

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ЕКОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
ДО ПРАКТИЧНИХ ЗАНЯТЬ
З ДИСЦИПЛІНИ "ГІДРОЛОГІЧНІ РОЗРАХУНКИ"**

Одеса – 2005

Методичні вказівки до практичних занять з дисципліни “Гідрологічні розрахунки”. / доц.Овчарук В.А.– Одеса, ОДЕКУ, 2005. – 47 с.

Методичні вказівки призначені для студентів IV курсу денної форми навчання за спеціальністю “Гідрологія та гідрохімія”.

ЗМІСТ

Передмова.....	4
1 Розрахунок статистичних параметрів річного стоку при наявності тривалих рядів спостережень.....	5
1.1 Вибір розрахункового періоду для визначення норми річного стоку. Методи згладжування хронологічних рядів.....	7
1.1.1 Згладжування хронологічних рядів методом ковзного осереднення.....	7
1.2 Метод різницевих інтегральних кривих.....	10
2 Обчислення статистичних параметрів річного стоку при коротких рядах спостережень.....	19
2.1 Приведення статистичних параметрів річного стоку коротких рядів спостережень до багаторічного періоду графічним способом...	19
2.2 Приведення статистичних параметрів річного стоку коротких рядів спостережень до багаторічного періоду графо-аналітичним методом.....	21
2.3 Аналітичний спосіб приведення статистичних параметрів річного стоку.....	22
2.4 Приведення ряду до багаторічного періоду методом коефіцієнтів.....	24
3 Визначення статистичних параметрів річного стоку за відсутності гідрометричних спостережень.....	38
Перелік контрольних запитань до практичних завдань.....	45
Література.....	47

ПЕРЕДМОВА

Мета роботи – вивчення процесів та закономірностей формування річкового стоку, принципів та методів визначення кількісних характеристик стоку у різних водогосподарських та гідрометеорологічних умовах, його формування для забезпечення ефективної діяльності споживачів водних ресурсів.

Завдання – вироблення у студентів розуміння суті основних методів гідрологічних розрахунків стоку та одержання студентами навичок до розрахунків характеристик стоку у різні фази його формування при наявності, відсутності та недостатності вихідної інформації.

Після виконання завдання студенти повинні:

- **знати** основні методи та підходи до розрахунків характеристик стоку при наявності, недостатності та відсутності вихідної інформації.
- **вміти** виконувати розрахунки характеристик стоку при наявності, недостатності та відсутності вихідної інформації.

Для успішного засвоєння дисципліни необхідні знання та вміння з таких дисциплін як “Теорія ймовірностей та математична статистика”, “Методи аналізу та обробки гідрометеорологічної інформації”.

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. 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.

Норма стоку може бути виражена як середньорічна витрата води \bar{Q} м³/с, середній річний об’єм стоку W в м³ або км³, середній річний модуль стоку \bar{q} в л/скм², середній річний шар стоку \bar{Y} в мм, віднесений до площі водозбору F .

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

$$\bar{q}_N = \frac{q_1 + q_2 + \dots + q_{n-1} + q_n}{N} = \frac{\sum_{i=1}^N q_i}{N}, \quad (1.1)$$

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 (1.1), буде відрізнятися від істинного середнього значення \bar{q}_N при $N \rightarrow \infty$ на деяку величину σ_{q_n} , тобто

$$\bar{q}_n = \bar{q}_n \pm \sigma_{q_n}, \quad (1.2)$$

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:

$$\sigma_n = \pm \frac{\sigma_q}{\bar{q}_n \sqrt{n}} \cdot 100\% = \pm \frac{100 C_v}{\sqrt{n}} \%, \quad (1.3)$$

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:

$$C_v = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (K_i - 1)^2}{n - 1}}, \quad (1.4)$$

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

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

$$\sigma_{C_v} = \sqrt{\frac{1 + C_v^2}{2n}} 100\%. \quad (1.5)$$

Випадкові середні квадратичні помилки вибірових середніх визначаються за наближеною залежністю:

$$\sigma_{\bar{q}} = \frac{\sigma_q}{\sqrt{n}} \sqrt{\frac{1 + r_1}{1 - r_1}} \quad (1.6)$$

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

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

$$\sigma_{\bar{q}} = \frac{\sigma_q}{\sqrt{n}} \sqrt{1 + \frac{2}{n} \cdot \frac{r_1}{1 - r_1} \cdot \frac{1 - r_1^n}{1 - r_1}}, \quad (1.7)$$

де r_1 - коефіцієнт кореляції між суміжними величинами стоку.

У свою чергу r_1 розраховується за формулою:

$$r_1 = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} (q_i - \bar{q}_1) \cdot (q_{i+1} - \bar{q}_2)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n-1} (q_i - \bar{q}_1)^2 \cdot \sum_{i=2}^n (q_i - \bar{q}_2)^2}}, \quad (1.8)$$

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

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 $\sigma_{C_v} \leq 15\%$.

1.1 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 (рис.1.1).

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.

1.1.1 Згладжування хронологічних рядів методом ковзного осереднення

Ковзне згладжування коливань річного стоку визначають за формулою:

$$\tilde{q}_i = \frac{1}{T} \sum_{k=-\frac{T-1}{2}}^{\frac{T-1}{2}} q_{i+k} \quad (1.9)$$

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

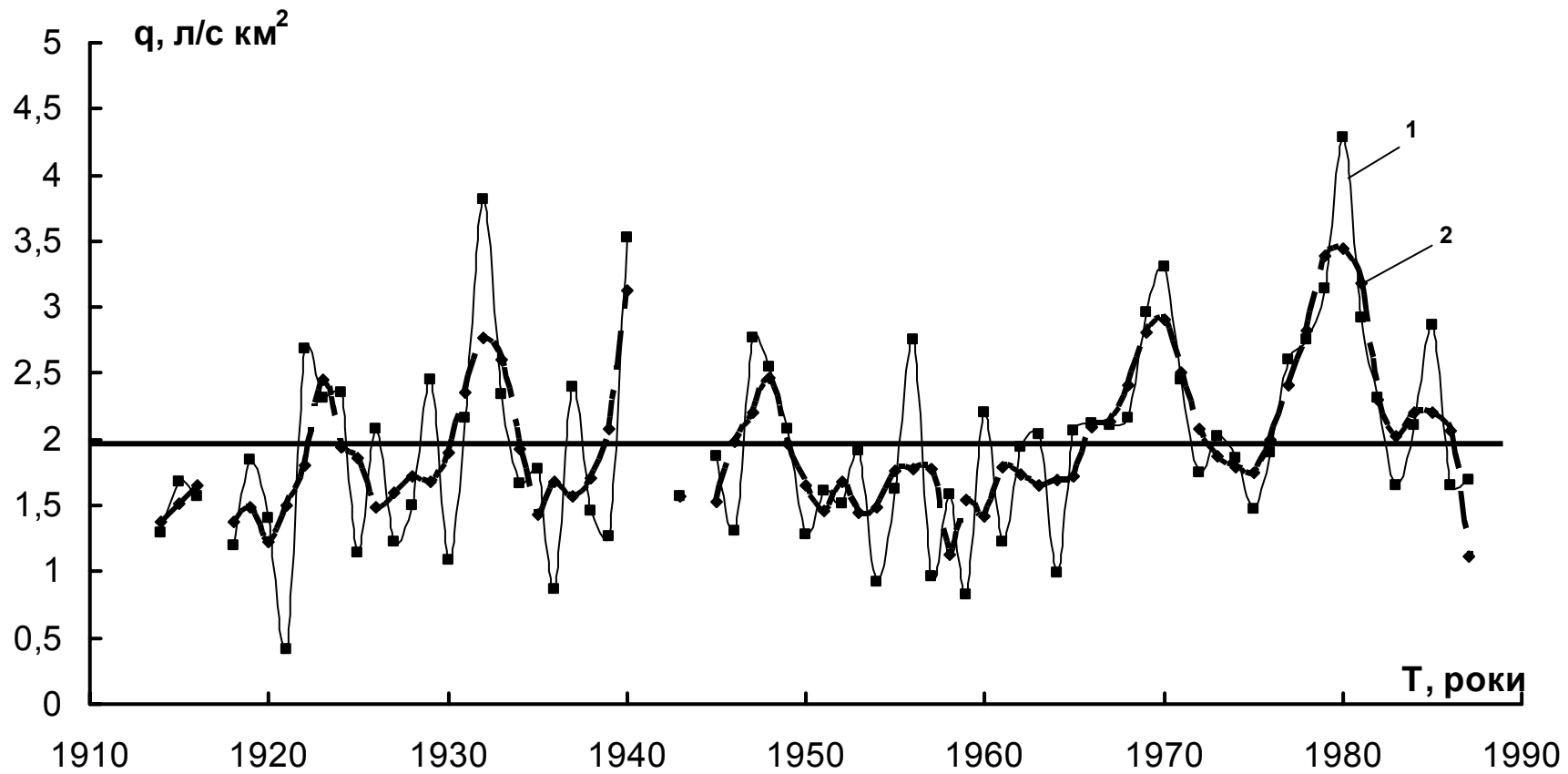


Рисунок 1.1 – Хронологічний графік коливань річного стоку (1) та графік бігучих середніх (2) р.Південний Буг – с.Олександрівка

При лінійному згладжуванні хронологічних графіків за трьохрічками:

$$\begin{aligned}
 \tilde{q}_1 &= \frac{1}{6}(5q_1 + 2q_2 - q_3) \\
 \tilde{q}_2 &= \frac{1}{3}(q_1 + q_2 + q_3), \\
 \tilde{q}_3 &= \frac{1}{3}(q_2 + q_3 + q_4), \\
 &\cdot \\
 &\cdot \\
 &\cdot \\
 \tilde{q}_{n-1} &= \frac{1}{3}(q_{n-2} + q_{n-1} + q_n), \\
 \tilde{q}_n &= \frac{1}{6}(5q_n + 2q_{n-1} - q_{n-2}).
 \end{aligned} \tag{1.10}$$

Лінійне згладжування хронологічних графіків за п'ятирічками:

$$\begin{aligned}
 \tilde{q}_1 &= \frac{1}{5}(3q_1 + 2q_2 + q_3 - q_5) \\
 \tilde{q}_2 &= \frac{1}{10}(4q_1 + 3q_2 + 2q_3 + q_4), \\
 \tilde{q}_3 &= \frac{1}{5}(q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + q_5), \\
 &\cdot \\
 &\cdot \\
 &\cdot \\
 \tilde{q}_{n-1} &= \frac{1}{5}(q_{n-4} + q_{n-3} + q_{n-2} + q_{n-1} + q_n), \\
 \tilde{q}_n &= \frac{1}{10}(4q_n + 3q_{n-1} + 2q_{n-2} + q_{n-3}).
 \end{aligned} \tag{1.11}$$

Якщо після першого етапу суттєвого згладжування не відбулося, то можна виконати повторне згладжування тим же багаточленом (рис.1.1).

