта басейнів річок Псел, Ворскла представлена на рис. 1.1.

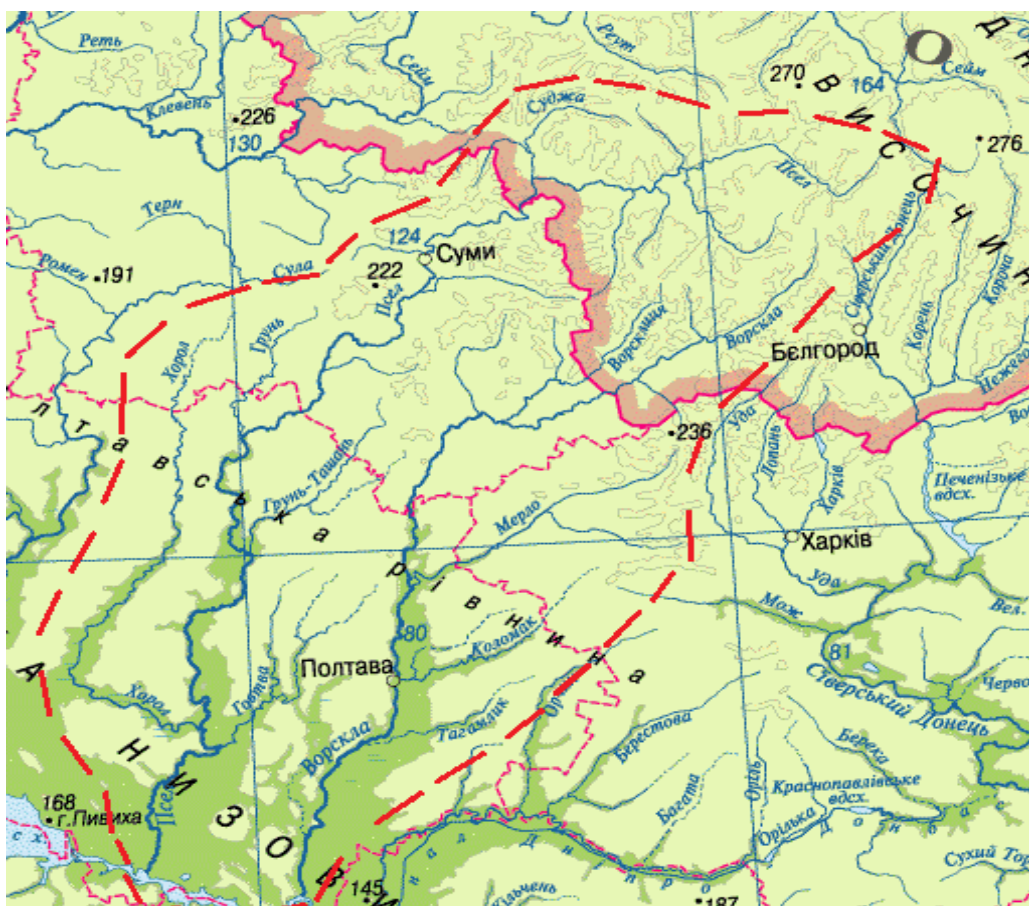


Рисунок 1.1 – Фізико – географічна карта басейнів річок Псел і Ворскла

На топографічному профілі річки Псел відрізняються такі відносні деформації: Каменська, Гадяцька, Савинцовська. Райони вказаних деформацій відрізняються характерними геоморфологічними особливостями.

Долина річки Псел на ділянці Каменської деформації значно звужена, головним чином за рахунок заплавної тераси. В результаті відхилення русла річки на схід Псел підмиває лівий берег, профіль має вогнутий характер.

Річка Псел бере свій початок на Середньоруській височині в Курській області Росії і далі протікає по території України (у межах Сумської та Полтавської областей). Довжина річки - 717 км, площа басейну - 22800 км². Русло річки звивисте, береги круті, місцями обривисті. Дно піщане, на плесах - іловато- піщане. Заплава широка, на багатьох ділянках порізана численними старицями, заросла очеретом і осокою. Живлення переважно снігове, в весняну повінь (березень-травень) проходить до 70% річного стоку, літньо - осіння межень - низька.[1]

Основні притоки р. Псел: Суджа, Грунь, Хорол, Голтва. В басейні річки розташовані міста Суми та Гадяч.

Замерзає ріка в грудні, розкривається - в кінці лютого - на початку квітня.

Ворскла несе свої води по території Сумської та Полтавської областей. Довжина - 464 км. Площа басейну річки -14700 км². Свій початок річка бере з західних схилів Середньоруської височини (в Білгородській області Росії). Майже на всьому протязі правий берег долини крутий, піднесений, порізаний ярами, лівий — низовинний.

В районі долини Ворскли немає ознак активних структур, а саме не зменшується ширина заплавної тераси, не зменшується міцність алювію пойми.

Русло річки рясніє піщаними перекатами і косами. Широка заплава зайнята більшою частиною луками, що чергуються з листяними лісами, іноді зі старицями і болотами. Місцями уздовж річки тягнеться широка смуга сипучих пісків, що утворюють дюни. В середній і нижній течії річка має ширину 35-40 м, іноді перевищує 100 м. Головні притоки: Ворскліца, Боромля, Мерла. На берегах Ворскли розташовані міста: Полтава, Кобеляки. Вода річки використовується для промислового і побутового

водопостачання, а також для зрошення земель.[1]

1.2 Ґрунти та рослинність

На території р. Псел знаходяться опідзолені ґрунти - займають друге місце по площі поширення в лісостеповій частині басейну. Зустрічаються вони окремими островами або, частіше більш-менш суцільними смугами в прирічкових сильно еродованих зонах правобережного корінного плато, що примикає до Дніпра, до якого зазвичай і приурочувалися корінні ліси, в даний час значно вирубані.

Значно менше площі займають інші, вельми різноманітні, ґрунти. До їх числа відносяться піщані ґрунти, що залягають майже виключно на піщаних (борових) терасах. Такі тераси зустрічаються в долинах усіх річок лівобережжя у Дніпра та його приток Десни, Псла, Сули та ін. Тут вони зустрічаються у вигляді смуг шириною 1-5 км. На правобережжі їх значно менше і зустрічаються вони лише місцями.[1]

Також в заплавах притоків Дніпра сформувалися лучні і чорноземно-лучні, переважно засолені ґрунти. Піщані тераси річок, зокрема і Дніпра, вкриті слаборозвиненими дерновими ґрунтами, на рівнинних піщаних масивах формуються піщано - чорноземні ґрунти, які характеризуються великою потужністю.

На формуванні стоку впливає рельєф, геологічна будова, ґрунти, але також і рослинний покрив. Характер і стан рослинного покриву мають дуже важливе значення для попередження розвитку процесів ерозії. Рослинність своїм корінням скріплює ґрунт, створює шорстку поверхню, і цим самим створює більшу водопроникність, сприяючи переведенню частини поверхневого стоку в підґрунтовий.

Болота приурочені до долин річок. У долинах річок, головним чином лівобережних приток Дніпра, болота тягнуться на десятки кілометрів. Площа кожного з них нерідко становить понад 1000 га. Розподілені вони нерівномірно. Правобережно-Дніпровський округ заболочений на 0,5%, Придніпровський,

Лівобережно-Дніпровський - на 3% і Середнеруський - на 0,1%. Середня глибина торф'яної поклади коливається в межах 1,5 - 2,5 м. Торф низинний, здебільшого середньої зольністю 25 - 30% і нейтральною або лужною реакцією.

Переважна частина болотної площі зайнята евтрофними болотами і тільки незначна її частина, розміщена зазвичай по прітерасним положенням надзаплавних терас, представлена мезотрофними болотами. Евтрофні болота за характером рослинних угруповань підрозділяються на трав'яні, трав'яно-гіпнові і чорновільшнякові групи боліт. Трав'яні болота є більш розповсюдженими ніж трав'яно - гіпнові. У рослинному покриві їх панують угруповання очерету і осок, а також рогозу, очерету, хвоща і манника водного.

Середньодніпровські райони розвитку соляного карсту розташовуються у межиріччі Десна - Ворскла в межах Дніпровсько - Донецької карстової області. У геологічному розрізі середній частини цього великого палеозойського прогину на опущеному до глибини 3 - 5 км кристалічному фундаменті встановлено присутність соленосних товщ нижнього і середнього під'ярусів франського ярусу, сульфатно - галогенною товщі верхнього під'ярусу франського ярусу. У процесі тектонічного розвитку прогину, складкоутворення осадових відкладень, що накопичилися в ньому за час від середнього палеозою до третинного періоду, і розривних порушень у них, багаторазові видавлювання пластичної девонської солі в вищерозміщених комплексах осадових утворень призвели до формування соляно - купольних структур [1].

Поверхня басейну кожної річки впливає на характеристики річного стоку як безпосередньо, обумовлюючи довжину, похил і форму схилів, падіння та морфометричні особливості русел тощо, так і через інші компоненти ландшафту, які тісно пов'язані з рельєфом (грунти і рослинність) [2].

1.3 Гідрологічна вивченість та особливості режиму стоку річок

Річки є важливими водними об'єктами України. Вони відіграють вклику

роль в економічній і суспільній сферах держави, тому приділяється увага до визначення змін які відбуваються на річках.[3]

Карта розташування гідрологічних постів представлена на рис.1.2.

У басейнах річок Псел, Ворскла гідрологічні спостереження за середньорічними модулями стоку ведуться на 17 гідрологічних постах.

На дослідженій території спостерігалась найбільша площа водозбору на р. Псел – с. Запсілля $F= 21800 \text{ км}^2$, а найменша площа водозбору на р. Ворскла – с. Яковлеве складає $F=56 \text{ км}^2$, найбільша залісенність на р. Ворсклиця - с. Березівка складає 12%, а найменша залісенність спостерігалась на п'яти постах і склала $<1\%$. Озерність на всіх постах складає $<1\%$.

Основні гідрологічні характеристики басейнів річок Псел, Ворскла наведені у табл. А.1 (додаток А).

По території гідрологічні пости розташовані рівномірно. З них на головних річках розташовано по 5 постів. Розподіл постів за довжиною спостережень і за площею водозборів наведений у таблицях 1.1 та 1.2.

Найбільш тривалий період спостережень відмічений на р. Хорол – м. Миргород (73 років) та р. Псел – с. Запсілля (74 років), найбільш короткий (25 років) відмічений на р. Пена – с. Пени та р. Ворскла – с. Яковлеве.

Таблиця 1.1 – Розподіл постів за довжиною спостережень в басейнах річок Псел та Ворскла

Кількість років спостережень					Усього
<20	20 – 40	40 – 65	65 – 80	>80	
0	6	8	3	0	17

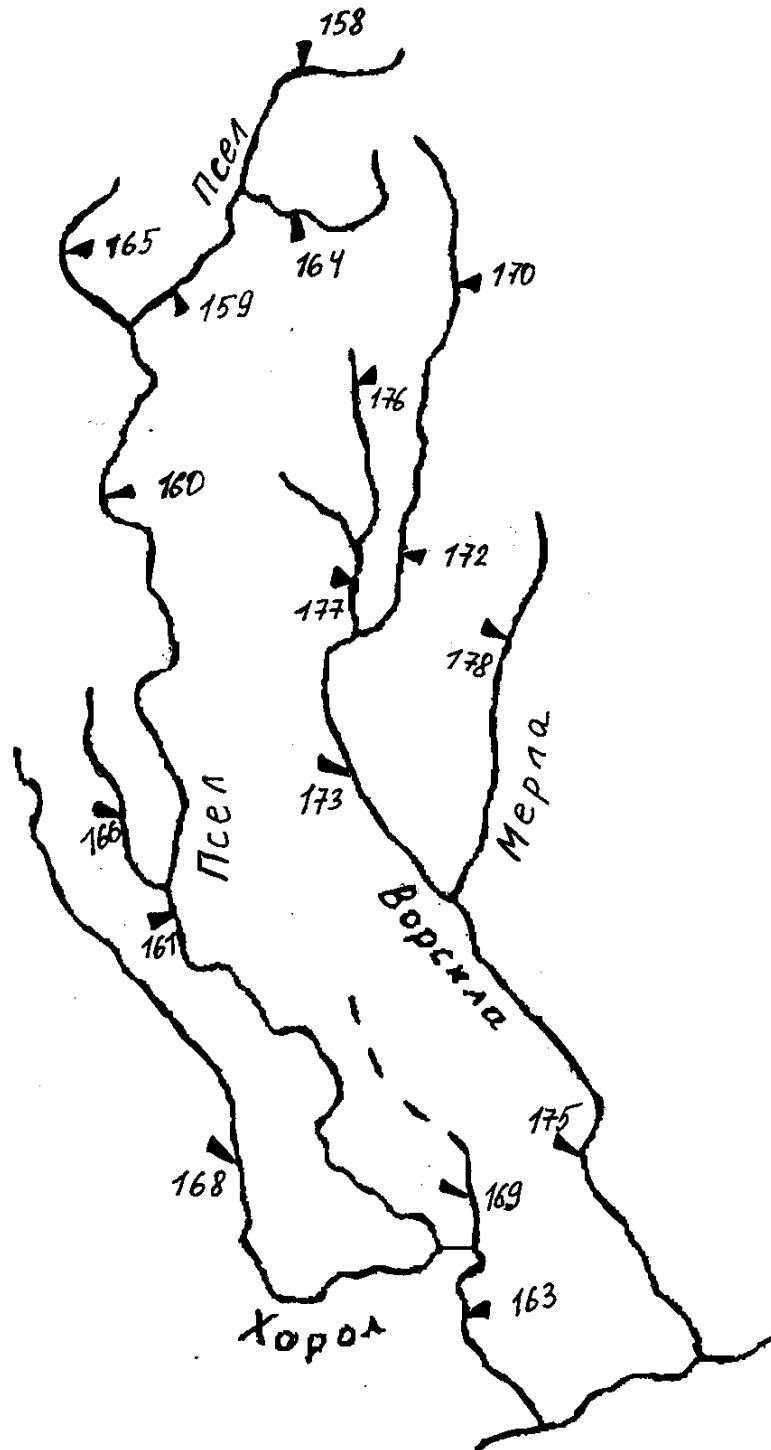


Рисунок 1.2 – Карта – схема розташування гідрологічних постів в басейнах річок
Псел і Ворзжа

Таблиця 1.2 – Розподіл постів за площею водозборів в басейнах річок Псел та Ворскла

Площа, км ²					Усього
<500	500-2000	2000-5000	5001-10000	>10000	
2	9	1	2	3	17

Прилегла до долини річки місцевість низовинна - рівнинна, використовується під сільськогосподарські угіддя.

Долина річки неявно виражена, пряма, схили дуже пологі, непомітно зливаються з прилеглою місцевістю, слабо розсічені, складені супіску, використовуються під сільськогосподарські угіддя, частково зайняті присадибними будівлями села.

Річки району мають змішане живлення, причому в північній частині території роль талого стоку у формуванні річного стоку значно більше, ніж у південній. Пайова участь дощових вод у річному стоці в південній частині території в порівнянні північній помітно збільшується. Співвідношення снігового та дощового живлення змінюється в різні за водністю роки. Стік весняного водопілля в багатоводні роки складає 70 - 80% річного стоку, в середні за водністю роки - 60 - 70%, а маловодні 50 - 60%.

В період межені спостерігаються невеликі дощові паводки. Вищі рівні дощових паводків тільки на окремих річках рідко наближаються за величиною до рівнів весняного водопілля [1].

2 ІСНУЮЧИ МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ НОРМИ РІЧНОГО СТОКУ

Однією з основних характеристик водних ресурсів річок є норма стоку.

Важливість знання норми річного стоку полягає у тому, що вона є базовою та стійкою характеристикою водних ресурсів даного регіону.

Нормою стоку називається його середня величина за багаторічний період з незмінними ландшафтно-географічними умовами, які відносяться до

сучасної геологічної епохи та з однаковим рівнем господарського освоєння басейну річки.

Керуючись нормативним документом СНіП 2.01.14 – 83 [4], діючим в Україні, визначення розрахункових гідрологічних характеристик (Мінімального, максимального річного стоку) здійснюється за такими схемами:

- 1) За наявністю гідрометричних спостережень – безпосередньо за цими даними;
- 2) При недостатності гідрометричних спостережень – шляхом преведення їх до багаторічного періоду за даними річок – аналогів з більш тривалими рядами спостережень;
- 3) За відсутності гідрометричних спостережень - за формулами з використанням даних річок – аналогів або інтерполяцією, яка ґрунтується основою на сукупності даних спостережень всієї мережі гідрометричних станцій та постів того чи іншого району або більш великої території, включаючи матеріали інженерно – гідрометричних досліджень.

При цьому застосовується метод гідрологічної аналогії а просторової інтерполяції параметрів річкового стоку з використанням карт гідрологічних характеристик.

При належному обґрунтуванні допускається використання інших методів рорахунку з оцінкою їх надійності й точності[4].

Багаторічний ряд спостережень, за яким визначається норма стоку, повинен включати не менше двох повних циклів коливань водності. Цикли водності складаються з двох фаз – багатоводної та маловодної.

2.1 Розрахунок статистичних параметрів річного стоку при наявності тривалих рядів спостережень

Норма річного стоку при тривалому періоді спостережень (N років) визначається як середньоарифметичне значення річних величин стоку

$$\bar{q}_N = \frac{q_1 + q_2 + \dots + q_{n-1} + q_n}{N} = \frac{\sum_{i=1}^N q_i}{N}, \quad (2.1)$$

де q_1, q_2, \dots, q_n – середньорічні величини стоку; N – кількість років спостережень.

Внаслідок недостатньої тривалості фактичних рядів спостережень за річним стоком, які частіше за все, не перевищують 60-80 років та складають 20-40 років, норма річного стоку, розрахована за формулою (2.1), буде відрізнятися від істинного середнього значення \bar{q}_N при $N \rightarrow \infty$ на деяку величину σ_{q_n} , тобто

$$\bar{q}_n = \bar{q}_N \pm \sigma_{q_n}, \quad (2.2)$$

де \bar{q}_n - середня величина річного стоку за обмежений період спостережень (n років);

σ_{q_n} - середня квадратична похибка n -річної середньої.

Для оцінки точності визначення норми стоку річок використовують відносне значення середньої квадратичної похибки. Так, якщо виразити σ_{q_n} у відсотках від \bar{q}_n , то отримаємо відносну середню квадратичну похибку норми стоку, яка розрахована за обмеженим рядом спостережень n років:

$$\sigma_n = \pm \frac{\sigma_q}{\bar{q}_n \sqrt{n}} \cdot 100\% = \pm \frac{100 C_v}{\sqrt{n}} \%, \quad (2.3)$$

де $C_v = \frac{\sigma_q}{\bar{q}_n}$ - коефіцієнт варіації річних величин стоку за n років

спостережень, прийнятих для визначення норми стоку.

Коефіцієнт варіації рекомендується визначати за методом моментів:

$$C_v = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (K_i - 1)^2}{n - 1}}, \quad (2.4)$$

де $K_i = \frac{q_i}{\bar{q}_n}$ - модульний коефіцієнт.

Стандартна похибка коефіцієнта варіації σ_{C_v} обчислюється за формулою:

$$\sigma_{C_v} = \sqrt{\frac{1 + C_v^2}{2n}} 100\%. \quad (2.5)$$

Випадкові середні квадратичні помилки вибірових середніх визначаються за наближеною залежністю:

$$\sigma_{\bar{q}} = \frac{\sigma_q}{\sqrt{n}} \sqrt{\frac{1 + r_1}{1 - r_1}}, \quad (2.6)$$

яка застосовується при коефіцієнтах автокореляції між суміжними членами ряду ($r_1 \leq 0.5$).

При коефіцієнтах автокореляції ($r_1 \geq 0.5$) використовується формула:

$$\sigma_{\bar{q}} = \frac{\sigma_q}{\sqrt{n}} \sqrt{1 + \frac{2}{n} \cdot \frac{r_1}{1 - r_1} \cdot n \cdot \frac{1 - r_1^n}{1 - r_1}}, \quad (2.7)$$

де r_1 - коефіцієнт кореляції між суміжними величинами стоку.

У свою чергу r_1 розраховується за формулою:

$$r_1 = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} (q_i - \bar{q}_1) \cdot (q_{i+1} - \bar{q}_2)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n-1} (q_i - \bar{q}_1)^2 \cdot \sum_{i=2}^n (q_i - \bar{q}_2)^2}}, \quad (2.8)$$

$$\text{де } \bar{q}_1 = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{q_i}{n-1}; \quad \bar{q}_2 = \sum_{i=2}^n \frac{q_i}{n-1}.$$

Для більшої частини території СНГ норма річного стоку розраховується як його середнє значення за такою тривалістю спостережень, при якій воно є достатньо стійким для практичних розрахунків, тобто з похибкою не більше 5% (для зони достатнього зволоження), або 10% (для зони недостатнього зволоження), та з похибкою коефіцієнта варіації $\sigma_{C_v} \leq 15\%$.

2.2 Вибір розрахункового періоду для визначення норми річного стоку. Методи згладжування хронологічних рядів

Циклічність коливань річного стоку тієї чи іншої річки можна досліджувати за хронологічними графіками.

Однак ці календарні графіки зміни річних величин стоку не завжди дають достатньо повне уявлення про циклічні коливання стоку, внаслідок наявності малих циклів на загальному фоні багаторічних коливань водності річки.

Наявність достатньо суттєвих випадкових коливань річного стоку заважає виявленню закономірностей їх часового ходу, які виражені у формі довготривалих циклів зміни річного стоку.

Для виявлення таких циклів застосовуються засоби згладжування або фільтрації.

Ковзне згладжування коливань річного стоку визначають за формулою:

$$\tilde{q}_i = \frac{1}{T} \sum_{k=-\frac{T-1}{2}}^{\frac{T-1}{2}} q_{i+k}, \quad (2.9)$$

де T – інтервал осереднення (частіше за усе з практичною метою він дорівнює 3 – згладжування за трьохрічками або 5 – згладжування за п'ятирічками).

При лінійному згладжуванні хронологічних графіків за трьохрічками:

$$\begin{aligned} \tilde{q}_1 &= \frac{1}{6}(5q_1 + 2q_2 - q_3), \\ \tilde{q}_2 &= \frac{1}{3}(q_1 + q_2 + q_3), \\ \tilde{q}_3 &= \frac{1}{3}(q_2 + q_3 + q_4), \\ &\cdot \\ &\cdot \\ &\cdot \\ \tilde{q}_{n-1} &= \frac{1}{3}(q_{n-2} + q_{n-1} + q_n), \\ \tilde{q}_n &= \frac{1}{6}(5q_n + 2q_{n-1} - q_{n-2}). \end{aligned} \quad (2.10)$$

Лінійне згладжування хронологічних графіків за п'ятирічками:

$$\begin{aligned}
\tilde{q}_1 &= \frac{1}{5}(3q_1 + 2q_2 + q_3 - q_5), \\
\tilde{q}_2 &= \frac{1}{10}(4q_1 + 3q_2 + 2q_3 + q_4), \\
\tilde{q}_3 &= \frac{1}{5}(q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + q_5), \\
&\cdot \\
&\cdot \\
&\cdot \\
\tilde{q}_{n-1} &= \frac{1}{5}(q_{n-4} + q_{n-3} + q_{n-2} + q_{n-1} + q_n), \\
\tilde{q}_n &= \frac{1}{10}(4q_n + 3q_{n-1} + 2q_{n-2} + q_{n-3}).
\end{aligned} \tag{2.11}$$

Якщо після першого етапу суттєвого згладжування не відбулося, то можна виконати повторне згладжування тим же багаточленом.

Недоліком методу лінійного фільтру є те, що згладжений член ряду має той же ваговий коефіцієнт, що й сусідні елементи. В результаті може статися зміщення меж переходу з однієї фази водності до іншої, особливо при великих T . Зараз є велика кількість інших методів математичних фільтрів, за допомогою яких виявляють періодичні складові в коливальних рядах. Серед них є не тільки лінійні, але й нелінійні фільтри. Прикладом нелінійного фільтру є біноміальний, який достатньо добре описаний у підручнику «Статистические методы в гидрологии» А.В. Рождественського та А.І.Чеботарьова [5]. Досить часто в практиці розрахунків використовуються різницеві інтегральні криві.

2.2.1 Метод різницевих інтегральних кривих

Різницеві інтегральні криві відхилень річних величин стоку від його середнього значення будують у відносних величинах, тобто у модульних коефіцієнтах. Для побудування такої кривої послідовно сумують відхилення модульних коефіцієнтів хронологічного ряду від їх середнього багаторічного значення, який дорівнює одиниці.

Поточні ординати різницевої інтегральної кривої на кінець t -го року від початку побудування кривої визначають за рівнянням:

$$\sum_{i=1}^t (K_i - 1) = f(t), \quad (2.12)$$

де K_i - модульний коефіцієнт.

При побудуванні різницевої інтегральної кривої розраховують наростаючу суму відхилень з урахуванням знаку.

Різницева інтегральна крива має ту властивість, що тангенс кута α прямої, яка поєднує дві точки інтегральної кривої із віссю абсцис, характеризує середню величину підінтегральної функції за період m років, тобто:

$$\operatorname{tg} \alpha = (K_i - 1)_{cp} = \frac{l_k - l_n}{m}, \quad (2.13)$$

де l_k, l_n - відповідно кінцева та початкова ординати інтегральної кривої для періоду часу, який розглядається;

m - число років у періоді часу.

Період часу, для якого об'єднуюча пряма лінія інтегральної кривої відхиляється вгору відносно осі абсцис та значення $(K_i - 1)_{cp}$ позитивне, відповідає багатоводній фазі коливань стоку[6].

Період же, для якого об'єднуюча лінія нахилена вниз та $(K_i - 1)_{\text{нб}}$ має негативне значення, відповідає маловодній фазі.

2.3 Обчислення статистичних параметрів річного стоку при коротких рядах спостережень

Короткими вважають ряди, які не задовольняють принципу репрезентативності, тобто не мають повних циклів коливань водності, а середня квадратична похибка середнього значення ряду не перевищує $\pm 10\%$. Відповідно СНіП 2.01.14-83 [4] у таких випадках виконується приведення статистичних параметрів розподілу до багаторічного періоду за допомогою річок-аналогів, які мають тривалі ряди спостережень за стоком і відповідають вимогам репрезентативності.

При виборі річки-аналога необхідно дотримуватись таких вимог:

- щоб розрахункова річка і річка-аналог знаходилися у безпосередній географічній близькості;
- схожості кліматичних умов;
- однорідності умов формування стоку;
- синхронності коливань річного стоку на досліджуваних водозборах;
- щоб площі водозборів не відрізнялися більше, ніж в 10 разів, а їх середні висоти (для гірських річок) – більше, чим на 300 м;
- щоб періоди спільних спостережень за стоком на досліджуваних річках були не менше ніж 10 років.

Об'єктивним критерієм правильності вибору річки-аналога є досить тісний зв'язок між характеристиками стоку за період спільних спостережень, який характеризується коефіцієнтом кореляції r (за умови $r \geq 0.7$).

За аналог можуть бути прийняті один або декілька пунктів, які відповідають вищенаведеним умовам.

Приведення статистичних параметрів річного стоку до багаторічного періоду за наявності одного аналога виконується графічним, аналітичним, графо-аналітичним способом або за методом коефіцієнтів.

2.3.1 Приведення статистичних параметрів річного стоку коротких рядів спостережень до багаторічного періоду графічним способом

В основу метода покладено графік зв'язку значень річного стоку розрахункової річки та річки-аналога за період спільних спостережень (не менше, ніж 10 років).

Залежність вважається задовільною, якщо відхилення точок від лінії зв'язку не перевищує $\pm 10\%$, а коефіцієнт кореляції між стоком досліджуваних річок не менше, ніж 0.7.

Коефіцієнт кореляції r визначається за формулою:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} (q_i - \bar{q})(q_i^a - \bar{q}^a)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (q_i - \bar{q})^2 \sum_{i=1}^{n-1} (q_i^a - \bar{q}^a)^2}}, \quad (2.14)$$

де q_i, q_i^a - середньорічні модулі стоку за період спільних спостережень на досліджуваній річці та за річкою-аналогом;

\bar{q}, \bar{q}_i^a - відповідно середні багаторічні модулі стоку;

n – число років спільних спостережень.

При прямолінійному зв'язку норма стоку короткого ряду визначається безпосередньо по графіку через норму стоку річки-аналога .

При наявності нелінійних зв'язків річного стоку, що обумовлено характером коливань стоку у двох створах, необхідно мати більш тривалий ряд спільних спостережень (більш, ніж 10-20 років). У цьому випадку графік

зв'язку використовується для подовження ряду по роках з подальшим обчисленням норми по відновленому ряду.

Коефіцієнт варіації ряду, приведеного графічним способом, обчислюється за формулою:

$$C_v = A \frac{\bar{q}_n^a}{\bar{q}_n} C_v^a, \quad (2.15)$$

де \bar{q}_n^a, C_v^a - статистичні параметри річного стоку річки-аналога за багаторічний період;

\bar{q}_n, C_v - статистичні параметри приведеного ряду.

Співвідношення коефіцієнта асиметрії та варіації приймається за осередненими даними групи річок гідрологічного району, де розташована досліджувана річка, з тривалими рядами спостережень.

Похибка норми річного стоку короткого ряду, приведеного до багаторічного періоду за допомогою графіків зв'язку, розраховується за формулою:

$$\sigma_{\bar{q}_n} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}, \quad (2.16)$$

де σ_1 - похибка обчислення норми річного стоку річки-аналога, яка визначається за формулою (2.3);

σ_2 - похибка кореляції стоку за період спільних спостережень, обчислена за рівнянням:

$$\sigma_2 = \frac{C_v \sqrt{1-r^2}}{\sqrt{n}}, \quad (2.17)$$

де C_v - коефіцієнт варіації річного стоку для розрахункового створу.

2.3.2 Приведення статистичних параметрів коротких рядів спостережень до багаторічного періоду графо-аналітичним методом

Відповідно до графо-аналітичного методу статистичні параметри короткого ряду \bar{q}_n, C_v, C_s обчислюються через характерні ординати згладженої кривої забезпеченості (5%, 50%, 95%) на підставі кореляційної залежності за спільний період спостережень[7].

Приведення виконується за схемою.

Значення річного стоку за багаторічний період спостережень по річці-аналогу розташовують в порядку убутання та визначають їх забезпеченість за формулою:

$$P = \frac{m}{N + 1} \cdot 100\%, \quad (2.18)$$

де m – порядковий номер ранжованої вибірки;

N – довжина ряду.

На підставі цих даних на клітчатці імовірності будується емпірична крива забезпеченості річного стоку річки-аналога, яка згладжується. З неї знімають опорні ординати $q_{5\%}^a, q_{50\%}^a, q_{95\%}^a$.

Використовуючи графік залежності річних модулів стоку розрахункової річки та річки-аналога, знаходять відповідні ординати кривої забезпеченості досліджуваної річки $q_{5\%}, q_{50\%}, q_{95\%}$.

Статистичні параметри короткого ряду розраховують за відновленими ординатами.

Спочатку обчислюється коефіцієнт скошеності S :

$$S = \frac{q_{5\%} + q_{95\%} - 2q_{50\%}}{q_{5\%} - q_{95\%}} \quad (2.19)$$

За спеціальною таблицею відповідно S встановлюють коефіцієнт C_s . Середньоквадратичне відхилення σ_q розраховується за формулою:

$$\sigma_q = \frac{q_{5\%} - q_{95\%}}{t_{5\%} - t_{95\%}}, \quad (2.20)$$

де $t_{5\%}, t_{95\%}$ - ординати нормованої кривої біноміального розподілу, які визначаються в залежності від S по спеціальним таблицям.

Середньобагаторічне значення (норма) річного стоку обчислюється за рівнянням

$$\bar{q}_n = q_{50\%} - \sigma_q \Phi_{50\%}, \quad (2.21)$$

Коефіцієнт варіації C_v знаходиться через співвідношення (2.20) та (2.21), тобто:

$$C_v = \frac{\sigma_q}{\bar{q}_n}. \quad (2.22)$$

2.3.3 Аналітичний спосіб приведення статистичних параметрів річного стоку

Приведення норми річного стоку коротких рядів до багаторічного періоду виконується на підставі рівняння лінійної регресії. При цьому необхідно мати на увазі, що:

- період спільних спостережень повинен бути не менше, ніж 10-15 років;

- коефіцієнт кореляції річного стоку досліджуваної річки та річки-аналога $r \geq 0.7$;
- відношення коефіцієнта регресії K до його середньоквадратичної похибки дорівнює $K / \sigma_k \geq 2.0$.

Коефіцієнт регресії обчислюється за формулою:

$$K = \frac{r \cdot \sigma}{\sigma^a}, \quad (2.23)$$

де σ та σ^a – середні квадратичні відхилення значень річного стоку дослідженої річки та аналога за спільний період спостережень.

Похибка коефіцієнта регресії дорівнює:

$$\sigma_k = \frac{\sigma}{\sigma^a} \frac{1 - r^2}{\sqrt{n - 1}}, \quad (2.24)$$

Запишемо рівняння лінійної регресії для норми річного стоку:

$$\bar{q}_N = \bar{q}_n + r \frac{\sigma}{\sigma^a} (\bar{q}_N^a - \bar{q}_n^a), \quad (2.25)$$

де \bar{q}_N та \bar{q}_N^a – середні багаторічні значення (норми) модулів річного стоку досліджуваної річки та аналога;

\bar{q}_n , \bar{q}_n^a – відповідні середні значення стоку за період спільних спостережень n .

Коефіцієнт кореляції розраховується за формулою (2.14).