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.Рожественського та А.І.Чеботарьова [4]. Досить часто в практиці розрахунків використовуються різницеві інтегральні криві.

1.2 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:

$$\sum_{i=1}^t (K_i - 1) = f(t), \quad (1.12)$$

де K_i - модульний коефіцієнт.

При побудуванні різницевої інтегральної кривої (рис.1.2) 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:

$$\operatorname{tg} \alpha = (K_i - 1)_{\text{cp}} = \frac{l_k - l_n}{m}, \quad (1.13)$$

де l_k, l_n - відповідно кінцева та початкова ординати інтегральної кривої для періоду часу, який розглядається;
 m – число років у періоді часу (рис 1.2).

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

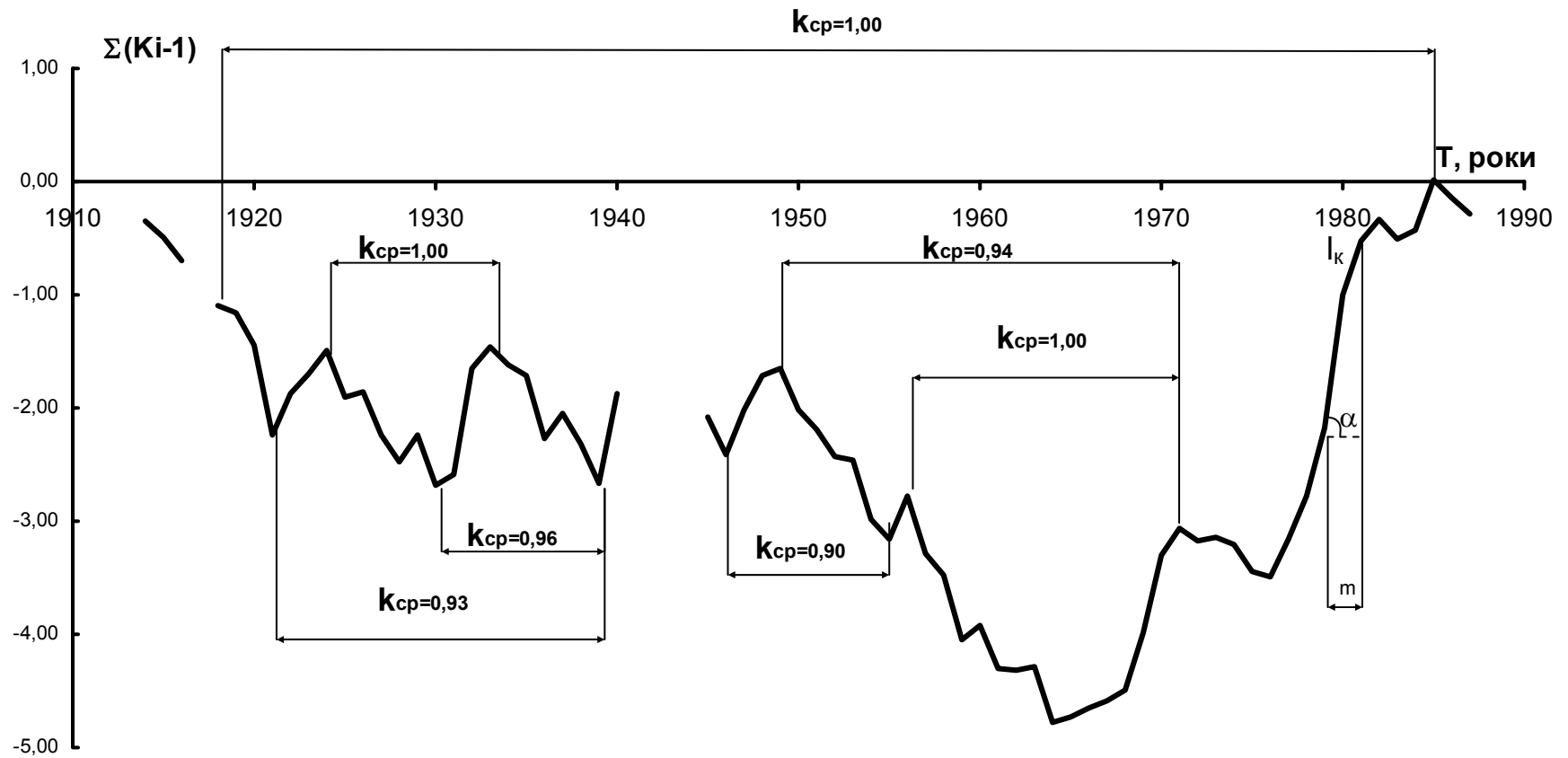


Рисунок 1.2 – Графік різницевої інтегральної кривої р.Південний Буг – с.Олександрівка

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

Приклад розрахунку

Дано: середньорічні модулі стоку за період з 1914 по 1985 рр для р.Південний Буг – с.Олександрівка (табл.1.1). Площа водозбору $F=46200$ км².

Таблиця 1.1 – Середньорічні модулі стоку і ковзне осереднення хронологічного ряду середньобагаторічних модулів стоку за трьохрічками р.Південний Буг – с.Олександрівка, $F=46200$ км²

№ п/п	рік	Модуль стоку q_i , л/скм ²	Згладжені модулі стоку q_3 л/скм ²
1	1914	1.29	1.37
2	1915	1.68	1.51
3	1916	1.57	1.65
4	1918	1.20	1.38
5	1919	1.84	1.48
6	1920	1.41	1.22
7	1921	0.41	1.50
8	1922	2.68	1.80
9	1923	2.32	2.45
10	1924	2.36	1.94
11	1925	1.15	1.86
12	1926	2.08	1.48
13	1927	1.22	1.60
14	1928	1.50	1.72
15	1929	2.45	1.68
16	1930	1.09	1.90
17	1931	2.16	2.35
18	1932	3.81	2.77
19	1933	2.34	2.61
20	1934	1.67	1.93
21	1935	1.77	1.44

Продовження таблиці 1.1

№ п/п	рік	Модуль стоку q_i , л/скм ²	Згладжуванні модулі стоку q_3 л/скм ²
22	1936	0.87	1.68
23	1937	2.40	1.58
24	1938	1.46	1.71
25	1939	1.27	2.09
26	1940	3.53	3.12
27	1943	1.57	1.57
28	1945	1.87	1.53
29	1946	1.31	1.98
30	1947	2.77	2.21
31	1948	2.55	2.47
32	1949	2.08	1.97
33	1950	1.28	1.66
34	1951	1.61	1.47
35	1952	1.51	1.68
36	1953	1.91	1.45
37	1954	0.92	1.48
38	1955	1.62	1.76
39	1956	2.75	1.78
40	1957	0.97	1.77
41	1958	1.59	1.13
42	1959	0.83	1.54
43	1960	2.21	1.42
44	1961	1.23	1.79
45	1962	1.94	1.74
46	1963	2.04	1.66
47	1964	0.99	1.70
48	1965	2.06	1.72
49	1966	2.12	2.10
50	1967	2.11	2.13
51	1968	2.16	2.41
52	1969	2.96	2.81
53	1970	3.31	2.91
54	1971	2.45	2.50
55	1972	1.75	2.08
56	1973	2.03	1.88
57	1974	1.86	1.79

Продовження таблиці 1.1

№ п/п	рік	Модуль стоку q_i , л/скм ²	Згладжуванні модулі стоку q_3 л/скм ²
58	1975	1.48	1.75
59	1976	1.90	1.99
60	1977	2.60	2.42
61	1978	2.75	2.83
62	1979	3.14	3.39
63	1980	4.29	3.45
64	1981	2.92	3.18
65	1982	2.32	2.30
66	1983	1.65	2.03
67	1984	2.11	2.21
68	1985	2.86	2.21
69	1986	1.65	2.07
70	1987	1.69	1.11

1. Для наведеного ряду розраховується середньобогаторічне значення та коефіцієнт варіації за формулами (1.1) та (1.4).

$$\bar{q}_n = \frac{\sum_{i=1}^N q_i}{N} = \frac{134}{68} = 1.97 \text{ л/скм}^2;$$

$$C_v = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (K_i - 1)^2}{n - 1}} = \sqrt{\frac{9.69}{67}} = 0.38.$$

За формулою (1.3) оцінюється похибка середньобогаторічного значення \bar{q} :

$$\sigma_n = \pm \frac{100 C_v}{\sqrt{n}} \% = \frac{0.38}{\sqrt{68}} \cdot 100\% = 4.6\%$$

Стандартна похибка коефіцієнта варіації обчислюється за формулою (1.5):

$$\sigma_{C_v} = \sqrt{\frac{1 + C_v^2}{2n}} 100\% = \sqrt{\frac{1 + 0.14}{2 \cdot 68}} 100\% = 9.2\%.$$

Таким чином, похибки при розрахунках \bar{q} та C_v укладаються в рамки припустимих, а середньобаторічне значення \bar{q} може вважатися нормою стоку - \bar{q}_n .

За даними таблиці 1.1 будується хронологічний графік коливань річного стоку (рис.1.1), на нього наноситься норма стоку \bar{q}_n .