Середньоквадратичні відхилення значення річного стоку σ та σ^a встановлюються за відповідними формулами:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (q_i - \bar{q})^2}{n-1}} \quad (2.26)$$

$$\sigma^a = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (q_i^a - \bar{q}^a)^2}{n-1}} \quad (2.27)$$

Коефіцієнт варіації приведенного ряду дорівнює:

$$C_v = \frac{\sigma}{\bar{q}_N} \sqrt{1 + r^2 \left(1 - \frac{\sigma^a}{\sigma_N^a} \right)}, \quad (2.28)$$

де σ_N^a - середньоквадратичне відхилення модулів річного стоку ряду-аналога за багаторічний період спостережень N років.

Середня квадратична похибка приведенного значення норми річного стоку оцінюється за формулою:

$$\sigma_{\bar{q}_N} = \frac{100\sigma}{\bar{q}_N \cdot \sqrt{n}} \sqrt{1 + r^2 \left(\frac{n}{N} \frac{\sigma_N^a}{\sigma^a} - 1 \right)} \quad (2.29)$$

2.3.4 Приведення ряду до багаторічного періоду методом коефіцієнтів

Для розрахунку за цим методом спочатку визначається коефіцієнт кореляції між значеннями короткого ряду та ряду аналога за період сумісних спостережень, за формулою (2.14). Якщо значення $r \geq 0.7$, то досліджується синхронність коливань стоку на двох постах. Для цього будуються

хронологічні графіки коливань річного стоку. Якщо коливання синхронні, то можна записати

$$\frac{\bar{q}^a_N}{q^a_n} = \frac{\bar{q}_N}{\bar{q}_n}, \quad (2.30)$$

де \bar{q}^a_N та \bar{q}_N - середнє багаторічне значення річного стоку (норма) річки-аналога та короткого ряду, відповідно, а \bar{q}^a_n та \bar{q}_n - середнє значення річного стоку річки-аналога та короткого ряду за період сумісних спостережень n .

Позначимо співвідношення $\frac{\bar{q}^a_N}{\bar{q}^a_n}$ як K_N , тоді для досліджуваного

короткого ряду можна визначити норму стоку за виразом:

$$\bar{q}_N = K_N \bar{q}_n \quad (2.31)$$

2.4 Визначення статистичних параметрів річного стоку за відсутності гідрометричних спостережень

При відсутності систематичних вимірювань стоку i , відповідно, часових рядів норма стоку визначається непрямими методами:

- за допомогою прямолінійної інтерполяції з використанням опорних пунктів;
- по картах ізолій річного стоку;
- на підставі регіональних залежностей від фізико-географічних факторів;
- за рівнянням водного балансу.

Найбільш поширені карти норми річного стоку (модуля або шару), які побудовані за даними вивчених річок.

Принципова можливість побудування карти норми річного стоку впливає безпосередньо з рівняння водного балансу:

$$\bar{Y} = \bar{X} - \bar{E}, \quad (2.32)$$

Складові правої частини рівняння опади (\bar{X}) та випаровування (\bar{E}), взагалі мають зональний розподіл по території, за винятком гірських районів, де широтна закономірність змінюється висотною поясністю. Тій же закономірності безперервної та плавної зміни підлягає і стік \bar{Y} .

Стокові величини мають інтегральний характер, тому при побудуванні карти їх відносять не до місця вимірювання стоку, а до центрів ваги водозборів. У найпростішому випадку центр ваги знаходиться як точка перетину великої та малої осей водозбору. При визначенні норми стоку за картою їх також визначають для геометричних центрів водозборів.

Нормативним документом СНіП 2.01-14-83 [4] рекомендована карта ізоліній середньобогаторічних модулів річного стоку \bar{q}_n (л/с*км²).

Визначення норми стоку за картою виконується в залежності від кількості ізоліній, які перетинають розрахунковий водозбір.

При наявності однієї або двох ізоліній, виконується лінійна інтерполяція між сусідніми ізолініями відносно центра ваги водозбору.

Якщо водозбір перетинає декілька ізоліній, то норма стоку обчислюється як середньозважене за площею:

$$\bar{q}_n = \frac{\bar{q}_1 f_1 + \bar{q}_2 f_2 + \dots + \bar{q}_n f_n}{f_1 + f_2 + \dots + f_n}, \quad (2.33)$$

де $\bar{q}_1, \bar{q}_2, \dots, \bar{q}_n$ - середні значення модуля річного стоку між сусідніми ізолініями;

f_1, f_2, \dots, f_n - площі між відповідними ізолініями стоку, які визначаються планіметруванням або за допомогою палетки.

Для визначення норми стоку малих річок до значень стоку, знятих з карти, вводиться відповідна поправка, яка враховує неповноту дренажування підземних вод.

У гірських районах, де має місце висотна поясність у зміні річного стоку, спостерігається зростання норми з висотою. Тому розрахункові схеми будуються на залежності \bar{q}_n від середньої висоти водозбору H_{cp} .

При відсутності даних спостережень за річним стоком коефіцієнти варіації визначаються за емпіричними формулами:

а) Д.Л.Соколовського – М.Т.Шевельова

$$C_v = 0.78 - 0.29 \lg \bar{q} - 0.063 \lg(F + 1), \quad (2.34)$$

б) К.П.Воскресенського

$$C_v = \frac{A}{\bar{q}^{0.4} (F + 1)^{0.10}}, \quad (2.35)$$

де A – параметр, який визначається за даними річки-аналога.

В нормативному документі коефіцієнти варіації представлені картою ізоліній. Принцип знаходження C_v для розрахункового створу такий же, як і для визначення \bar{q}_n . Співвідношення C_s / C_v визначається за картою для гідрологічно однорідних районів.

3 СТАТИСТИЧНА ОБРОБКА РЯДІВ СЕРЕДНЬОРІЧНИХ МОДУЛІВ СТОКУ В БАСЕЙНАХ РІЧОК ПСЕЛ ТА ВОРСКЛА

3.1 Методи розрахунку статистичних параметрів часових рядів

Відповідно рекомендаціям СНіП 2.01.14.83 [4], статистичну обробку рядів середньорічних модулів стоку виконують з використанням методів моментів та найбільшої правдоподібності.

3.3.1 Метод моментів

При описуванні властивостей статистичних сукупностей

використовуються моменти двох видів: початкові, центральні[8].

Початковим моментом s -го порядку α дискретної випадкової величини X є сума

$$\alpha_s = \sum_{i=1}^n x_i^s p_i. \quad (3.1)$$

Для безперервної випадкової величини сума (3.1) виражається через інтеграл, а

$$\alpha_s = \int_{-\infty}^{\infty} x^s f(x) dx. \quad (3.2)$$

Якщо прийняти $s = 1$, то (3.1) набуде вигляду

$$\alpha_1 = m_x = \sum_{i=1}^n x_i p_i. \quad (3.3)$$

Центральним моментом дискретних випадкових величин називається математичне очікування

$$\beta_s = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - m_x)^s p_i}{n}. \quad (3.4)$$

Для емпіричних розподілів замість m_x використовується \bar{x} , а

$$\beta_s = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^s. \quad (3.5)$$

При $s = 1$

$$\beta_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \bar{x} = 0, \quad (3.6)$$

тобто перший центральний момент дорівнює нулю.

При $s = 2$

$$\beta_2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2. \quad (3.7)$$

Другий центральний момент характеризує розсіювання випадкової величини відносно середнього та носить назву дисперсії D_x .

Квадратний корінь з дисперсії, співпадаючий за розмірністю з ознакою випадкової величини, називається середнім квадратичним відхиленням або стандартом:

$$\sigma_x = \sqrt{D_x} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}}. \quad (3.8)$$

За наявності обмежених вибірок, а вони найчастіше в гідрології не виходять за межі 40-50 років другий центральний момент має від'ємний зсув (систематичне заниження). Для його усунення в (3.8) вводиться поправка, з урахуванням якої отримують більш загальний вираз для σ_x

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}. \quad (3.9)$$

Для порівняння мінливості різномасштабних випадкових величин приймають безрозмірний параметр, який отримав назву коефіцієнта варіації або мінливості:

$$C_v = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (K_i - 1)^2}{n-1}}. \quad (3.10)$$

При $s = 3$

$$\beta_3 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3. \quad (3.11)$$

Третій центральний момент характеризує ступінь несиметричності розподілу випадкової величини відносно математичного очікування. Будучи непарним, третій центральний момент може бути як додатним, так і від'ємним. Якщо $\beta_3 = 0$, то крива стає симетричною.

Нормування дозволяє отримати безрозмірний параметр статистичного розподілу, названий коефіцієнтом асиметрії.

$$C_s = \beta_3 / \sigma_x^3 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3}{n} \right] / (n \sigma_x^3). \quad (3.12)$$

Винісши за дужки x^3 та поділив на цю величину чисельник і знаменник, отримаємо

$$C_s = \frac{\left[\sum_{i=1}^n (K_i - 1)^3 \right]}{nC_v^3}. \quad (3.13)$$

Як і C_v , параметр C_s є зміщеною оцінкою. У простому випадку від'ємна зміщеність може бути усунена шляхом введення в (3.13) поправки, запропонованої Є.Г. Блохіновим: $\delta_s = n^2 / [(n-1)(n-2)]$ [5]. З урахуванням цього

$$C_s = \left[\frac{n \sum_{i=1}^n (K_i - 1)^3}{[(n-1)(n-2)C_v^3]} \right]. \quad (3.14)$$

При $C_s > 0$ крива розподілу випадкової величини має додатну асиметрію, при $C_s < 0$ - від'ємну, а при $C_s = 0$ розподіл є симетричним.

3.1.2 Метод найбільшої правдоподібності

В гідрологічну практику цей метод введений С.Н. Крицьким та М.Ф. Менкелем [5]. Розрахунок статистичних параметрів методом найбільшої правдоподібності, на відміну від викладеного вище метода моментів, є більш складним. Тому в цілях спрощення розрахункової схеми Є.Г. Блохінов запропонував спочатку обчислювати статистики:

$$\lambda_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i; \quad (3.15)$$

$$\lambda_2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \lg K_i; \quad (3.16)$$

$$\lambda_3 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n K_i \lg K_i. \quad (3.17)$$

Як видно із рівняння (3.15), статистика λ повністю співпадає з середнім арифметичним \bar{x} в методі моментів. Коефіцієнти мінливості C_v та асиметрії C_s встановлюються за спеціально складеними для цих цілей номограмами.

Метод найбільшої правдоподібності рекомендується для визначення параметрів, коли використовується крива трипараметричного гама-розподілу, а також заслуговує на перевагу при $C_v > 0.5$. При $C_v < 0.5$ метод найбільшої правдоподібності та моментів приводять практично до однакових результатів.

3.2 Точність обчислення параметрів статистичного розподілу

Визначення числових характеристик випадкових величин є найважливішим етапом статистичного аналізу. У гідрології при розрахунках імовірнісних значень статистичних рядів найчастіше спираються на біноміальний і трьохпараметричний гама-розподіл. І той, й інший передбачають наявність трьох статистичних параметрів: середнього значення вибірки, коефіцієнтів варіації і асиметрії. Моменти вищих порядків із-за великих помилок їх обчислення при коротких рядах зазвичай не використовуються.

Оскільки матеріали вимірювання стоку завжди обмежені, а, згідно граничних теорем розподілу, для отримання параметрів потрібні нескінченно довгі сукупності, то в практичних розрахунках обчислюються не самі параметри, а їх наближені значення – оцінки.[7] Очевидно, чим більша довжина вибірок, тим вище ступінь наближення оцінок розподілу до їх шуканих параметрів. З цієї причини вибірковий аналіз обов'язково припускає не тільки обчислення оцінок, але й встановлення точності, з якою вони визначені по наявних рядах. Мірою точності є середня квадратична

погрішність. При відсутності внутрішньо рядних зв'язків відносна середня квадратична похибка обчислення n -річних середніх стокових рядів (в %) може бути визначена за формулою:

$$\sigma_x = \frac{100C_v}{\sqrt{n}}. \quad (3.18)$$

З формули (3.18) видно, що погрішність прямо пропорційна коефіцієнту варіації C_v і обернено пропорційна числу членів вибірки n . Більшість гідрологічних величин розраховується з точністю $\pm 10\%$, що при коефіцієнтах варіації 0,2 – 1,0 для обчислення середнього \bar{x} потребує мати ряди тривалістю 20 – 30 років.

Для статистичних сукупностей з наявністю внутрішньорядних зв'язків:

$$\sigma_x = \frac{100C_v \sqrt{(1+r)(1-r)}}{\sqrt{n}}, \quad (3.19)$$

де r - коефіцієнт кореляції між суміжними членами ряду.

Похибки, обчислені по (3.18), при тих же значеннях C_v і n будуть більшими, ніж по (3.19), так як $(1+r)/(1-r) \geq 1,0$. Пояснюється це тим, що при внутрішньорядній скорельованості у вихідних рядах незалежної інформації зберігається менше.

Стандартні похибки вибірових коефіцієнтів варіації C_v (в %) обчислених методом моментів, знаходяться за формулою:

$$\sigma_{C_v} = \sqrt{(1 + C_v^2)/(2n)} \cdot 100. \quad (3.20)$$

Якщо коефіцієнти варіації встановлюються за допомогою метода найбільшої правдоподібності, то

$$\sigma_{C_v} = \sqrt{3/[2n(3 + C_v^2)]} \cdot 100. \quad (3.21)$$

При здійсненні гідрологічних розрахунків значення коефіцієнтів варіації повинні визначатися з похибкою не більше 15%. Якщо виходити із значень $C_v = 0,2 - 1,0$, то для цього потрібні ряди 25 – 45 років (при використанні метода моментів) або 17 – 22 роки (при використанні метода найбільшої правдоподібності).[8]

3.3 Статистична обробка рядів норми річного стоку в басейнах річок Псел та Ворскла

Статистична обробка часових рядів норми річного стоку в басейнах річок Псел та Ворскла виконана по 17 гідрологічних постах з урахуванням даних по 2015 рік і полягала у визначенні стандартних параметрів (\bar{q} , C_v , C_s та співвідношення C_s/C_v).

Для рішення цієї задачі використовувались методи моментів та найбільшої правдоподібності.

Результати розрахунків наведені у табл. 3.1, з якої видно, що у методі моментів коефіцієнти варіації змінюються від 0.72 (р.Голтва - с.Міхнівка, $F=1560 \text{ км}^2$) до 0.27 (р.Псел - м.Суми, $F=7770 \text{ км}^2$), складаючи в середньому 0.44. Це свідчить про те, що в цілому для річного стоку в басейні річок Псел та Ворскла характерна висока ступень мінливості у рядах середньорічних модулів стоку. У дуже широких межах змінюється коефіцієнт асиметрії - від 2.22 (р.Ворскла –с.Яковлеве, $F=56 \text{ км}^2$) до 0.07 (р.Грунь - с.Римарівка, $F=958 \text{ км}^2$).

Що стосується правдоподібних оцінок C_v , C_s/C_v , то вони змінюються у слідуючих межах: коефіцієнт варіації C_v коливається від 0.73 до 0.27, а

співвідношення C_s / C_v складає у середньому 1.51.

Побудован порівняльний графік коефіцієнтів варіації, розрахованих за методом моментів та найбільшої правдоподібності (рис.3.1). Аналіз графіку показав, що коефіцієнти варіації розраховані за двома методами, лягають на лінію рівних значень, за виключенням декількох точок. Це свідчить про те, що у подальших розрахунках можна використовувати дані любого з методів.

Таблиця 4.1 – Результати розрахунку статистичних параметрів річного стоку та визначення середньоквадратичних відхилень в басейнах річок Псел та Ворскла

№ поста	Річка-пост	$F, км^2$	n , роки	\bar{q} $л^*(с/кг)^2$	Метод моментів		Метод найб. правдоп.		σ_{C_V} %	$\sigma_{\bar{q}}$ %
					C_V	C_S	C_V	C_S / C_V		
158	Псел – м. Обоянь	1100	25	3,8	0,36	0,21	0,36	0,8	10,2	7,2
159	Псел – с. Крупец	4700	39	3,32	0,38	0,35	0,38	1	11,1	6,1
160	Псел – м. Суми	7770	69	3,09	0,27	0,38	0,27	1,5	14,4	3,3
161	Псел – м. Гадяч	11300	60	3,03	0,33	0,11	0,32	0,5	11,1	4,3
163	Псел – с. Запсілля	21800	77	2,34	0,34	0,2	0,33	0,7	10,1	3,9
164	Пена – сл. Пени	1000	25	2,59	0,33	0,62	0,33	2,1	11,7	6,6
165	Суджа – с. Замостьє	972	34	3,49	0,37	0,72	0,37	2,2	12,8	6,3
166	Грунь – с. Римарівка	958	21	3,11	0,42	0,07	0,42	0,4	11,4	9,2
168	Хорол – м. Миргород	1740	39	2,17	0,56	0,54	0,56	1	9,1	10,6
169	Голтва – с. Михнівка	1560	23	3,64	0,72	0,98	0,73	1,6	9,9	15
170	Ворскла – с. Яковлеве	56	46	4,38	0,68	2,22	0,72	5,7	8,7	18
172	Ворскла – с. Козинка	1870	40	2,94	0,37	0,28	0,37	0,9	14,9	5,8
173	Ворскла – с. Чернеччина	5790	60	2,69	0,4	0,55	0,4	1,4	12,9	5,2
175	Ворскла – м. Кобеляки	13500	45	2,55	0,32	0,41	0,32	1,4	14,1	4,8

Продовження таблиці 3.1

176	Ворскліця – с. Мокра Орлівка	612	29	2,88	0,45	0,82	0,45	2	9,2	8,4
177	Ворскліця – с. Березівка	1460	51	2,09	0,55	1,05	0,56	2	12,8	7,7
178	Мерла – м. Богодухів	309	58	2,59	0,69	0,92	0,7	1,5	16,3	9,1
Середнє значення								1,51	10,7	7,7

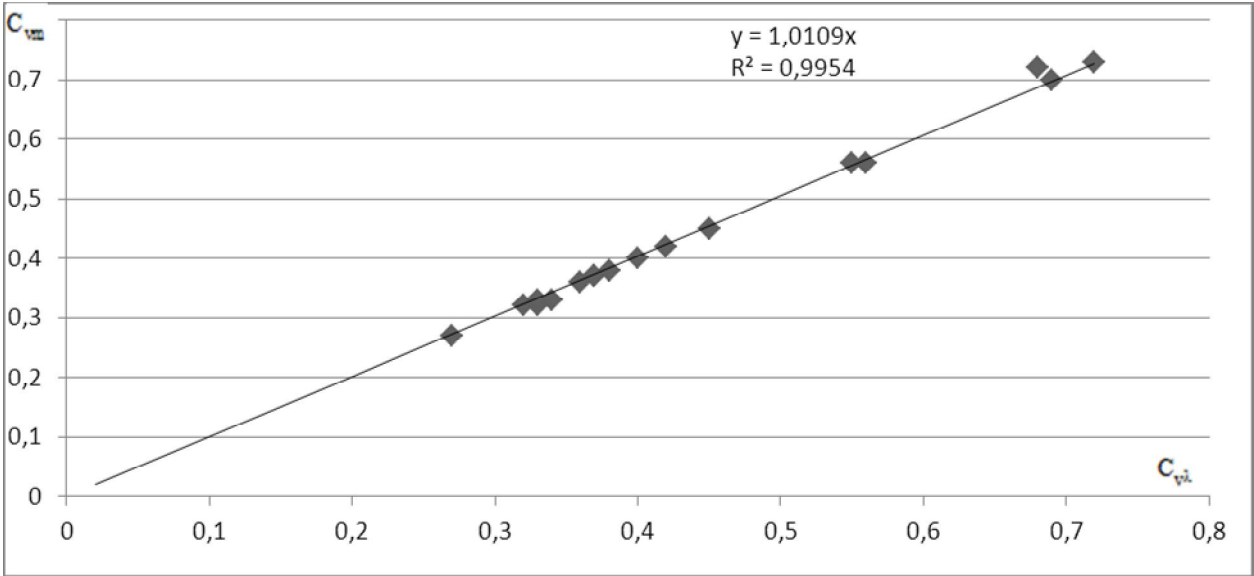


Рисунок 4.1 – Порівняння значень коефіцієнту варіацій (C_v) розрахованих за методом моментів і методом найбільшої правдоподібності.

Мірою точності є середня квадратична похибка. Точність визначення параметрів статистичного розподілу виконувалась за формулами (3.18) для n – річних середніх та (3.20) для коефіцієнтів варіації. Результати визначення також представлені у табл. 3.1. Значення $\sigma_{\bar{q}}$ в середньому дорівнює 7,7%, а коефіцієнт варіації в середньому $\sigma_{Cv}=10,7\%$. Ці результати задовольняють вимогам нормативного документу СНіП 2.01.14-83 [4].

4 УДОСКОНАЛЕННЯ РОЗРАХУНКУ НОРМ РІЧНОГО СТОКУ В БАСЕЙНАХ РІЧОК ПСЕЛ ТА ВОРСКЛА

Завершальним етапом виконаної роботи є просторове узагальнення норми річного стоку досліджуваного району.

Просторове узагальнення норми річного стоку може бути у вигляді карт ізоліній для річок, на яких не велись спостереження за стоком. Також за відсутністю спостережень норму стоку можна визначити на підставі регіональних залежностей від фізико-географічних факторів.

4.1 Визначення та аналіз циклічності в розрахункових рядах норм річного стоку в басейнах річок Псел та Ворскла

При розрахунках норми річного стоку однією з вимог є наявність у розглянутих періодах однакової кількості маловодних та багатоводних суміжних фаз[9].

Для визначення циклічності в басейнах річок Псел та Ворскла по всіх постах були побудовані різницеві інтегральні криві, які наведені у додатку Б.

На підставі аналізу цих кривих можна зробити висновок, що вони утворюють замкнуті цикли коливань водності. Нажаль, деякі пости все ж мали невеликі розриви, але на середнє значення це суттєво не впливає.

Взагалі, всі наявні ряди спостережень можуть бути використані для подальшого розрахунку норми річного стоку на досліджуваній території.

4.2 Обґрунтування методики для розрахунку норм річного стоку

На значення норми річного стоку можуть впливати такі фактори, як широта, висота водозборів та місцеві фактори (залісеність, заболоченість).[10] Внаслідок цього були побудовані залежності середньорічних модулів стоку[11] від широти геометричних центрів водозборів, висоти та залісеності. Ці залежності представлені рис. 4.1, 4.2, 4.3.

Аналіз графіків показав, що коефіцієнт кореляції в залежності середньорічних модулів стоку від висоти водозборів є значущим і дорівнює $r = 0,60$. Описує цю залежність рівняння

$$\bar{q} = 0.015(H - 200) + \bar{q}_{H=200} \quad (4.1)$$

де H – висота водозборів;

$\bar{q}_{H=200}$ – середній модуль стоку, приведений до умовної висоти $H=200$ м.

Але слід виключити вплив широти і лісу на норму річного стоку. Для цього, використовуючи рівняння (4.1), були визначені для всіх постів середні модулі стоку, приведені до умовної висоти $\bar{q}_{H=200}$, які наведені у табл. В.1 (додаток В). Користуючись даними таблиці В.1, була побудована залежність $\bar{q}_{H=200}$ від широти геометричних центрів водозборів (додаток Г). Коефіцієнт кореляції цієї залежності відноситься до незначущих (в порівнянні з коефіцієнтом, який отриманий по залежності рис. 4.4) і дорівнює $r = 0.33$.

Таким чином, розподіл по території середньорічних модулів стоку не зумовлений географічним положенням.

На рис. 4.4 приведена залежність $\bar{q}_{H=200} = f(f_{л})$, описує її рівняння

$$\bar{q}_{H=200} = 3,82 - 0,12 f_{л} \quad (4.2)$$

Коефіцієнт кореляції цієї залежності є значимий і дорівнює $r = 0,60$

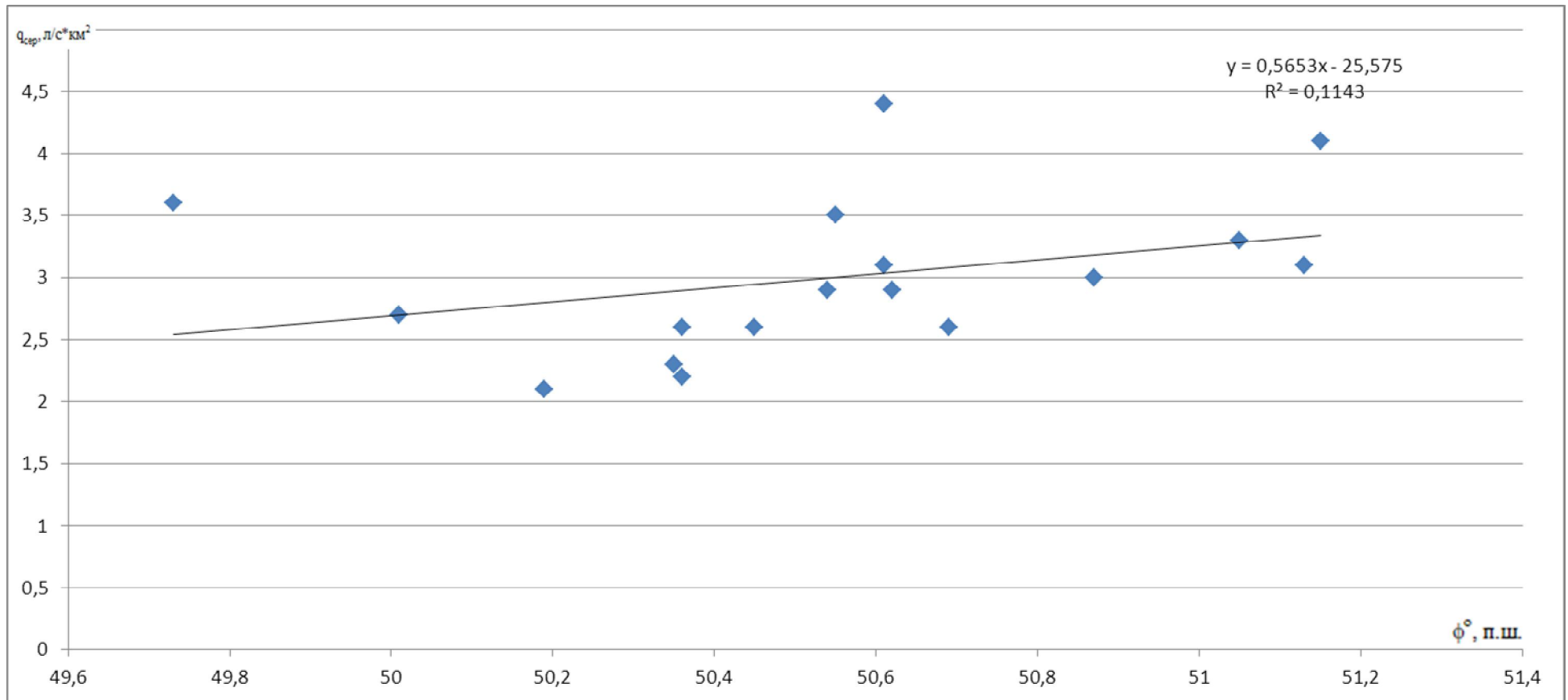


Рисунок 4.1 - Залежність середніх модулів річного стоку від широти геометричних центрів водозборів в басейнах річок Псел та Ворскла

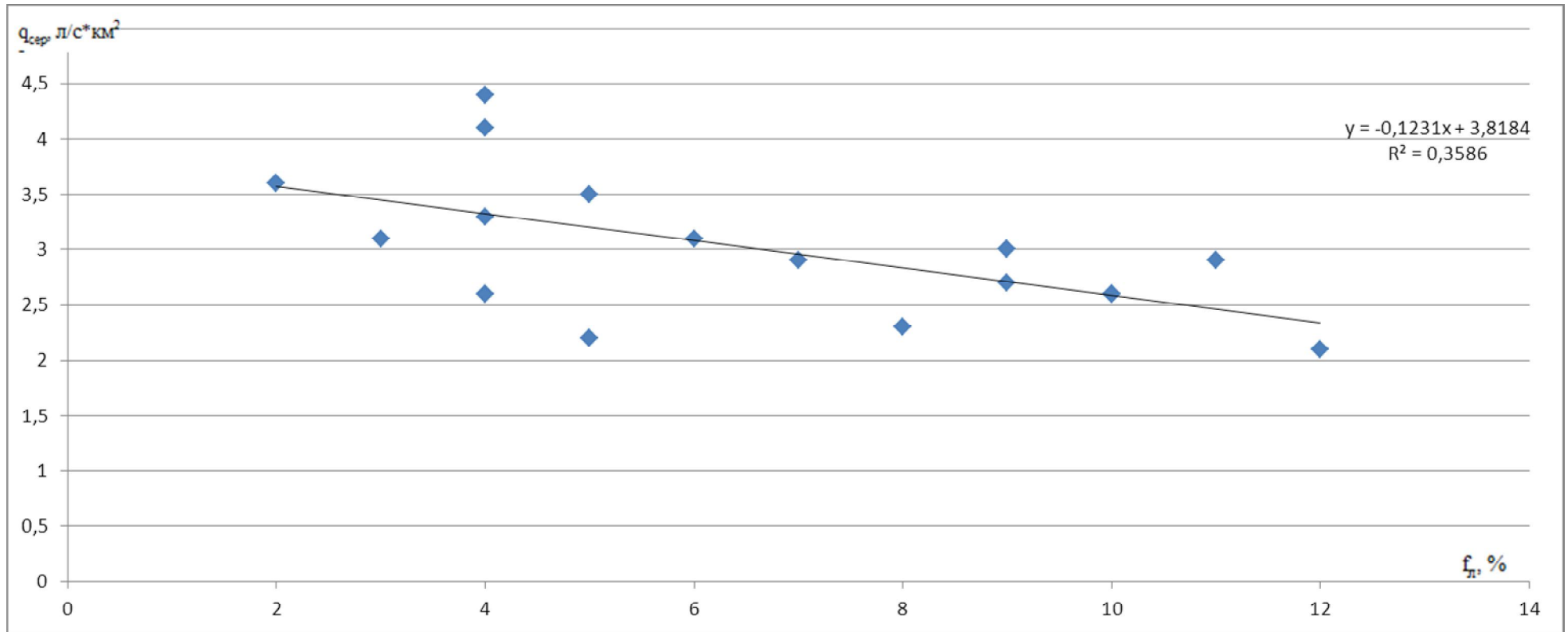


Рисунок 4.2 - Залежність середніх модулів річного стоку від лісистості в басейнах річок Псел та Ворскла

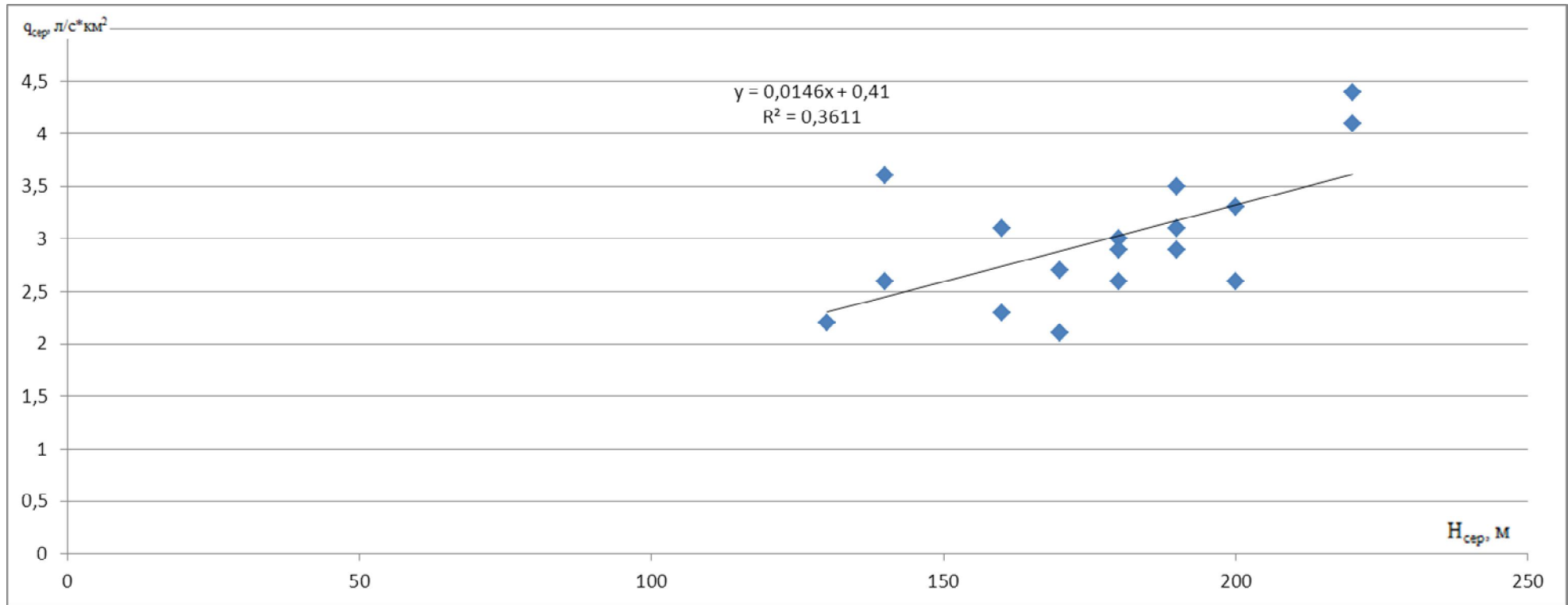


Рисунок 4.3 - Залежність середніх модулів річного стоку від середньої висоти в басейнах річок Псел та Ворскла