2. За формулою (1.10) на підставі табл.1.1 виконане ковзне осереднення, результати якого занесені в табл.1.1. Якщо ряд перерваний, то осереднення перед розривом виконується як для кінцевих членів ряду, а після розриву – як для перших членів ряду.

3. Значення згладженого ряду наносяться на хронологічний графік коливань річного стоку (рис.1.1). Аналіз рисунку показує, що на хронологічному графіку коливань річного стоку після згладжування по трьохрічкам можна виділити декілька багатоводних та маловодних угруповань: з 1914 р. до 1922 р., з 1925 до 1930 р, з 1934 по 1939 р, з 1949 до 1973 р, з 1973 до 1976 р спостерігались маловодні угруповання, а з 1923 р до 1924, з 1931 по 1933 р, з 1946 по 1948 р, з 1966 до 1972 р і з 1977 до 1983 р. – багатоводні.

4. Для розрахунку ординат різницевої інтегральної кривої середньорічні модулі було внесено із табл.1.1 до табл.1.2 у хронологічному порядку. Для кожного члена ряду розраховано значення модульних

коефіцієнтів $K_i = \frac{q_i}{\bar{q}_n}$. Для контролю виконаної роботи знаходиться $\sum_{i=1}^n K_i$,

яка повинна приблизно дорівнювати кількості членів ряду N . У

наведеному прикладі $\sum_{i=1}^{68} = 67.9$, а $N=68$. Наступний етап полягає у

розрахунку відхилення модульних коефіцієнтів K_i від середнього

значення, тобто одиниці. Сума цих відхилень $\sum_{i=1}^n (K_i - 1)$ повинна

дорівнювати або бути близькою до нуля. Як видно із табл.1.2 $\sum_{i=1}^n (K_i - 1)$

дорівнює 0.11. Це розходження пов'язане із точністю розрахунків і його

можна вважати припустимим, виходячи із умови, що ця похибка не повинна бути більшою за $\left(\frac{N}{4} \cdot 0.01\right)$. Далі, маючи значення $\sum_{i=1}^n (K_i - 1)$, будується різницева інтегральна крива (рис.1.2). По характерних ділянках на ній можна виділити такі цикли водності: з 1921 до 1939 р. ($K_{cp} = 0.93$), з 1946 по 1955 р ($K_{cp} = 0.90$), з 1924 до 1933 р. ($K_{cp} = 1.00$), з 1949 до 1971 ($K_{cp} = 0.94$) та з 1951 по 1971р ($K_{cp} = 1.00$). За розрахунковий можна прийняти період, у якому величина K_{cp} знаходиться у межах від 0.95 до 1.05. Якщо $K_{cp} < 1.0$, то у розрахунковому періоді переважає маловодна фаза, при $K_{cp} > 1.0$ - багатоводна.

Таким чином, за розрахунковий для визначення норми стоку на р.Південний Буг – с.Олександрівка можна прийняти періоди з 1921 до 1933, з 1931 до 1939 р. та з 1956 до 1971 р., а також увесь період з 1918 до 1985 р.

Таблиця 1.2 – Розрахунок ординат різницевої інтегральної кривої для басейну р.Південний Буг – с.Олександрівка, $F=46200 \text{ км}^2$

№ п/п	роки	Модуль стоку q_i , л/с км^2	Модульні коефіцієнти, K_i	$(K_i - 1)$	$\sum (K_i - 1)$
1	1914	1.29	0.65	-0.35	-0.35
2	1915	1.68	0.85	-0.15	-0.50
3	1916	1.57	0.80	-0.20	-0.70
4	1918	1.20	0.61	-0.39	-1.09
5	1919	1.84	0.93	-0.07	-1.16
6	1920	1.41	0.72	-0.28	-1.44
7	1921	0.41	0.21	-0.79	-2.23
8	1922	2.68	1.36	0.36	-1.87
9	1923	2.32	1.18	0.18	-1.69
10	1924	2.36	1.20	0.20	-1.50
11	1925	1.15	0.58	-0.42	-1.91
12	1926	2.08	1.06	0.06	-1.86
13	1927	1.22	0.62	-0.38	-2.24

Продовження таблиці 1.2

№ п/п	роки	Модуль стоку q_i , л/скм ²	Модульні коефіцієнти, K_i	$(K_i - 1)$	$\Sigma(K_i - 1)$
14	1928	1.50	0.76	-0.24	-2.48
15	1929	2.45	1.24	0.24	-2.23
16	1930	1.09	0.55	-0.45	-2.68
17	1931	2.16	1.10	0.10	-2.58
18	1932	3.81	1.93	0.93	-1.65
19	1933	2.34	1.19	0.19	-1.46
20	1934	1.67	0.85	-0.15	-1.61
21	1935	1.77	0.90	-0.10	-1.71
22	1936	0.87	0.44	-0.56	-2.27
23	1937	2.40	1.22	0.22	-2.05
24	1938	1.46	0.74	-0.26	-2.31
25	1939	1.27	0.64	-0.36	-2.67
26	1940	3.53	1.79	0.79	-1.86
27	1943	1.57	0.80	-0.20	-2.08
28	1945	1.87	0.95	-0.05	-2.08
29	1946	1.31	0.66	-0.34	-2.42
30	1947	2.77	1.41	0.41	-2.01
31	1948	2.55	1.29	0.29	-1.71
32	1949	2.08	1.06	0.06	-1.66
33	1950	1.28	0.65	-0.35	-2.01
34	1951	1.61	0.82	-0.18	-2.19
35	1952	1.51	0.77	-0.23	-2.43
36	1953	1.91	0.97	-0.03	-2.46
37	1954	0.92	0.47	-0.53	-2.99
38	1955	1.62	0.82	-0.18	-3.17
39	1956	2.75	1.40	0.40	-2.77
40	1957	0.97	0.49	-0.51	-3.28
41	1958	1.59	0.81	-0.19	-3.47
42	1959	0.83	0.42	-0.58	-4.05
43	1960	2.21	1.12	0.12	-3.93
44	1961	1.23	0.62	-0.38	-4.30
45	1962	1.94	0.98	-0.02	-4.32

Продовження таблиці 1.2

№ п/п	роки	Модуль стоку q_i , л/скм ²	Модульні коефіцієнти, K_i	$(K_i - 1)$	$\sum (K_i - 1)^2$
46	1963	2.04	1.04	0.04	-4.28
47	1964	0.99	0.50	-0.50	-4.78
48	1965	2.06	1.05	0.05	-4.73
49	1966	2.12	1.08	0.08	-4.66
50	1967	2.11	1.07	0.07	-4.59
51	1968	2.16	1.10	0.10	-4.49
52	1969	2.96	1.50	0.50	-3.99
53	1970	3.31	1.68	0.68	-3.31
54	1971	2.45	1.24	0.24	-3.06
55	1972	1.75	0.89	-0.11	-3.18
56	1973	2.03	1.03	0.03	-3.15
57	1974	1.86	0.94	-0.06	-3.20
58	1975	1.48	0.75	-0.25	-3.45
59	1976	1.90	0.96	-0.04	-3.49
60	1977	2.60	1.32	0.32	-3.17
61	1978	2.75	1.40	0.40	-2.77
62	1979	3.14	1.59	0.59	-2.18
63	1980	4.29	2.18	1.18	-1.00
64	1981	2.92	1.48	0.48	-0.52
65	1982	2.32	1.18	0.18	-0.34
66	1983	1.65	0.84	-0.16	-0.50
67	1984	2.11	1.07	0.07	-0.43
68	1985	2.86	1.45	0.45	0.02
69	1986	1.65	0.84	-0.16	-0.14
70	1987	1.69	0.86	-0.14	-0.28

2 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 [3] 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 [2].

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.

2.1 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:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} (q_i - \bar{q})(q_i^a - \bar{q}^a)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (q_i - \bar{q})^2 \sum_{i=1}^{n-1} (q_i^a - \bar{q}^a)^2}}, \quad (2.1)$$

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:

$$C_v = A \frac{\bar{q}_n^a}{\bar{q}_n} C_v^a, \quad (2.2)$$

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 [2]:

$$\sigma_{\bar{q}_n} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}, \quad (2.3)$$

де σ_1 - похибка обчислення норми річного стоку річки-аналога, яка визначається за формулою (1.3);

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

$$\sigma_2 = \frac{C_v \sqrt{1-r^2}}{\sqrt{n}}, \quad (2.4)$$

де C_v - коефіцієнт варіації річного стоку для розрахункового створу.

2.2 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.

Приведення виконується за схемою.

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

$$P = \frac{m}{N+1} \cdot 100\%, \quad (2.5)$$

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 :

$$S = \frac{q_{5\%} + q_{95\%} - 2q_{50\%}}{q_{5\%} - q_{95\%}} \quad (2.6)$$

За спеціальною таблицею [3] відповідно S встановлюють коефіцієнт C_s .

Середньоквадратичне відхилення σ_q розраховується за формулою

$$\sigma_q = \frac{q_{5\%} - q_{95\%}}{t_{5\%} - t_{95\%}}, \quad (2.7)$$

де $t_{5\%}, t_{95\%}$ - ординати нормованої кривої біноміального розподілу, які визначаються в залежності від S по спеціальним таблицям [3].

Середньобагаторічне значення (норма) річного стоку обчислюється за рівнянням

$$\bar{q}_n = q_{50\%} - \sigma_q \Phi_{50\%}, \quad (2.8)$$

Коефіцієнт варіації C_v знаходиться через співвідношення (2.7) та (2.8), тобто:

$$C_v = \frac{\sigma_q}{\bar{q}_n}. \quad (2.9)$$

2.3 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:

$$K = \frac{r \cdot \sigma}{\sigma^a}, \quad (2.10)$$

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

Похибка коефіцієнта регресії дорівнює:

$$\sigma_k = \frac{\sigma}{\sigma^a} \frac{1 - r^2}{\sqrt{n - 1}}, \quad (2.11)$$

Запишемо рівняння лінійної регресії для норми річного стоку:

$$\bar{q}_N = \bar{q}_n + r \frac{\sigma}{\sigma^a} (\bar{q}_N^a - \bar{q}_n^a), \quad (2.12)$$

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 (2.1).