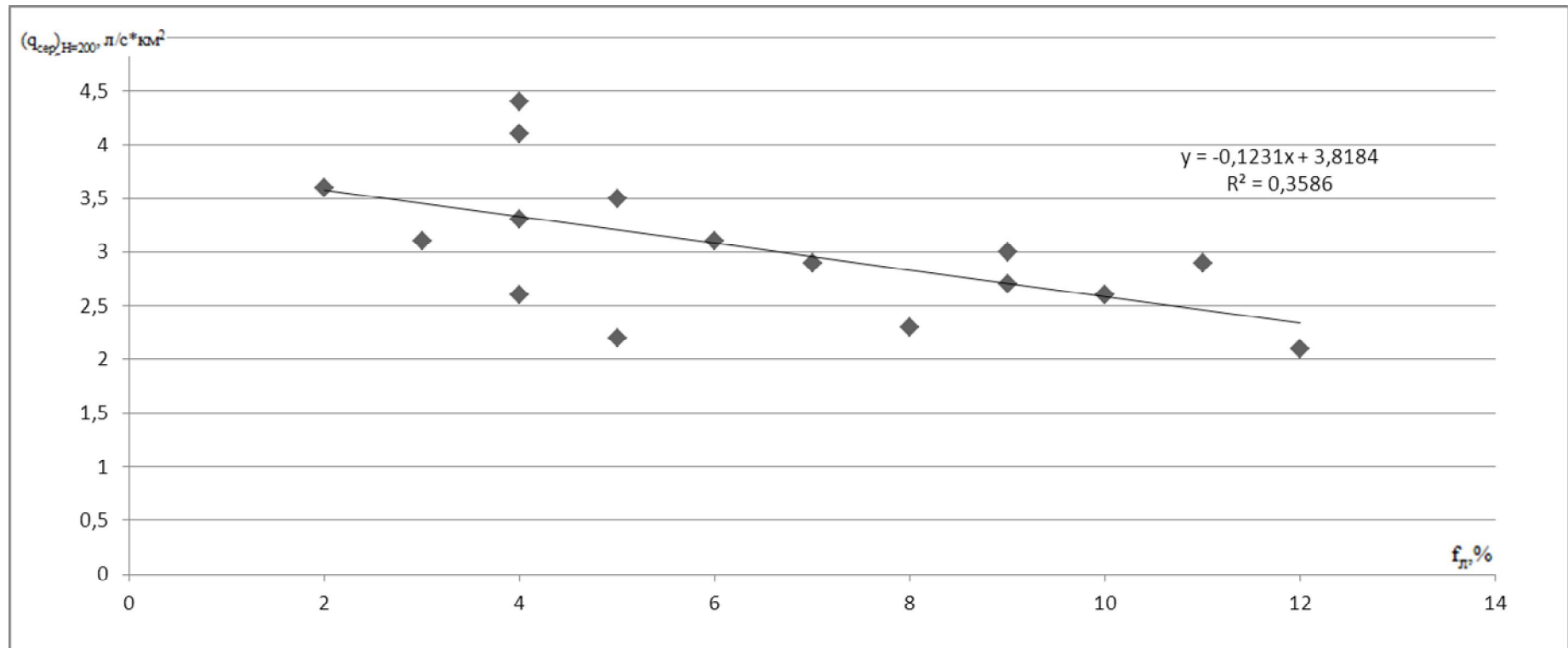


Рис 4.4 - Залежність середніх модулів річного стоку, приведених до умовної висоти $H=200$, від лісистості.

Це свідчить про вплив залісеності на норму річного стоку в басейнах річок Псел та Ворскла. З урахуванням формули (4.2) формула (4.1) набуде у вигляді

$$\bar{q} = 0,015(H - 200) - 0,12 \cdot f_{\pi} + 4,0 \quad (4.3)$$

4.3. Перевірочні розрахунки

На підставі рівняння (4.3) були виконані перевірочні розрахунки для середньорічних модулів стоку в басейнах річок Псел та Ворскла (табл. 4.1). Перевірочні розрахунки виконувались за формулою

$$\Delta q = \frac{|q_p - q_{\phi}|}{q_{\phi}} \cdot 100\% \quad (4.4)$$

Точність значень Δq для постів розглядаємої території знаходиться в межах від $\Delta q = 0,32\%$ (р. Грунь – с. Римарівка) до $\Delta q = 34,8\%$ (р. Пена – сл. Пени). В середньому по басейнах річок Псел та Ворскла значення Δq по результатам перевірочних розрахунків дорівнює $\Delta q = 9,4\%$.

Таким чином, точність середніх відхилень за допомогою рівняння (4.3) відповідає точності вихідної інформації, де $\sigma_{\bar{q}} = 7.7\%$ та вимогам нормативного документу СНіП 2.01.14-83.

Таблиця 4.1 – Перевірочні розрахунки норм річного стоку в басейнах річок
Псел, Ворскла

№ за картою	Річка - пост	$F, \text{ км}^2$	$\bar{q}_\phi,$ л/(с·км ²)	$\bar{q}_p,$ л/(с·км ²)	$ \Delta\bar{q} ,$ %
158	Псел – м. Обоянь	1100	4,1	4,2	2,44
159	Псел – с. Крупец	4700	3,3	3,4	3,03
160	Псел – м. Суми	7770	3,1	2,85	8,06
161	Псел – м. Гадяч	11300	3,0	2,7	10,0
163	Псел – с. Запсілля	21800	2,3	3,1	34,8
164	Пена – с. Пени	1000	2,6	2,59	0,38
165	Суджа – с. Замостьє	972	3,5	3,34	4,57
166	Грунь – с.Рикова	958	3,1	3,1	0,32
168	Хорол – м. Миргород	1740	2,2	2,45	11,9
169	Голтва – с. Михнівка	1560	3,6	2,9	19,4
170	Ворскла – с. Яковлеве	56	4,4	4,8	9,09
172	Ворскла –с. Козинка	1870	2,9	3,15	8,62
173	Ворскла – с.Чернеччина	5790	2,7	2,65	1,85
175	Ворскла -с. Кобеляки	13500	2,6	2,1	19,2
176	Ворскла – с. Мокра Орловка	612	2,9	2,6	10,3
177	Ворскліця – с. Березівка	1460	2,1	2,35	11,9
178	Мерла – м. Богодухів	309	2,6	2,7	3,84
Середнє значення					9,4

ВИСНОВКИ

1. Вихідні дані по нормах річного стоку для басейнів річок Псел та Ворскла отримані по 17 гідрологічним постам з площами водозборів від 309 км² (р. Мерла – м. Богодухів) до 21800 км² (р. Псел – с. Запсілля) і даними спостережень по 2015 рік. Для отримання вихідних даних використовувались фондові матеріали, а саме «Ресурсы поверхностных вод», ОГХ.

2. Статистична обробка часових рядів середньорічних модулів стоку виконувалась за методом моментів та методом найбільшої правдоподібності. Середні значення \bar{q} л/с*км² змінюються від 2,09 л/с*км² до 4,38 л/с*км². Значення коефіцієнтів варіації C_v за двома методами дають майже однакові результати, чому свідчить порівнювальний графік для C_v , розрахованих за методами моментів та найбільшої правдоподібності, коефіцієнт кореляції дорівнює $r = 0,60$. середнє значення співвідношення $C_v/C_s = 1.51$.

3. Середня квадратична похибка середньорічних модулів стоку дорівнює $\sigma_{\bar{q}} = 7.7\%$, для коефіцієнта варіації $\sigma_{C_v} = 10,7\%$, що відповідає вимогам нормативного документу СНіП 2.01.14-83, де $\sigma_{\bar{q}} = 5 - 10\%$, а $\sigma_{C_v} = 15\%$.

4. Для визначення циклічності у рядах спостережень за нормою стоку були побудовані різницеві інтегральні криві. Порівнювальний аналіз цих кривих свідчить про те, що ряди майже повною мірою утворюють замкнуті цикли коливань водності.

5. Для виключення впливу на норму річного стоку широти, висоти та лісу були побудовані відповідні залежності.

Для всіх постів середньорічні модулі стоку були приведені до умовної висоти $H=200$ м. Аналіз цих залежностей показав, що середньорічний модуль стоку не зумовлений географічним положенням, а вплив лісу є суттєвим.

На підставі рівнянь, які описують залежності середньорічних модулів стоку від висоти та лісу, було отримано розрахункове рівняння для всіх постів басейнів річок Псел та Ворскла.

6. По даним розрахункового рівняння виконані перевірочні розрахунки. Точність середніх відхилень норм річного стоку дорівнює $\Delta q = 9,4\%$. Що відповідає точності вихідної інформації та вимогам СНіП 2.01.14-83.

7. Запропоновану розрахункову формулу можна використовувати при визначення норми річного стоку для невивчених річок досліджуваної території.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Ресурсы поверхностных вод СССР. Украина и Молдавия. - Л.:Гидрометеиздат, 1971. – т. 6, вып. 2 – 655 с.
2. Гребінь В.В Сучасний водний режим річок України (ландшафтно – гідрологічний аналіз). К.: Наука – Центр, 2010. 316с
3. Вишневський В.І., Косовиць О.О. Гідрологічні характеристики річок України, К.: Наука – Центр, 2003.324с
4. Пособие по определению расчетных гидрологических характеристик. – Л.:Гидрометеиздат, 1984. – 448 с.
5. Рождественський А.В., Чеботарев А.И. Статистические методы в гидрологии. - Л.: Гидрометеиздат, 1974. – 424 с.
6. Гопченко Є.Д Овчарук В.А., Лобода Н.С Гідрологічні Розрахунки. Одеса:ТЕС, 2014.483с
7. Гопченко Е.Д., Гушля А.В. Гидрология с основами мелиорации - Л.:Гидрометеиздат, 1989г. – 303с
8. Лобода Н.С. Збірник методичних вказівок до практичних занять з дисципліни «Гідрологічні розрахунки». – Одеса, ОДЕКУ, 2005. – 56 с.
9. Шакірманова Ж.Р.,Бурлуцька М.Е. Гідрологічні розрахунки і прогнози: Конспект лекцій. – Одеса Видавництво ОДЕКУ – 2016 .-315с
- 10.Соколовский Д.Л. Речной сток. - Л.:Гидрометеиздат, 1968. – 320 с.
- 11.Государственный водный кадастр. Основные гидрологические характеристики (за 1971 – 1975гг., и весь период наблюдений) - Л.:Гидрометеиздат, 1979. – т. 6, вып. 2 – 435 с

Додаток А

Таблиця А.1 – Основні гідрографічні характеристики водозборів в басейнах річок Псел та Ворскла

№ за картою	Річка - пост	L , км	I_{cp} , %	F , км ²	H_{cp} , м	f_o , %	f_l , %	f_b , %
158	Псел – м. Обоянь	59	1,2	1100	220	<1	4	2
159	Псел – с. Крупец	162	0,5	4700	200	<1	4	2
160	Псел – м. Суми	272	0,4	7770	190	<1	6	1
161	Псел – м. Гадяч	414	0,3	11300	180	<1	9	1
163	Псел – с. Запсілля	702	0,2	21800	160	<1	8	3
164	Пена – с. Пены	64	0,9	1000	200	<1	4	<1
165	Суджа – с. Замостьє	60	1	972	190	<1	5	1
166	Грунь – с. Римарівка	72	1,0	958	160	<1	3	<1
168	Хорол – м. Миргород	173	0,4	1740	130	<1	5	1
169	Голтва – с. Михнівка	89	1,0	1560	140	<1	2	2
170	Ворскла – с. Яковлеве	8,5	2,6	56,0	220	<1	4	2
172	Ворскла – с. Козинка	116	0,7	1870	190	<1	7	<1
173	Ворскла – с. Чернеччина	209	0,5	5790	170	<1	9	1
175	Ворскла -с. Кобеляки	417	0,3	13500	140	<1	10	3
176	Ворскла – с. Мокра Орловка	47	1,2	612	180	<1	11	<1
177	Ворскліця – с. Березівка	91	0,7	1460	170	<1	12	<1
178	Мерла – м. Богодухів	31	3,2	309	180	<1	10	<1

Додаток Б

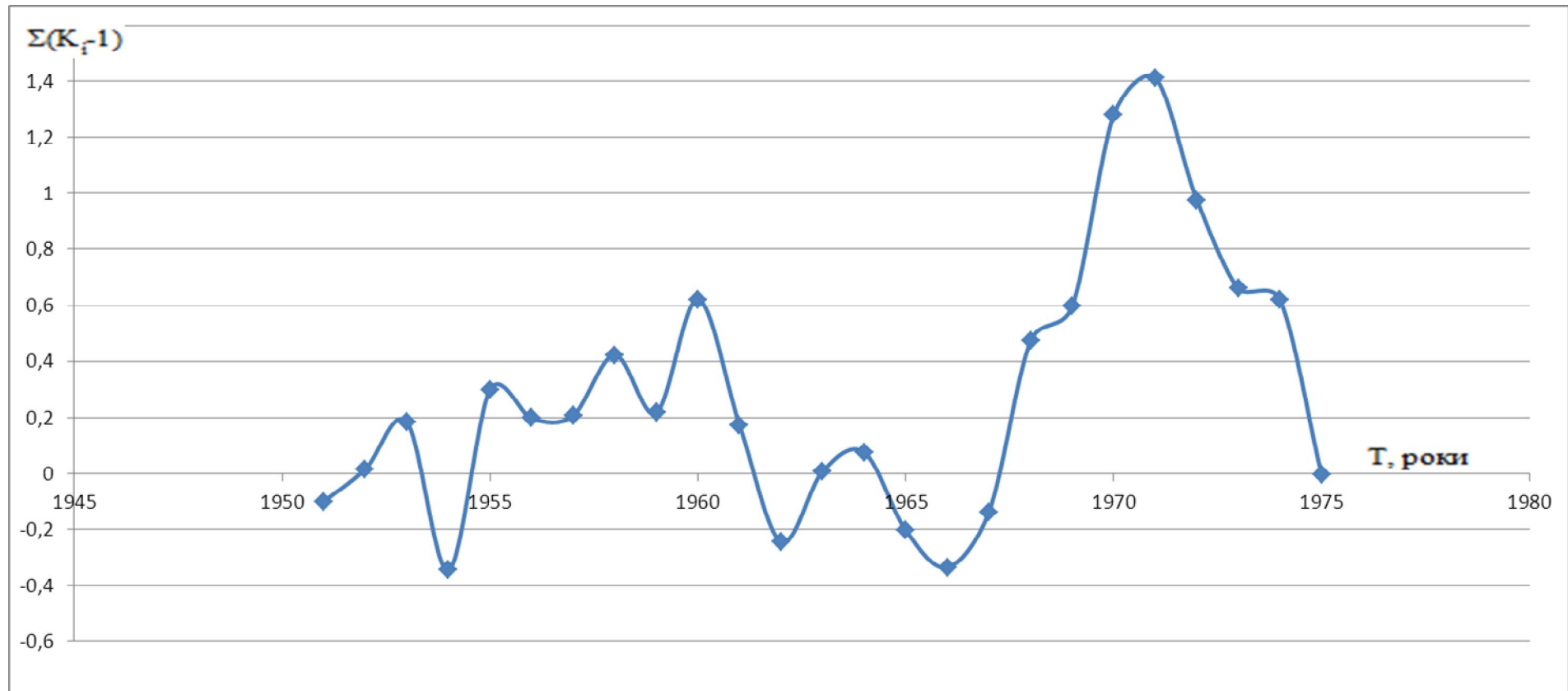


Рис В1- різницева інтегральна крива р.Псел – с. Запсілля

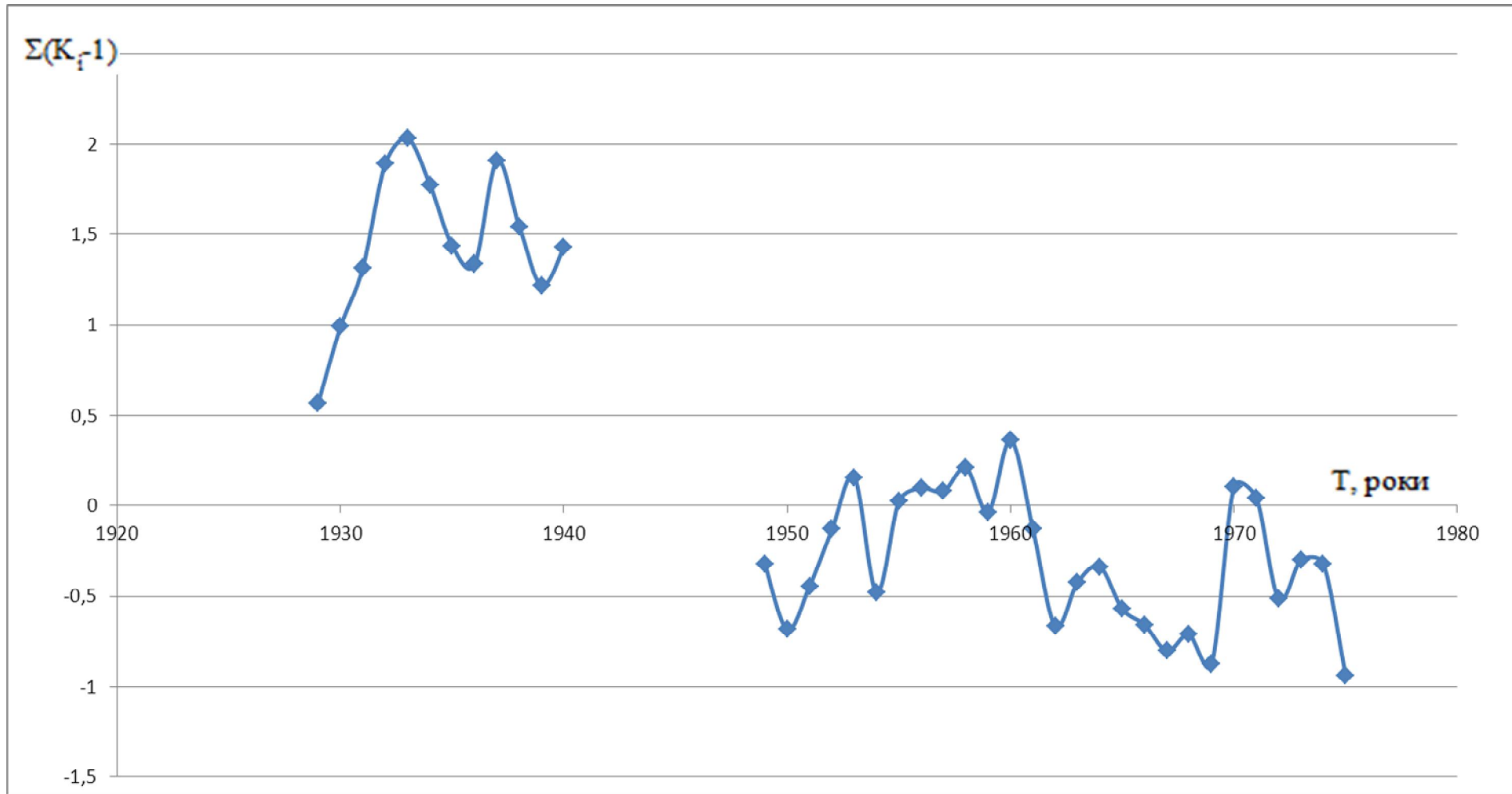


Рис В2 - різницева інтегральна крива р.Псел – с.Крупець

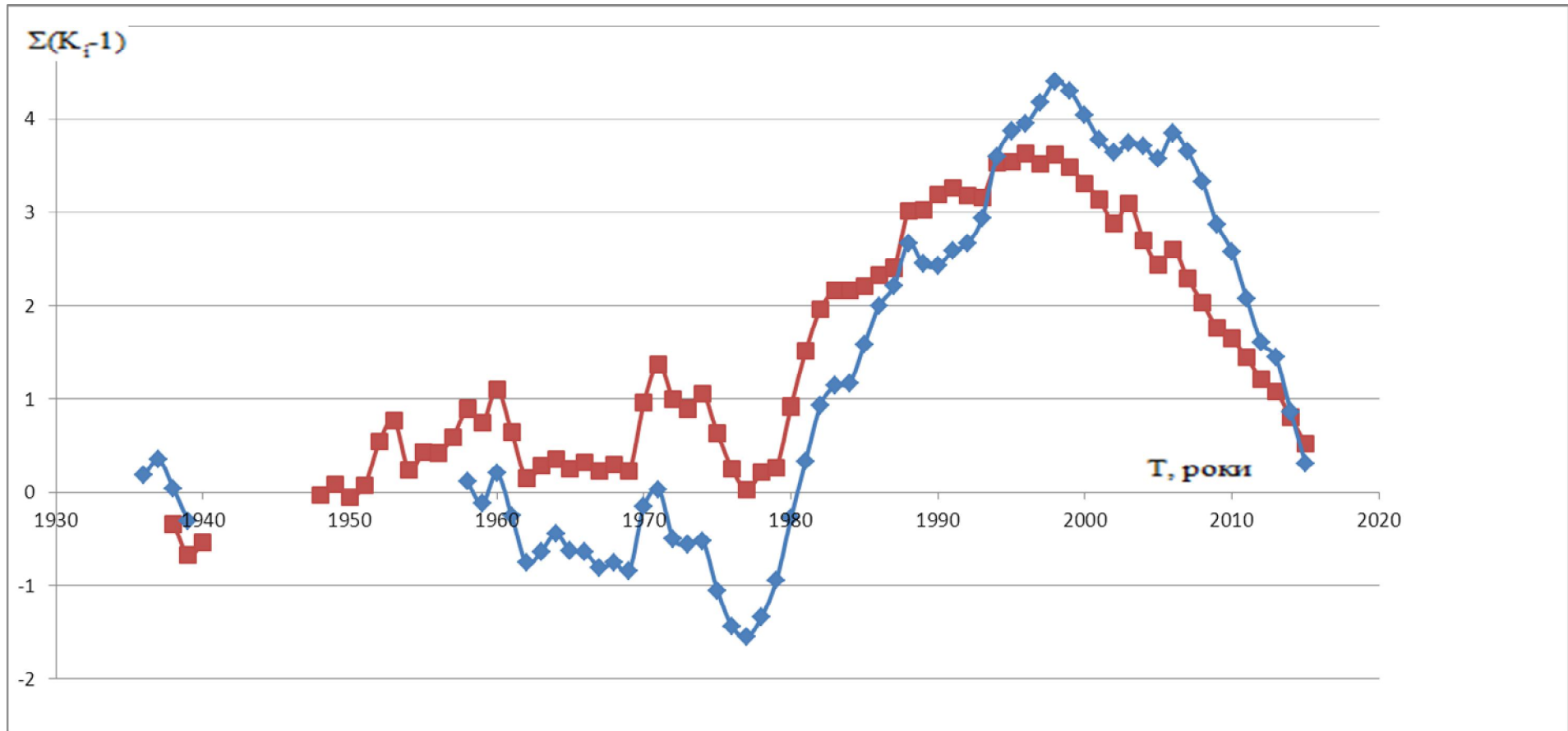


Рис В3- різницева інтегральна крива р.Псел – м.Суми та р.Псел – м.Гадяч.

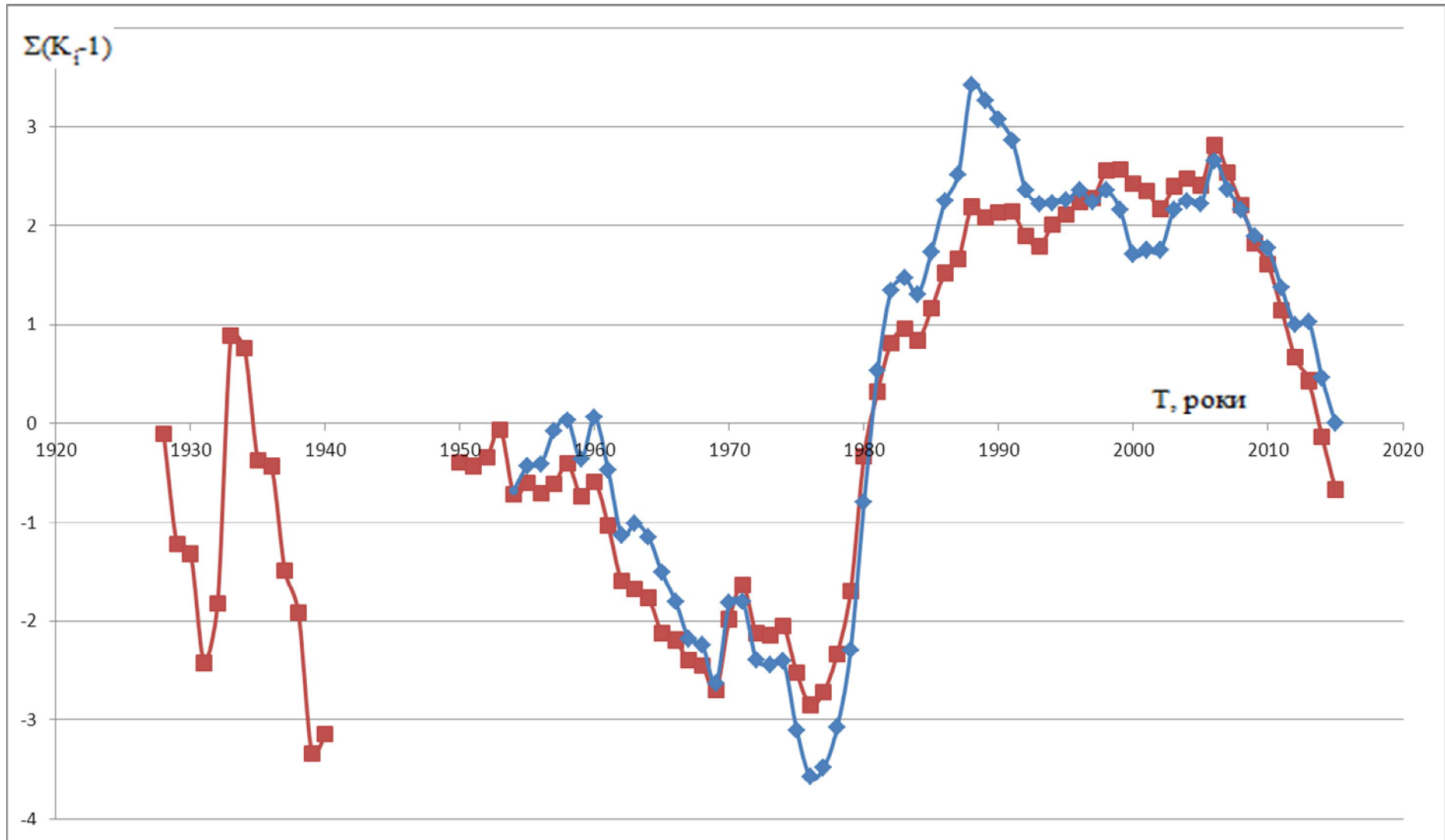


Рис В4- різницева інтегральна крива р.Псел – с.Запсельє та р.Ворскла – с.Чернетчина