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

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (q_i - \bar{q})^2}{n - 1}} \quad (2.13)$$

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

Коефіцієнт варіації приведенного ряду дорівнює:

$$C_v = \frac{\sigma}{\bar{q}_N} \sqrt{1 + r^2 \left(1 - \frac{\sigma^a}{\sigma_N^a} \right)}, \quad (2.15)$$

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

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

$$\sigma_{\bar{q}_N} = \frac{100\sigma}{\bar{q}_N \cdot \sqrt{n}} \sqrt{1 + r^2 \left(\frac{n}{N} \frac{\sigma_N^a}{\sigma^a} - 1 \right)} \quad (2.16)$$

2.4 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 (2.1). 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

$$\frac{\bar{q}_N^a}{q_n^a} = \frac{\bar{q}_N}{\bar{q}_n}, \quad (2.17)$$

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

Позначимо співвідношення $\frac{\bar{q}_N^a}{\bar{q}_n^a}$ як K_N , тоді для досліджуваного короткого ряду можна визначити норму стоку за виразом:

$$\bar{q}_N = K_N \bar{q}_n \quad (2.18)$$

Приклад розрахунку.

Виконати приведення статистичних параметрів річного стоку р.Південний Буг – м.Первомайськ графічним, графоаналітичним, аналітичним методами та за методом коефіцієнтів.

Дано: 1) середньорічні модулі стоку р.Південний Буг – м.Первомайськ за період спостережень з 1946 по 1960 рр. (табл.2.1). площа водозбору $F=44000 \text{ км}^2$.

2) Середньорічні модулі стоку річки-аналогу р.Південний Буг – с.Олександрівка за період спостережень з 1914 по 1987 рр. Площа водозбору $F=46200 \text{ км}^2$. Норма стоку $\bar{q}_N^a = 1.97 \text{ л/скм}^2$, коефіцієнт варіації $C_v = 0.38$, $C_s / C_v = 2.0$, середньоквадратична похибка $\bar{\sigma}_N^a = 4.6$ (розділ 1).

Запропонований аналог задовольняє принципу репрезентативності та відповідає необхідним вимогам.

Середнє значення річного модуля стоку р.Південний Буг – м.Первомайськ за період 1946-1960 рр. становить $\bar{q} = \frac{\sum q_i}{n} = \frac{26.45}{15} = 1.76 \text{ л/скм}^2$.

Для розрахунку коефіцієнту варіації складається таблиця 2.2. Коефіцієнт варіації дорівнює:

$$C_v = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (K_i - 1)^2}{n - 1}} = \sqrt{\frac{2.22}{14}} = 0.40.$$

Таблиця 2.1 – Середньорічні модулі стоку р.Південний Буг – м.Первомайськ та р.Південний Буг – с.Олександрівка за період спільних спостережень 1946-1960 рр.

№ п/п	рік	Модуль стоку q_i , л/скм ² р.Південний Буг – м.Первомайськ	Модуль стоку q_i , л/скм ² р.Південний Буг – с.Олександрівка
1	1946	1.48	1.31
2	1947	2.95	2.71
3	1948	2.32	2.55
4	1949	2.20	2.08
5	1950	1.22	1.28
6	1951	1.61	1.61
7	1952	1.59	1.51
8	1953	1.94	1.91
9	1954	0.88	0.92
10	1955	1.55	1.62
11	1956	3.06	2.75
12	1957	0.95	0.97
13	1958	1.57	1.59
14	1959	0.86	0.83
15	1960	2.27	2.21

Середня квадратична похибка \bar{q} встановлюється за формулою (1.3):

$$\sigma_n = \pm \frac{\sigma_q}{\bar{q}_n \sqrt{n}} \cdot 100\% = \pm \frac{100 C_v}{\sqrt{n}} \% = \frac{0.40}{\sqrt{15}} 100\% = 10.3\% > 10\%$$

Значення $\sigma_{\bar{q}}$ більше за припустиме, тому необхідно приведення ряду до багаторічного періоду.

Таблиця 2.2 – Розрахунок коефіцієнта варіації р.Південний Буг – м.Первомайськ

№ п/п	рік	Модуль стоку q_i , л/скм ²	Модульні коефіцієнти, K_i	$(K_i - 1)$	$\sum (K_i - 1)^2$
1	1946	1.48	0.841	-0.159	0.025
2	1947	2.95	1.676	0.676	0.457
3	1948	2.32	1.318	0.318	0.101
4	1949	2.20	1.250	0.250	0.063
5	1950	1.22	0.693	-0.307	0.094
6	1951	1.61	0.915	-0.085	0.007
7	1952	1.59	0.903	-0.097	0.009
8	1953	1.94	1.102	0.102	0.010
9	1954	0.88	0.500	-0.500	0.250
10	1955	1.55	0.881	-0.119	0.014
11	1956	3.06	1.739	0.739	0.546
12	1957	0.95	0.540	-0.460	0.212
13	1958	1.57	0.892	-0.108	0.012
14	1959	0.86	0.489	-0.511	0.261
15	1960	2.27	1.290	0.290	0.084
Сума			15.03	-0.010	0.0841

1. Відповідно до графічного способу будується залежність середньорічних модулів стоку розрахункової річки р.Південний Буг – м.Первомайськ та річки-аналога р.Південний Буг – с.Олександрівка за період з 1946 по 1960 рр. (рис.2.1).

Зв'язок прямолінійний, проходить через початок координат. Середнє відхилення точок від лінії зв'язку не перевищує 10%. Тангенс кута нахилу лінії зв'язку до осі аналога складає 0.96, тобто близький до лінії рівних значень.

Для підтвердження висновку розраховується коефіцієнт кореляції r за формулою (2.1) і заноситься у таблицю 2.3.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (\Delta q \cdot \Delta q^a)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \Delta q^2 \cdot \sum_{i=1}^n (\Delta q^a)^2}} = \frac{6.19}{\sqrt{6.64 \cdot 5.69}} = 0.98$$

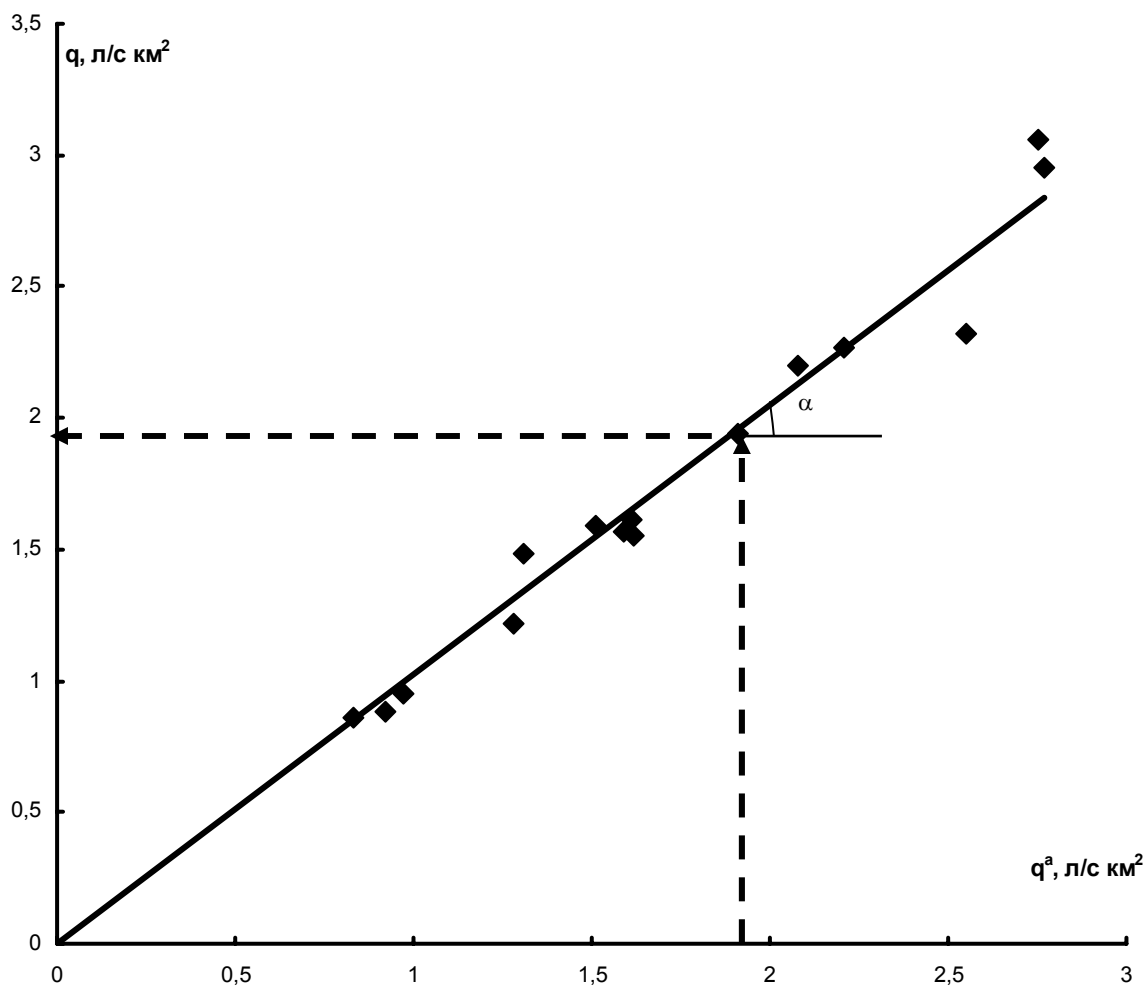


Рисунок 2.1 - Залежність середньорічних модулів стоку р.Південний Буг - с.Олександрівка (q^2) та р.Південний Буг - м.Первомайськ (q) за спільний період спостережень (1946 - 1960 рр.)