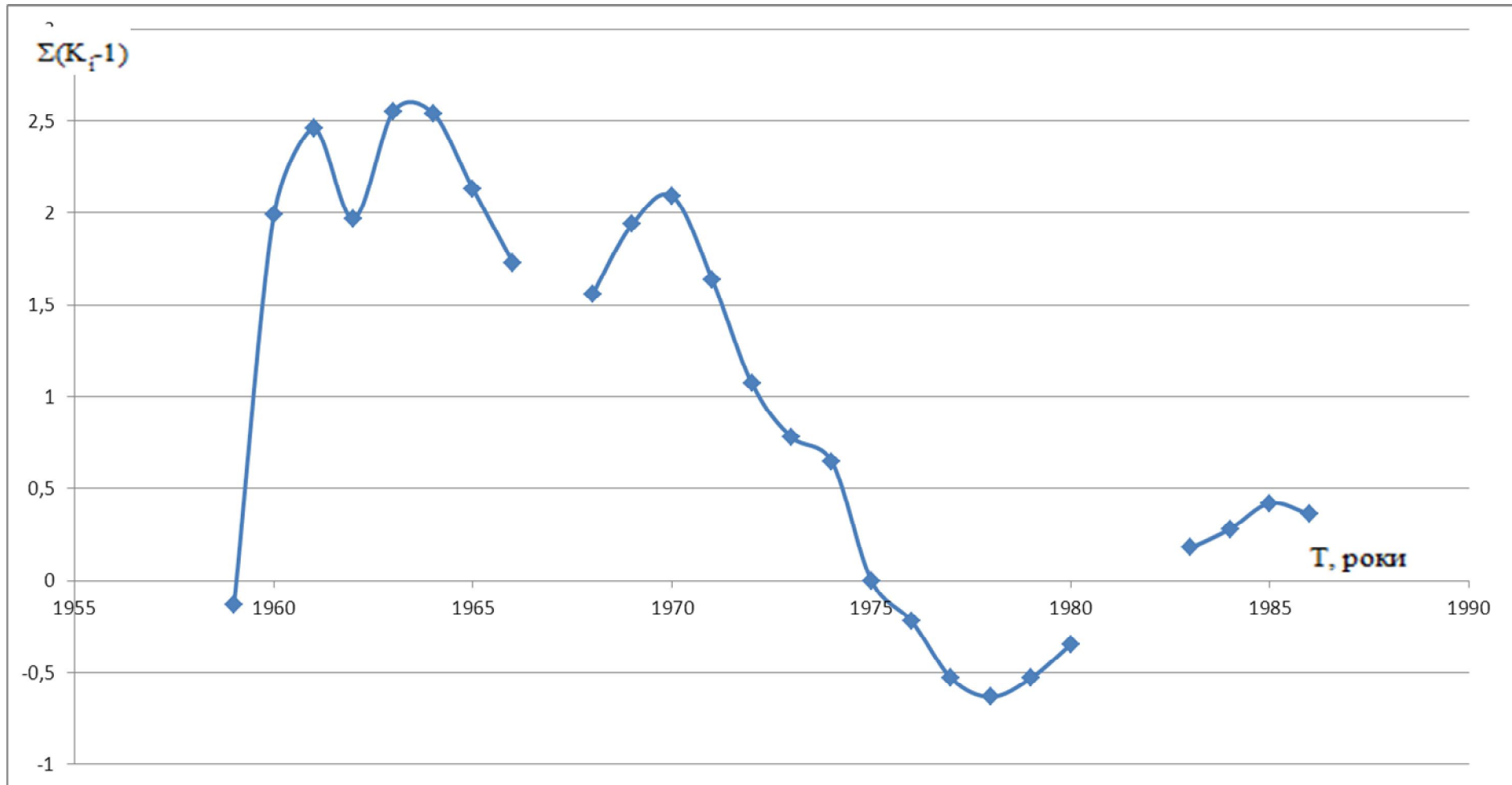


Рис В5- різницева інтегральна крива р.Ворскла- смт. Яковлево

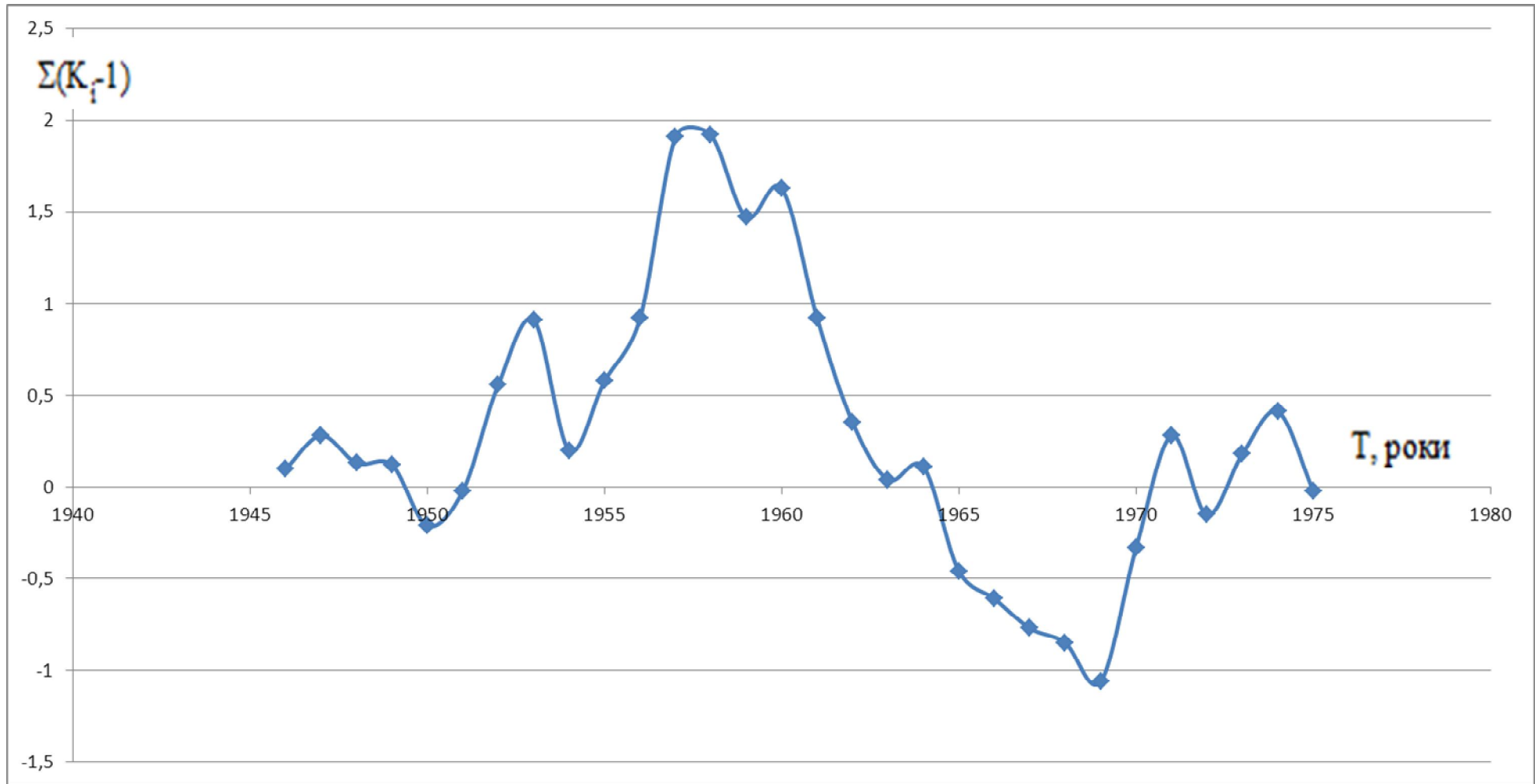


Рис В7- різницева інтегральна крива р.Ворскла- с.Римарівка

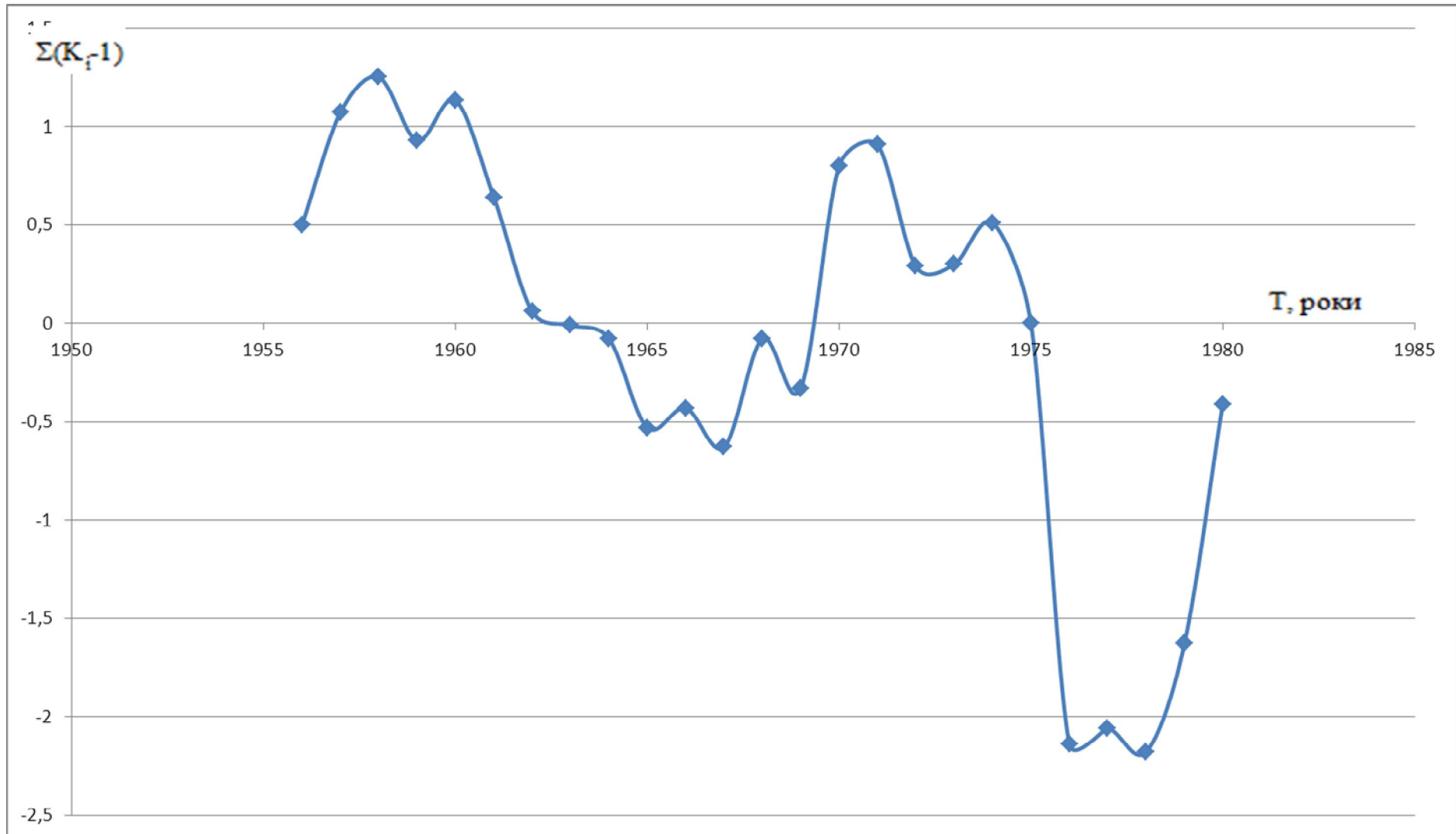


Рис В8- різницева інтегральна крива р.Ворскла- с.Мокра Орловка

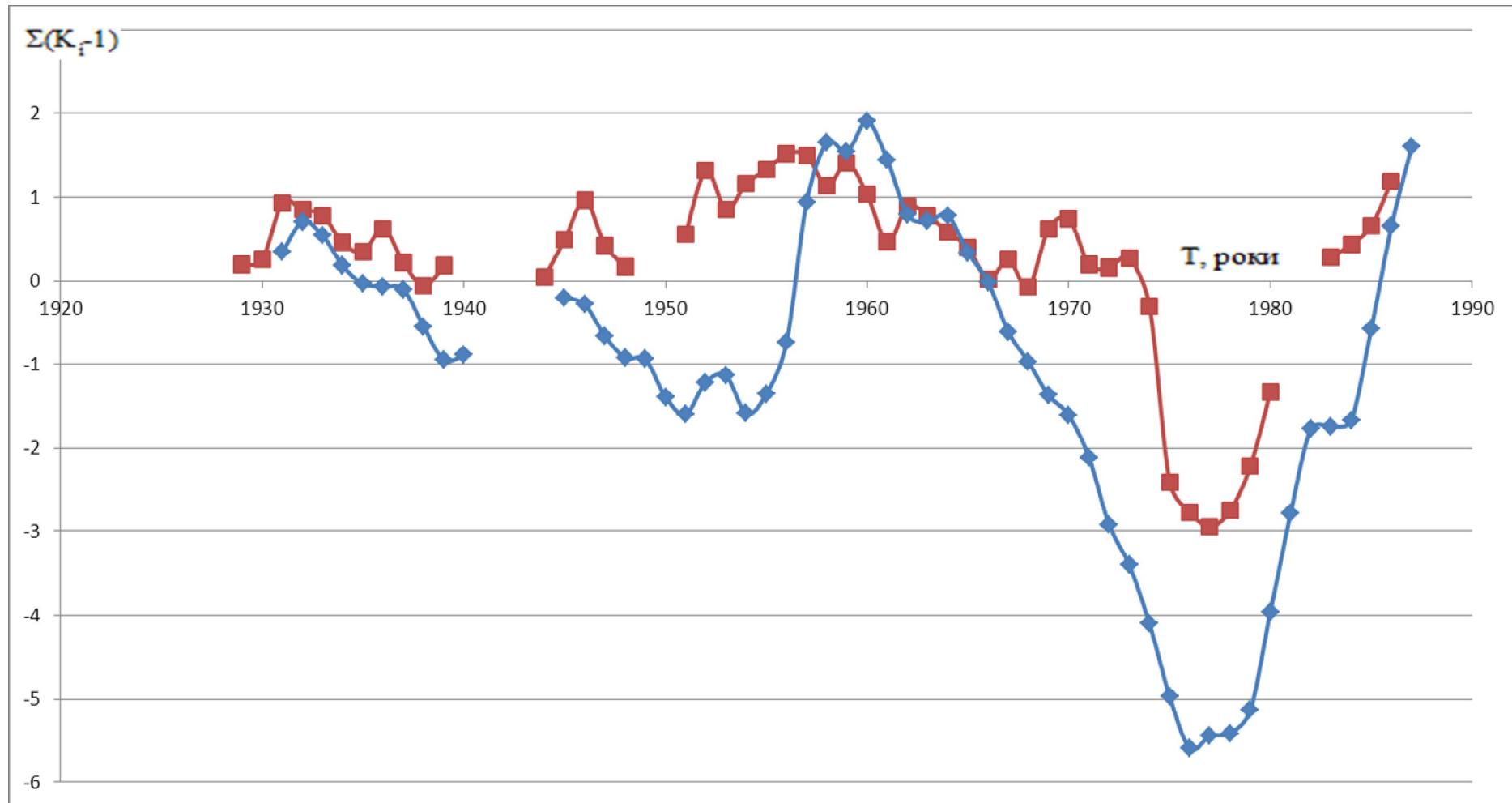


Рис В9- різницева інтегральна крива р.Ворскла- с.Берьозовка та р.Ворскла- с.Козинка