Таблиця 2.3 - Визначення кореляційної залежності між модулями річного стоку р.Південний Буг – с.Олександрівка та Південний Буг – м.Первомайськ

№ п/п	Рік	q_i , л/скм ²	q_i^a , л/скм ²	$\Delta = q_i - \bar{q}$	$\Delta^a = q_i^a - \bar{q}^a$	Δq^2	$(\Delta q^a)^2$	$\Delta q \times \Delta q^a$	$(\Delta q + \Delta q^a)^2$
1	1946	1.48	1.31	-0.28	-0.42	0.078	0.176	0.118	0.490
2	1947	2.95	2.77	1.19	1.04	1.416	1.082	1.238	4.973
3	1948	2.32	2.55	0.56	0.82	0.314	0.672	0.459	1.904
4	1949	2.20	2.08	0.44	0.35	0.194	0.123	0.154	0.624
5	1950	1.22	1.28	-0.54	-0.45	0.292	0.203	0.243	0.980
6	1951	1.61	1.61	-0.15	-0.12	0.023	0.014	0.018	0.073
7	1952	1.59	1.51	-0.17	-0.22	0.029	0.048	0.037	0.152
8	1953	1.94	1.91	0.18	0.18	0.032	0.032	0.032	0.130
9	1954	0.88	0.92	-0.88	-0.81	0.774	0.656	0.713	2.856
10	1955	1.55	1.62	-0.21	-0.11	0.044	0.012	0.023	0.102
11	1956	3.06	2.75	1.30	1.02	1.69	1.040	1.326	5.382
12	1957	0.95	0.97	-0.81	-0.76	0.656	0.578	0.616	2.465
13	1958	1.57	1.59	-0.19	-0.14	0.036	0.020	0.027	0.109
14	1959	0.86	0.83	-0.90	-0.90	0.810	0.810	0.810	3.240
15	1960	2.27	2.21	0.51	0.48	0.260	0.230	0.145	0.980
Σ		26.45	25.91	0.05	-0.04	6.648	5.697	6.058	
ср		1.76	1.73						

Такий високий коефіцієнт кореляції ще раз підтверджує правильність вибору річки-аналога.

По графіку зв'язку (рис.2.1) при $\bar{q}_N^a = 1.97$ л/скм² норма річного стоку р.Південний Буг – м.Первомайськ становить $\bar{q} = 1.89$ л/скм².

Коефіцієнт варіації дорівнює (при $A = \text{tg } \alpha = 0.96$).

$$C_v = A \frac{\bar{q}_N^a}{\bar{q}_N} C_v^a = 0.96 \frac{1.97}{1.89} 0.38 = 0.38$$

Коефіцієнт асиметрії прийнято за аналогом $C_s = 2C_v = 0.76$.

Похибка норми стоку приведенного ряду, розрахована за формулою (2.3), складає:

$$\sigma_{\bar{q}_n} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} = \sqrt{4.60^2 + 1.95^2} = 5.0\%$$

де $\sigma_1 = \sigma_{\bar{q}_N}^a = 4.6\%$;

$$\sigma_2 = \frac{C_v \sqrt{1-r^2}}{\sqrt{n}} 100\% = \frac{0.38 \sqrt{1-0.98^2}}{\sqrt{15}} 100\% = 1.95\%.$$

Тобто похибка зменшилася на 5.3%.

2. При використанні графоаналітичного методу спочатку для ряду модулів стоку річки-аналогу (р.Південний Буг – с.Олександрівка) за період 1914-1985 рр будується емпірична крива забезпеченості. З цією метою річні модулі стоку розташовують в порядку убунання та визначають рангові імовірності $P\%$ за формулою (2.5).

В таблиці 2.4 наведені ординати відповідної кривої забезпеченості.

Точки наносяться на клітчасту ймовірностей та проводиться згладжена емпірична крива забезпеченості (рис.2.2). Згідно з кривою опорні ординати становлять:

$$q_{5\%} = 3.15 \text{ л/скм}^2;$$

$$q_{50\%} = 1.74 \text{ л/скм}^2;$$

$$q_{95\%} = 0.80 \text{ л/скм}^2.$$

На підставі цих значень з графіка зв'язку (рис.2.1) знаходимо відповідні ординати для р.Південний Буг – м.Первомайськ. Тобто: $q_{5\%} = 3.05 \text{ л/скм}^2$, $q_{50\%} = 1.74 \text{ л/скм}^2$, $q_{95\%} = 0.80 \text{ л/скм}^2$. Ці значення використовуємо для подальших розрахунків. Коефіцієнт скісності дорівнює:

$$S = \frac{q_{5\%} + q_{95\%} - 2q_{50\%}}{q_{5\%} - q_{95\%}} = \frac{3.0 + 0.80 - 2 \cdot 1.75}{3.05 - 0.80} = 0.16$$

Таблиця 2.4 - Ординати емпіричної кривої забезпеченості
(р.Південний Буг – с.Олександрівка)

№ п/п	рік	q_i^a , л/скм ²	q_i^a ↓, л/скм ²	P, %
1	1914	1.29	4.29	1.41
2	1915	1.68	3.81	2.82
3	1916	1.57	3.53	4.23
4	1918	1.20	3.31	5.63
5	1919	1.84	3.14	7.04
6	1920	1.41	2.96	8.45
7	1921	0.41	2.92	9.86
8	1922	2.68	2.86	11.27
9	1923	2.32	2.77	12.68
10	1924	2.36	2.75	14.08
11	1925	1.15	2.75	15.49
12	1926	2.08	2.68	16.90
13	1927	1.22	2.60	18.31
14	1928	1.50	2.55	19.72
15	1929	2.45	2.45	21.13
16	1930	1.09	2.45	22.54
17	1931	2.16	2.40	23.94
18	1932	3.81	2.36	25.35
19	1933	2.34	2.34	26.76
20	1934	1.67	2.32	28.17
21	1935	1.77	2.32	29.58
22	1936	0.87	2.21	30.99
23	1937	2.40	2.16	32.39
24	1938	1.46	2.16	33.80
25	1939	1.27	2.12	35.21
26	1940	3.53	2.11	36.62
27	1943	1.57	2.11	38.03
28	1945	1.87	2.08	39.44
29	1946	1.31	2.08	40.85
30	1947	2.77	2.06	42.25
31	1948	2.55	2.04	43.66
32	1949	2.08	2.03	45.07
33	1950	1.28	1.94	46.48
34	1951	1.61	1.91	47.89
35	1952	1.51	1.90	49.30

Продовження таблиці 2.4

№ п/п	рік	q_i^a , л/см ²	$q_{i\downarrow}^a$, л/см ²	P, %
36	1953	1.91	1.87	50.70
37	1954	0.92	1.86	52.11
38	1955	1.62	1.84	53.52
39	1956	2.75	1.77	54.93
40	1957	0.97	1.75	56.34
41	1958	1.59	1.69	57.75
42	1959	0.83	1.68	59.15
43	1960	2.21	1.67	60.56
44	1961	1.23	1.65	61.97
45	1962	1.94	1.65	63.38
46	1963	2.04	1.62	64.79
47	1964	0.99	1.61	66.20
48	1965	2.06	1.59	67.61
49	1966	2.12	1.57	69.01
50	1967	2.11	1.57	70.42
51	1968	2.16	1.51	71.83
52	1969	2.96	1.50	73.24
53	1970	3.31	1.48	74.65
54	1971	2.45	1.46	76.06
55	1972	1.75	1.41	77.46
56	1973	2.03	1.31	78.87
57	1974	1.86	1.29	80.28
58	1975	1.48	1.28	81.69
59	1976	1.90	1.27	83.10
60	1977	2.60	1.23	84.51
61	1978	2.75	1.22	85.92
62	1979	3.14	1.20	87.32
63	1980	4.29	1.15	88.73
64	1981	2.92	1.09	90.14
65	1982	2.32	0.99	91.55
66	1983	1.65	0.97	92.65
67	1984	2.11	0.92	94.37
68	1985	2.86	0.87	95.77
69	1986	1.65	0.83	97.18
70	1987	1.69	0.41	98.59