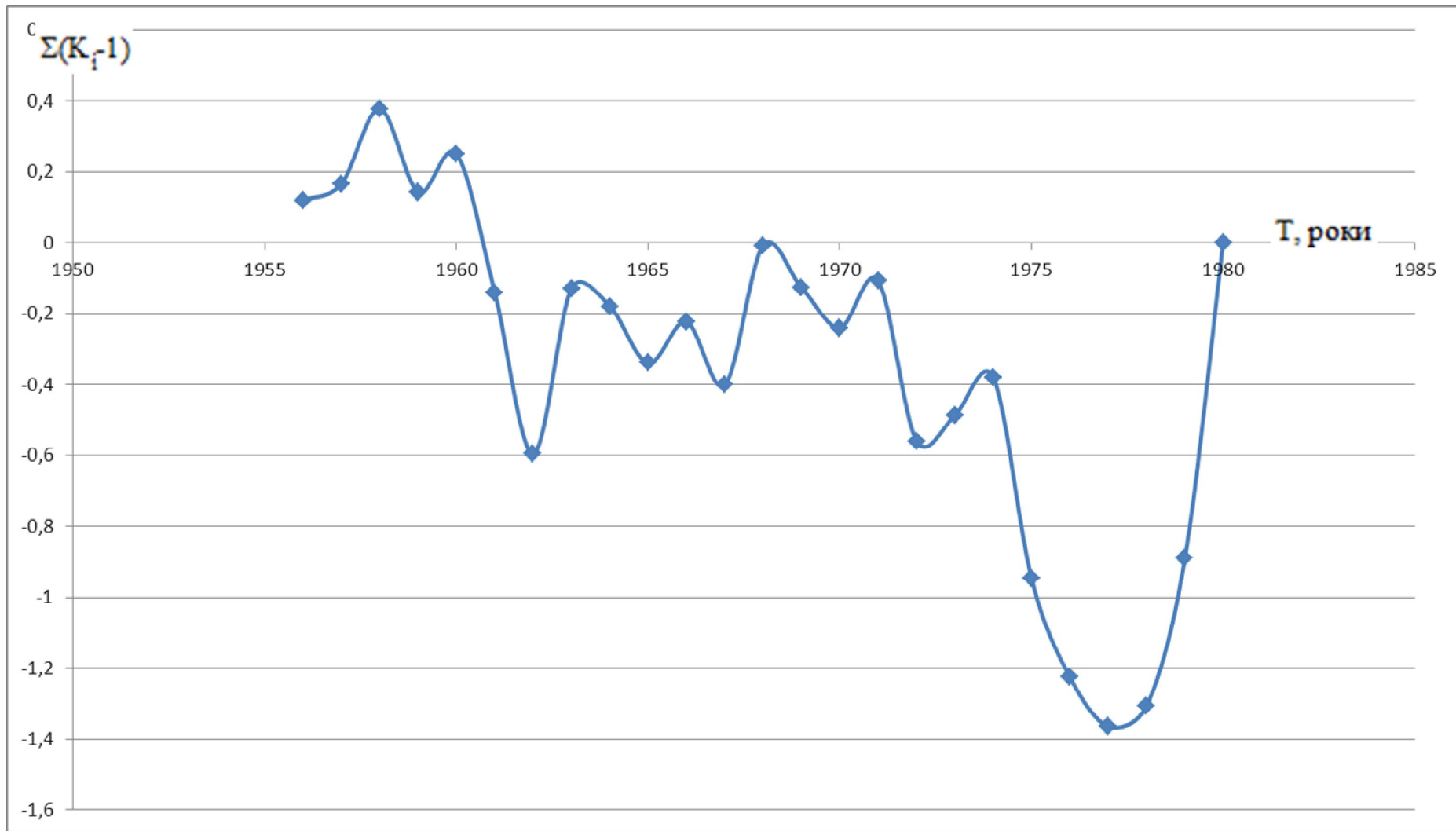


Рис В10- різницева інтегральна крива р. Пена- сл. Пени

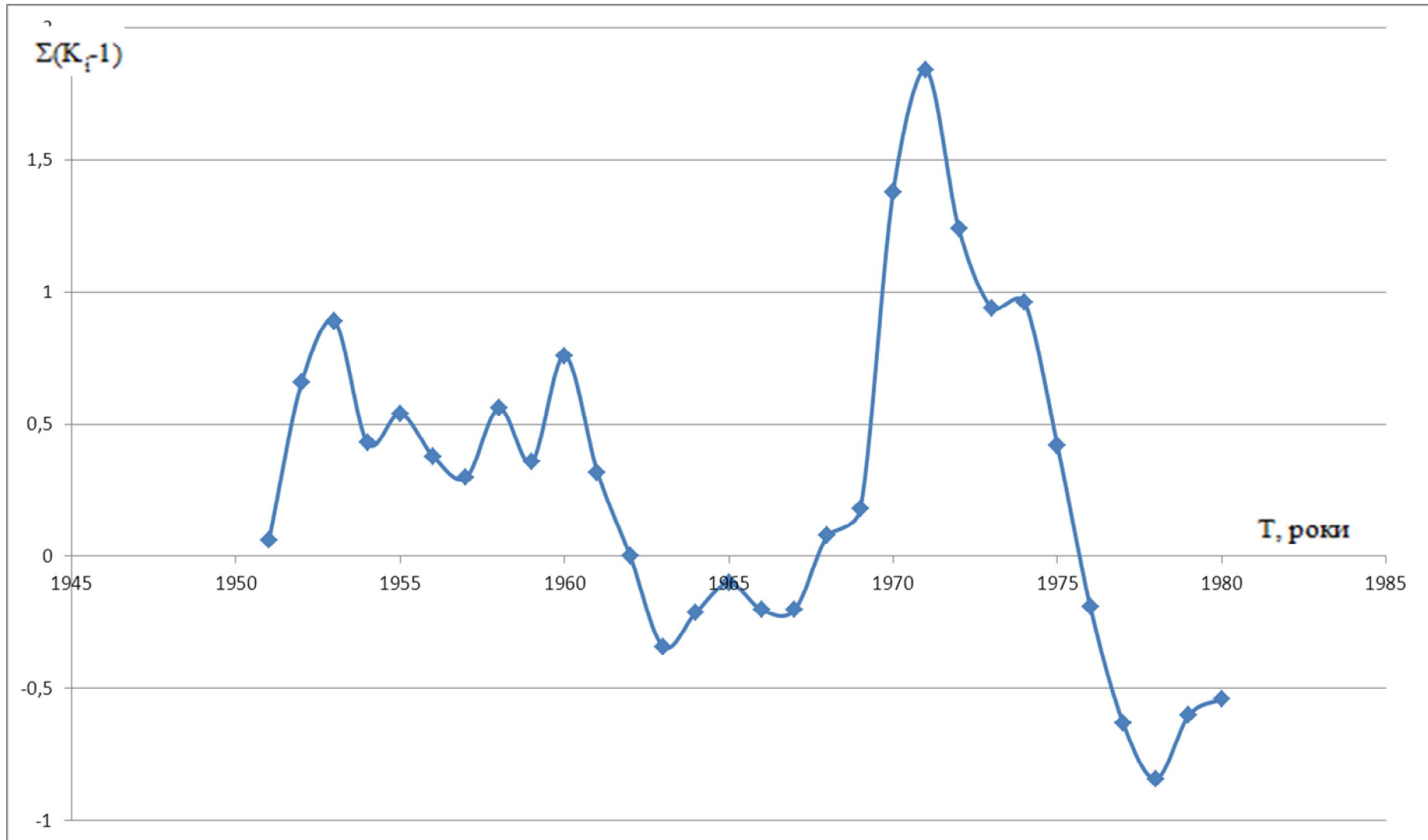


Рис В11- різницева інтегральна крива р. Суджа- сл.Замостьє

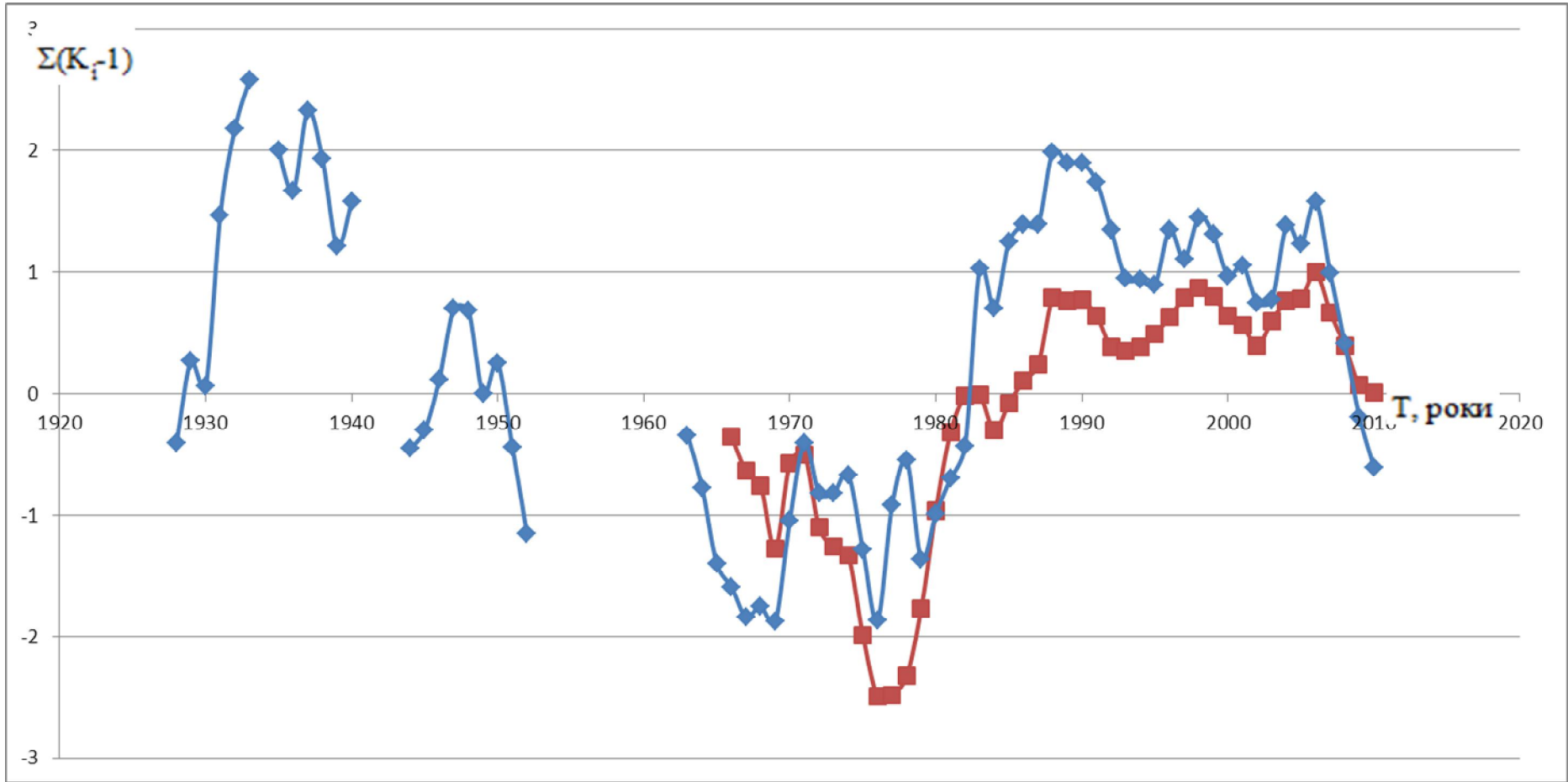


Рис В12- різницева інтегральна крива р. Грунь- м.Кобиляки та р. Хорол- м. Миргород

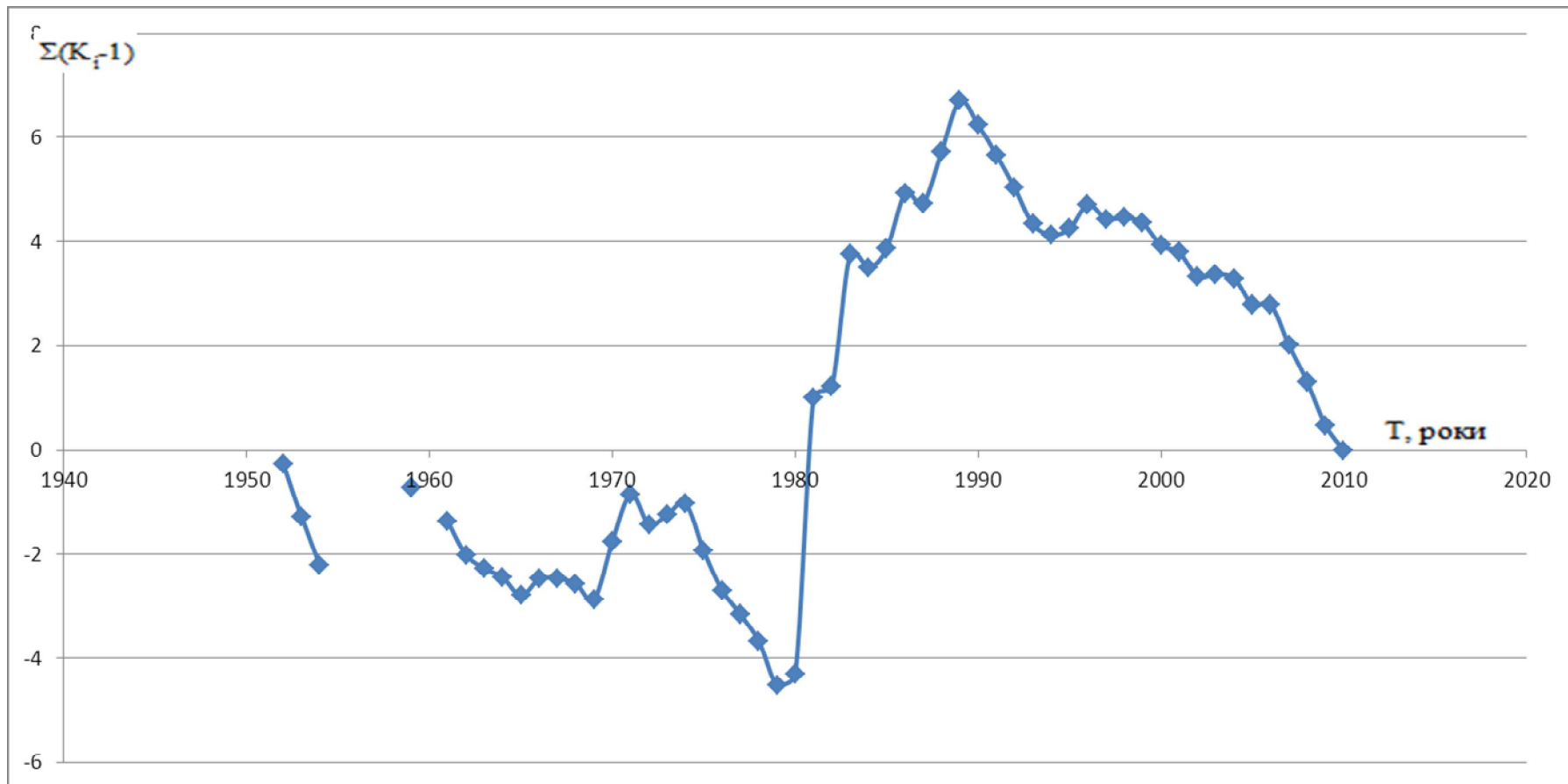


Рис В14- різницева інтегральна крива р. Голтва- с. Михновка

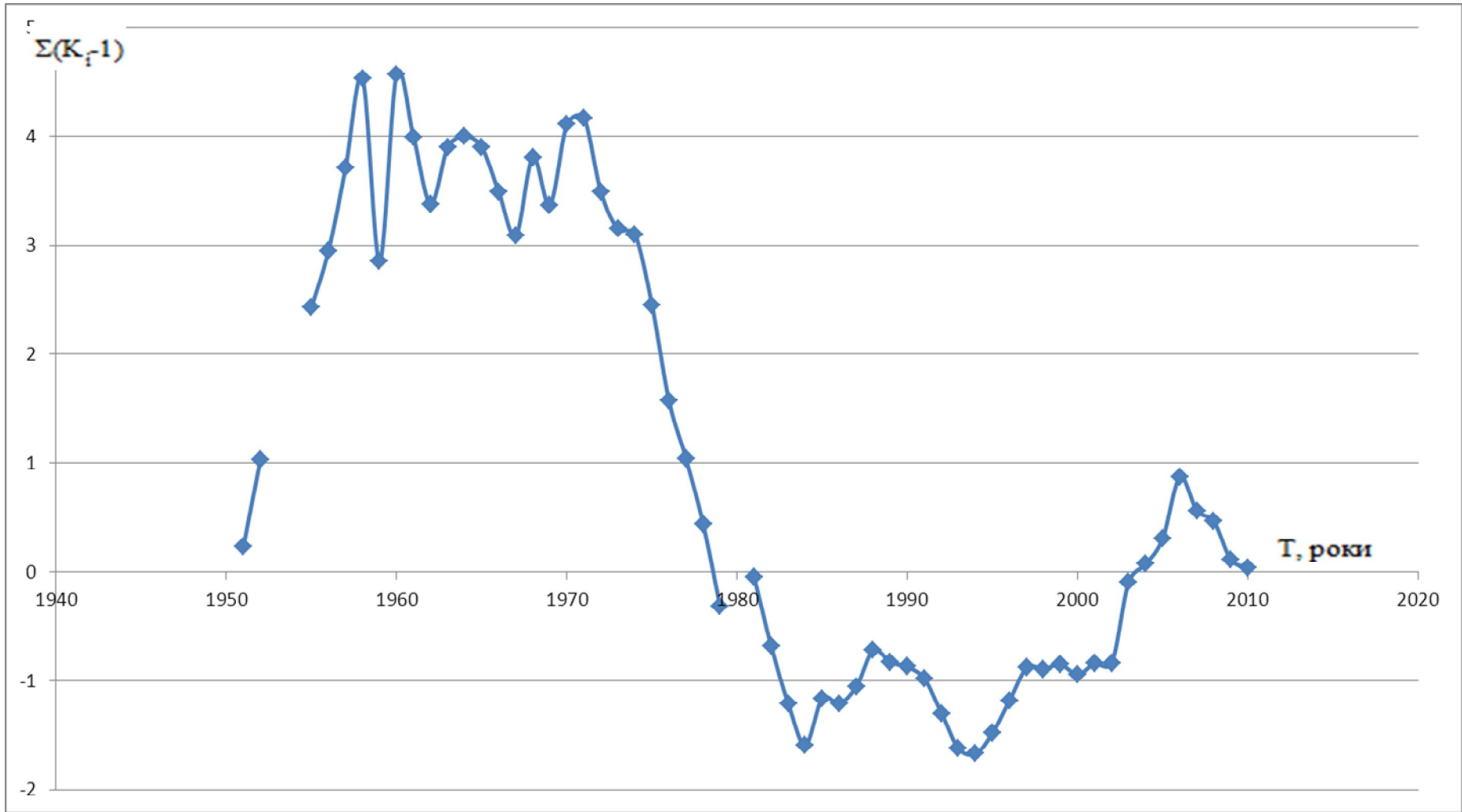


Рис В15- різницева інтегральна крива р.Мерла- м. Богодухів

Додаток В

Таблиця В.1 – Вихідні дані для побудови залежності середньої величини річного стоку, приведеної до умовної висоти $H=200$, від лісистості, середньої висоти та широти геометричних центрів водозборів річок Псел та Ворскла

№ за картою	Річка - пост	\bar{q} , л/(с·км ²)	$\bar{q}_{(H=200)}$, л/(с·км ²)	$H_{сер}$, м	f_L , %	φ° п.ш.
158	Псел – м. Обоянь	4,1	3,8	220	4	51,15
159	Псел – с. Крупец	3,3	3,3	200	4	51,05
160	Псел – м. Суми	3,1	3,25	190	6	51,13
161	Псел – м. Гадяч	3,0	3,3	180	9	50,87
163	Псел – с. Запсілля	2,3	2,9	160	8	50,35
164	Пена – с. Пени	2,6	2,6	200	4	50,45
165	Суджа – с. Замостьє	3,5	3,65	190	5	50,55
166	Грунь – с. Римарівка	3,1	3,7	160	3	50,61
168	Хорол – м. Миргород	2,2	3,25	130	5	50,36
169	Голтва – с. Михнівка	3,6	4,5	140	2	49,73
170	Ворскла – с. Яковлеве	4,4	4,1	220	4	50,61
172	Ворскла – с. Козинка	2,9	3,05	190	7	50,54
173	Ворскла – с. Чернеччина	2,7	3,15	170	9	50,01
175	Ворскла -с. Кобеляки	2,6	3,5	140	10	50,69
176	Ворскла – с. Мокра Орловка	2,9	3,2	180	11	50,62
177	Ворскліця – с. Березівка	2,1	2,55	170	12	50,19
178	Мерла – м. Богодухів	2,6	2,9	180	10	50,36

Додаток Г

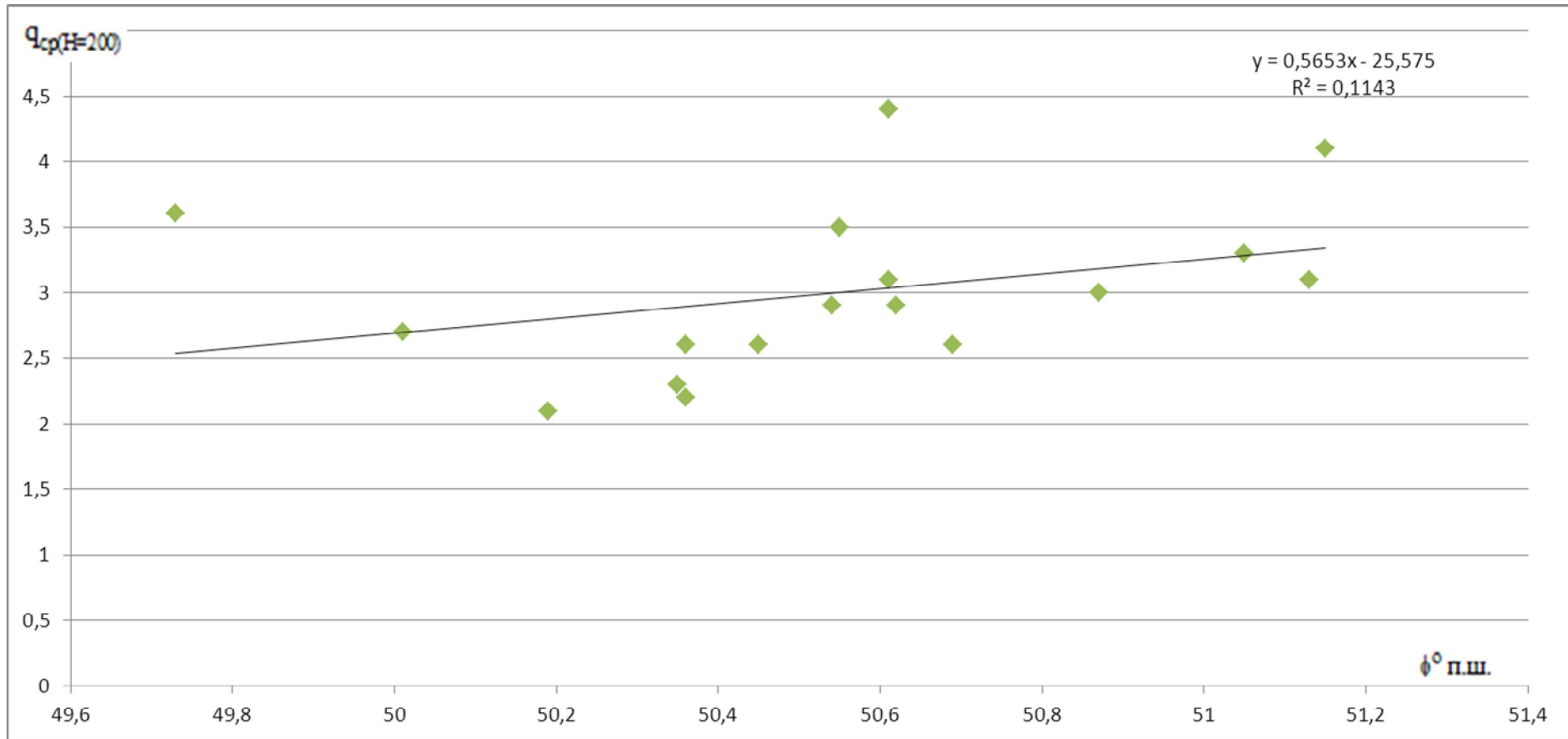


Рис Г.1 - Залежність середніх модулів річного стоку, приведених до умовної висоти $N=200$, від широти геометричних центрів водозборів.