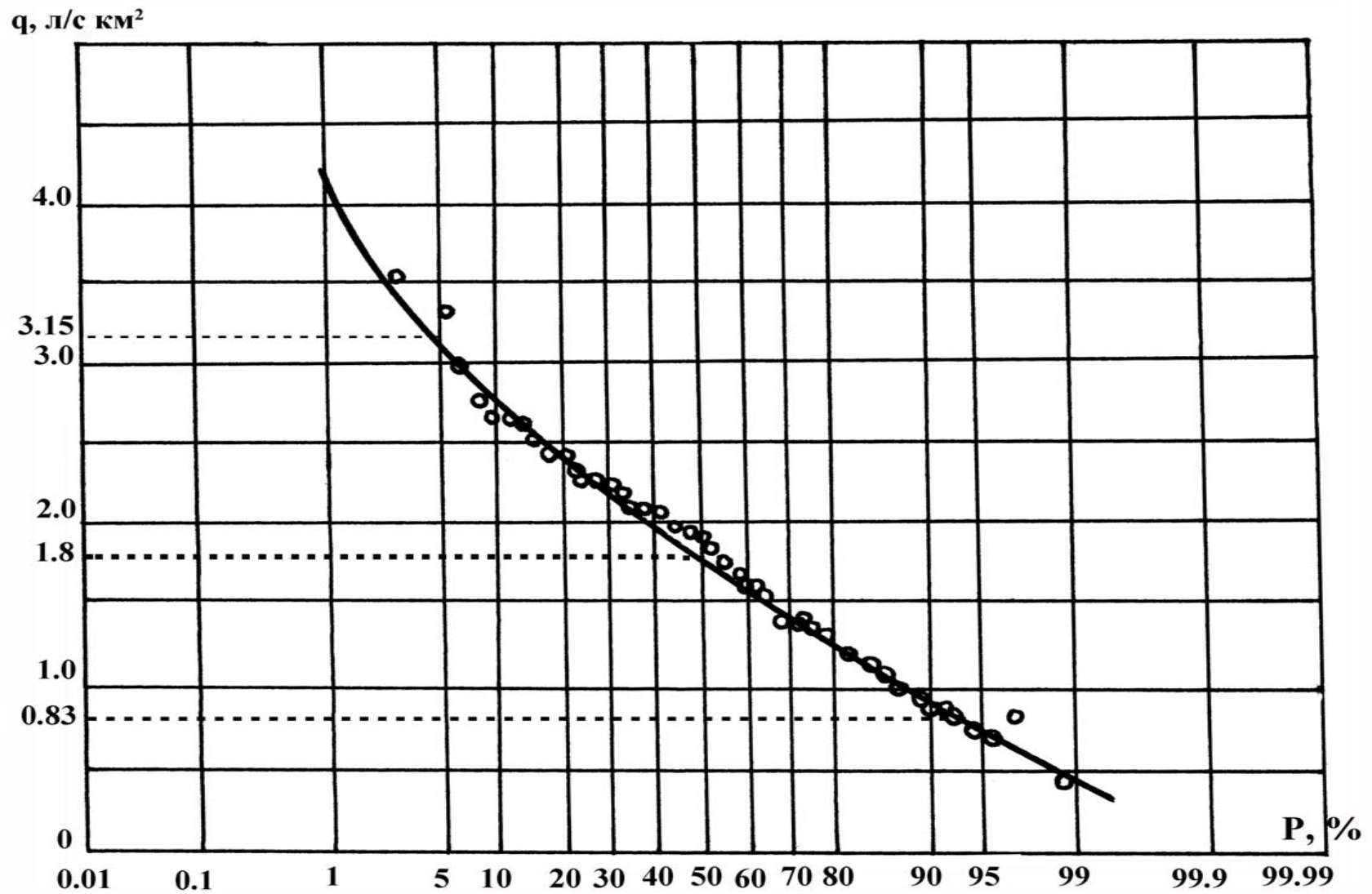


Рисунок 2.2 – Емпірична крива забезпеченості р.Південний Буг – с.Олександрівка, 1914-1985 рр.

З таблиці [3] при $S = 0.16$ коефіцієнт асиметрії $C_s = 0.60$ та нормовані ординати біноміальної кривої забезпеченості складають:

$$t_{5\%} = 1.80; \quad t_{50\%} = -0.13; \quad t_{95\%} = -1.45.$$

Середнє квадратичне відхилення становить:

$$\sigma = \frac{q_{5\%} - q_{95\%}}{t_{5\%} - t_{95\%}} = \frac{3.05 - 0.80}{3.25} = 0.69$$

Середньобагаторічний модуль стоку дорівнює:

$$\bar{q}_N = q_{50\%} - \sigma t_{50\%} = 1.75 - 0.69(-0.18) = 1.84 \text{ л/скм}^2.$$

Коефіцієнт варіації C_v дорівнює:

$$C_v = \frac{\sigma}{\bar{q}_N} = \frac{0.69}{1.84} = 0.37.$$

Похибка середньобагаторічного модуля стоку, розрахована як і для графічного способу, складає 5.0%.

3.Приведення значень модулів річного стоку р.Південний Буг – м.Первомайськ за рівнянням лінійної регресії (2.12) виконується за схемою.

По-перше, дані перевіряються за співвідношенням K/σ_k за формулами (2.10), (2.11).

Коефіцієнт регресії становить:

$$K = \frac{r\sigma}{\sigma^2} = \frac{0.98 \cdot 0.55}{0.82} = 0.68.$$

Похибка коефіцієнта регресії складає:

$$\sigma_k = \frac{r\sigma}{\sigma^2} \frac{1-r^2}{\sqrt{n-1}} = \frac{0.55}{0.82} \frac{1-0.98^2}{\sqrt{14}} = 0.01$$

Таким чином відношення $K/\sigma_k = 68 > 2$.

Приведені розрахунки зазначають надійність аналога р.Південний Буг – с.Олександрівка для приведення норми розрахункового створу за рівнянням лінійної регресії.

Середні значення модулів стоку досліджуваних річок за період спільних спостережень з 1946 по 1960 рр становлять для р.Південний Буг – м.Первомайськ $\bar{q}^a = 1.72$ л/скм² при нормі стоку $\bar{q}_N^a = 1.97$ л/скм².

Коефіцієнт кореляції, обчислений за формулою (2.1), згідно з табл.2.2 складає $r = 0.98$.

Середньоквадратичні відхилення σ та σ^a , розраховані за період 1946-1960 рр за допомогою табл.2.3, дорівнюють:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (q_i - \bar{q})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{2.24}{14}} = 0.55$$

$$\sigma^a = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (q^a_i - \bar{q}^a)^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{9.41}{14}} = 0.82.$$

Приведене значення норми річного стоку, згідно з (2.12). дорівнює:

$$\bar{q}_N = \bar{q}_n + r \frac{\sigma}{\sigma^a} (q_N^a - \bar{q}_n^a) = 1.76 + 0.98 \frac{0.55}{0.82} (1.97 - 1.72) = 1.92 \text{ л/скм}^2$$

Коефіцієнт варіації за формулою. (2.15) становить:

$$C_v = \frac{\sigma}{\bar{q}_N} \sqrt{1 + r^2 \left(1 - \frac{\sigma^a}{\sigma_N^a} \right)} = \frac{0.55}{1.92} \sqrt{1 - 0.98^2 \left[1 - \frac{0.82^2}{0.61^2} \right]} = 0.38.$$

Похибка приведенного значення норми річного стоку за рівнянням регресії (2.16) дорівнює:

$$\begin{aligned}\sigma_{\bar{q}_N} &= \frac{100\sigma}{\bar{q}_N \cdot \sqrt{n}} \sqrt{1 + r^2 \left(\frac{n}{N} \frac{\sigma_N^a}{\sigma^a} - 1 \right)} \\ &= \frac{100 \cdot 0.55}{1.92\sqrt{15}} \sqrt{1 - 0.98^2 \left(\frac{15}{68} \frac{0.61^2}{0.82^2} - 1 \right)} = 3.0 \%\end{aligned}$$

тобто менше від вихідної приблизно на 7.3%.

4. Для розрахунку за методом коефіцієнтів спочатку треба розрахувати коефіцієнт кореляції між значеннями стоку досліджуваного ряду та ряду-аналогу за період спільних спостережень. Як показано вище (аналітичний метод) цей коефіцієнт для періоду з 1946р. по 1960р. між значеннями річного стоку р.Південний Буг – с.Олександрівка та р.Південний Буг – м.Первомайськ становить 0.98, тобто $r \geq 0.7$. Наступним етапом є побудування хронологічних графіків коливань річного стоку (рис.2.3). Для того щоб хронологічні графіки простіше було порівнювати між собою їх будують у модульних коефіцієнтах k_i . Як видно із рис.2.3, коливання річного стоку за період з 1946 по 1960 рр. досліджуваного ряду (р.Південний Буг - с.Олександрівка) та ряду-аналога (р.Південний Буг – м.Первомайськ) повністю синхронні.

У такому випадку, відповідно до (2.17) можна записати

$$\frac{\bar{q}_N^a}{\bar{q}_n^a} = \frac{\bar{q}_N}{\bar{q}_n};$$

Позначимо співвідношення $\frac{\bar{q}_N^a}{\bar{q}_n^a}$ через K_N .

Тоді $K_N = 1.14$, а \bar{q}_N дорівнює

$$\bar{q}_N = K_N \bar{q}_n = 1.14 \cdot 1.76 = 2.00 \text{ л/скм}^2$$

Результати приведення статистичних параметрів річного стоку р.Південний Буг – м.Первомайськ різними методами представлені в табл.2.5.

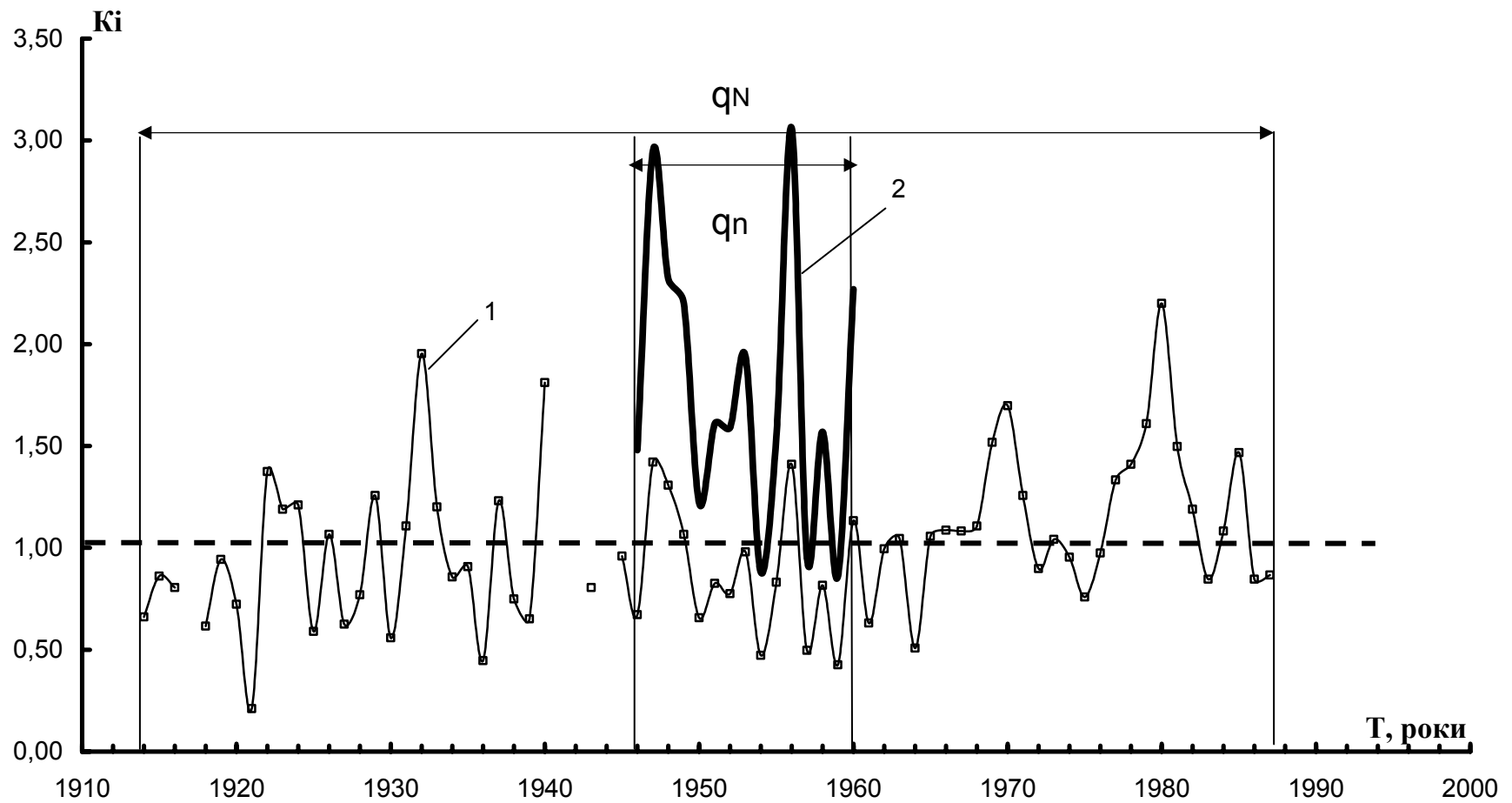


Рисунок 2.3 – Хронологічний графік коливань річного стоку р.Південний Буг – с.Олександрівка(1) та р.Південний Буг – м.Первомайськ(2)

Таблиця 2.5 – Порівнювальні дані статистичних параметрів річного стоку р.Південний Буг – м.Первомайськ, обчислені різними методами

Метод приведення	\bar{q}_n , л/скм ²	$\sigma_{\bar{q}_n}$, %	C_v	C_s / C_v
Графічний	1.89	5.00	0.38	2.00
Графо-аналітичний	1.84	5.00	0.37	1.60
Аналітичний	1.92	3.00	0.38	2.00
Метод коефіцієнтів	2.00	5.00	0.38	2.00

Як видно з табл.2.5, розрахункові значення статистичних параметрів річного стоку близькі між собою. Але параметри $\bar{q}_n, C_v, C_s / C_v$, приведені до багаторічного періоду графоаналітичним способом, дещо знижені, що обумовлено точністю проведення згладженої емпіричної кривої.

Перевагу можна віддати графічному способу, як найпростішому, за умови достатнього обґрунтування графічної залежності.

3 ВИЗНАЧЕННЯ СТАТИСТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ РІЧНОГО СТОКУ ЗА ВІДСУТНОСТІ ГІДРОМЕТРИЧНИХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ

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

- за допомогою прямолінійної інтерполяції з використанням опорних пунктів;
- по картах ізоліній 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:

$$\bar{Y} = \bar{X} - \bar{E}, \quad (3.1)$$

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 [3] рекомендована карта ізоліній середньобагаторічних модулів річного стоку \bar{q}_n л/скм² [3, дод.1, лист I].

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:

$$\bar{q}_n = \frac{\bar{q}_1 f_1 + \bar{q}_2 f_2 + \dots + \bar{q}_n f_n}{f_1 + f_2 + \dots + f_n}, \quad (3.2)$$

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 планіметриванням або за допомогою палетки.

Для визначення норми стоку малих річок до значень стоку, знятих з карти, вводиться відповідна поправка, яка враховує неповноту дренажу підземних вод. Поправки для географічних районів представлені таблицею в залежності від площі водозбору [3, табл.8].

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} . Координати таких залежностей для різних гірських районів надані в таблиці [3, дод.2, табл.6].

Для гірських річок Карпат, Кавказу, Середньої Азії побудовані карти ізоліній стоку, приведені до однієї висоти [дод.1, лист 1a-1в] $H_{cp} = 2000$ м.

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

а) Д.Л.Соколовського – М.Т.Шевельова

$$C_v = 0.78 - 0.29 \lg \bar{q} - 0.063 \lg(F + 1), \quad (3.3)$$

б) К.П.Воскресенського

$$C_v = \frac{A}{\bar{q}^{0.4} (F + 1)^{0.10}}, \quad (3.4)$$

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

В нормативному документі коефіцієнти варіації представлені картою ізоліній [3, дод.І, лист 2, 2а-2в]. Принцип знаходження C_v для розрахункового створу такий же, як і для визначення \bar{q}_n . Співвідношення C_s / C_v визначається за картою [3, дод.І, лист 4] для гідрологічно однорідних районів.

Приклад розрахунку.

Визначити статистичні параметри річного стоку ($\bar{q}_n, C_v, C_s / C_v$) р.Південний Буг – с.Олександрівка та р.Південний Буг – м.Певомайськ за картами ізоліній стоку [3].

Дано: карта середньобогаторічного річного стоку [3, дод.І, лист І] масштабу 1:1000000, ізолінії стоку приведені в модулях, q л/скм² (рис.3.1), та карта коефіцієнту варіації середньобогаторічного річного стоку річок СРСР [3, дод.І, лист ІІ] масштабу 1:1000000 (рис.3.2). Площа водозбору р.Південний Буг – с.Олександрівка складає $F=46200$ км², р.Південний Буг – м.Первомайськ $F=44000$ км².

Басейн р.Південний Буг – с.Олександрівка та р.Південний Буг м.Первомайськ перетинають чотири ізолінії стоку. У цьому випадку річний стік визначається як середньозважене значення за рівнянням (3.2).

Як видно із рис.3.1 ізолінія 0.5 л/скм² перетинає водозбір, утворюючи контур f_1 , ізолінії 1.0, 2.0 та 4.0 утворюють контури f_2, f_3, f_4 . Площі між ізолініями визначаються за допомогою палетки: $f_1 = 4.0$, $f_2 = 16.0$, $f_3 = 17.5$, $f_4 = 1.0$ поділок палетки. Для розрахунку стоку за формулою (3.2) складена табл.3.1.

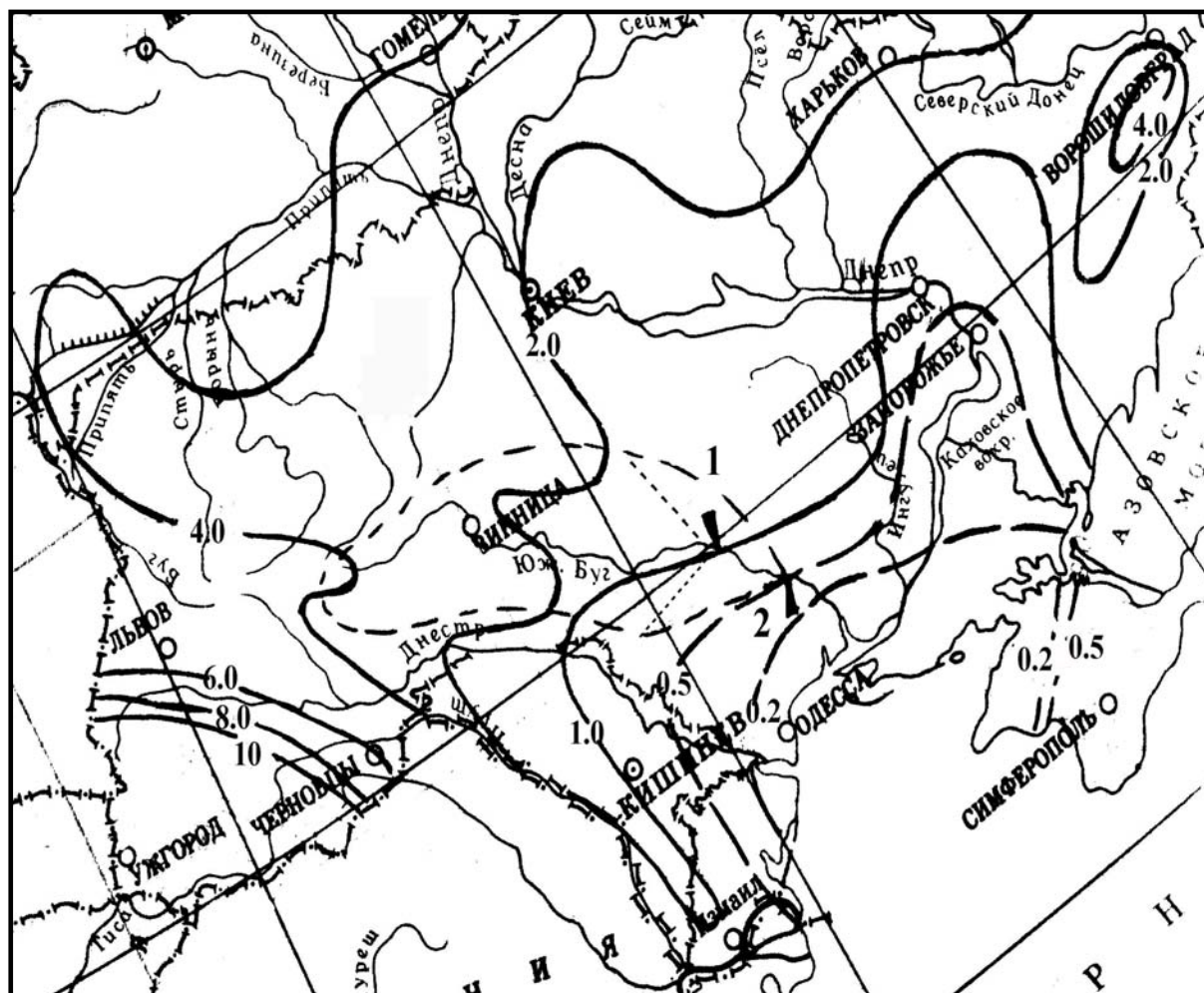


Рисунок 3.1 – Середньобагаторічний річний стік річок [4]:
 1 - р.Південний Буг – м.Первомайськ ; 2 – р.Південний Буг – с.Олександрівка

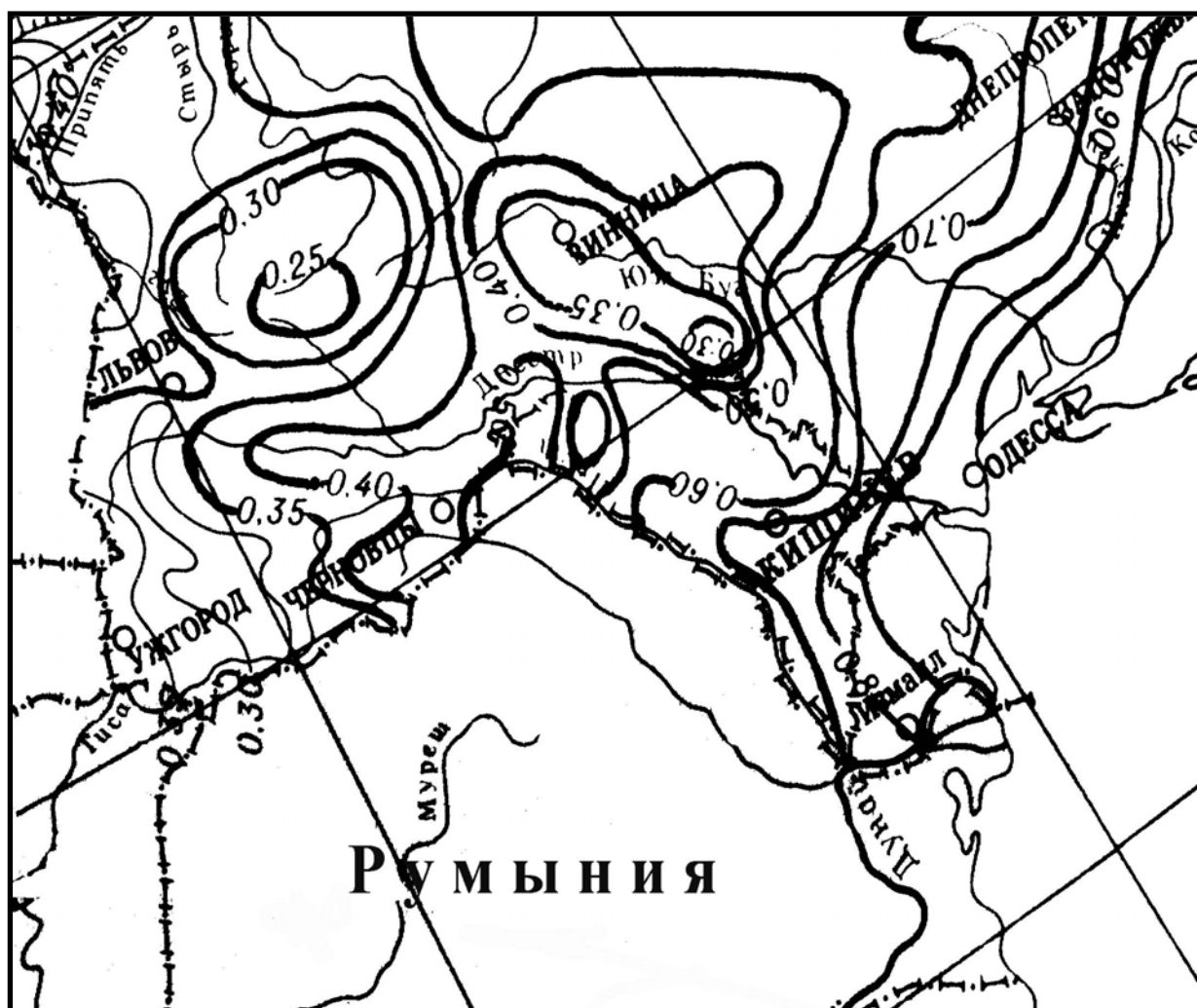


Рисунок 3.2 – Коефіцієнт варіації середньобаторічного річного стоку річок [4]:

Таблиця 3.1 – Розрахунок норми стоку за допомогою карти ізоліній р.Південний Буг-с.Олександрівка. F=46200 км²

Значення ізоліній модуля стоку, л/скм ²	Середнє значення модуля q _i , л/скм ²	Площа водозбору між ізолініями, f ₁	q _i f _i
0.50-1.00	0.75	7.00	5.25
1.00-2.00	1.50	14.0	21.0
2.00-4.00	3.00	18.0	54.0
4.00	4.00	1.00	4.00

Використовуючи дані табл.3.1 отримаємо норму стоку для р.Південний Буг – с.Олександрівка

$$\bar{q}_n = \frac{5.25 + 21.0 + 54.0 + 4.0}{40.0} = 2.11 \text{ л/скм}^2.$$

Аналогічно, але на підставі табл.3.2 визначається норма стоку для р.Південний Буг – м.Первомайськ, F=44000 км².

Таблиця 3.2 – Розрахунок норми стоку за допомогою карти ізоліній р.Південний Буг-с.Первомайськ, F=44000 км²

Значення ізоліній модуля стоку, л/скм ²	Середнє значення модуля q _i , л/скм ²	Площа водозбору між ізолініями, f ₁	q _i f _i
0.50-1.00	0.75	3.50	2.63
1.00-2.00	1.50	12.0	18.0
2.00-4.00	3.00	18.0	54.0
4.00	4.00	1.00	4.00

$$\bar{q}_n = \frac{2.63 + 18.0 + 54.0 + 4.0}{34.5} = 2.27 \text{ л/скм}^2$$

За аналогічною схемою, використовуючи рис.3.2, визначається коефіцієнт варіації C_v. Оскільки досліджуваний водозбір перетинає 9 ізоліній, то значення C_v розраховується як середньозважене, для чого складено табл.3.3, 3.4.

$$C_v = \frac{0.45 + 2.93 + 4.50 + 1.00 + 3.15 + 2.75 + 1.30 + 0.725}{40.0} = 0.42$$

Розрахунки C_v для р.Південний Буг – м.Первомайськ

Таблиця 3.3 – Розрахунок коефіцієнта варіації за допомогою карти ізоліній (р.Південний Буг – с.Олександрівка)

Значення ізоліній коефіцієнта варіації C_v	Середнє значення C_v	Площа водозбору між ізолініями, f_1	$C_v f_1$
0.30-0.30	0.300	1.50	0.45
0.30-0.35	0.325	9.00	2.93
0.35-0.40	0.375	12.0	4.50
0.40-0.40	0.400	2.50	1.00
0.40-0.50	0.450	7.00	3.15
0.50-0.60	0.550	5.00	2.75
0.60-0.70	0.650	2.00	1.30
0.70-0.75	0.725	1.00	0.725

Таблиця 3.4 – Розрахунок коефіцієнта варіації за допомогою карти ізоліній (р.Південний Буг – м.Первомайськ)

Значення ізоліній коефіцієнта варіації C_v	Середнє значення C_v	Площа водозбору між ізолініями, f_1	$C_v f_1$
0.30-0.30	0.300	1.00	0.30
0.30-0.35	0.325	8.00	2.60
0.35-0.40	0.375	12.0	4.50
0.40-0.40	0.400	2.50	1.00
0.40-0.50	0.450	6.50	2.92
0.50-0.60	0.550	4.00	2.20
0.60-0.70	0.650	0.50	0.32

$$C_v = \frac{0.30 + 2.60 + 4.50 + 1.00 + 2.92 + 2.20 + 0.32}{34.5} = 0.40$$

Значення співвідношення C_s / C_v також визначається за картою СНіП [3, дод.І, лист 4]. Для р. Південний Буг – с. Олександрівка та р. Південний Буг – м. Первомайськ це співвідношення дорівнює 2.0.

Точність розрахунку норми стоку та коефіцієнту варіації за картою СНіП можна визначити як відносне середнє відхилення розрахункових значень від фактичних за формулою:

$$\Delta = \frac{|q_p - q_\phi|}{q_\phi} 100\%. \quad (3.5)$$

Таким чином, для р.Південний Буг – с.Олександрівка точність розрахунку норми стоку за допомогою карти дорівнює 6.9%, а коефіцієнту варіації 10.5%; для р.Південний Буг – м.Первомайськ 20.1% і 5.3%, відповідно.

ПЕРЕЛІК КОНТРОЛЬНИХ ЗАПИТАНЬ ДО ПРАКТИЧНИХ ЗАВДАНЬ

Контрольні запитання до розділу 1

1. Що таке норма річного стоку?
2. Яка припустима похибка розрахунку норми річного стоку?
3. Для чого використовуються методи згладжування або фільтрації рядів річного стоку?
4. Дайте визначення поняття “цикл водності”.
5. Основні властивості різницевої інтегральної кривої.
6. Що таке розрахунковий період?
7. Як визначаються коефіцієнти варіації та асиметрії річного стоку при наявності тривалих спостережень?

Контрольні запитання до розділу 2

1. Коли статистичний ряд стоку вважається коротким?
2. Як підібрати річку-аналог до короткого ряду?
3. Як розрахувати основні параметри річного стоку за графічним методом?
4. Які вимоги пред'являються до коефіцієнта кореляції між короткими та тривалими рядами?
5. Скільки років повинен бути період сумісних спостережень?
6. У чому полягає графоаналітичний метод Г.О.Алексєєва?
7. Як застосовується рівняння лінійної регресії для подовження гідрологічних рядів?
8. Як розраховуються похибки розрахунку норми стоку подовжених рядів?

Контрольні запитання до розділу 3

1. За яким принципом на карту наносяться дані спостережень для побудови карти ізоліній норми річного стоку?
2. Для побудовання карти норми стоку використовуються дані річок усіх розмірів, чи є якісь обмеження?
3. З якою точністю можна розрахувати норму річного стоку за картами СНіП 2.01.14-83?
4. Як визначається норма стоку малих річок за відсутності даних спостережень?
5. Як визначається коефіцієнт варіації та асиметрії за відсутністю даних спостережень?

Література

1. Гопченко Є.Д., Гушля О.В. Гідрологія суші з основами меліорації., - К.УСДО, 1994.
2. Клибашев К.П., Горошков И.Ф. Гидрологические расчеты. – Л.:Гидрометеиздат, 1970.
3. Пособие по определению расчетных гидрологических характеристик. – Л.:Гидрометеиздат, 1984. – 448 с.
4. Рождественский А.В., Чеботарев А.И. Статистические методы в гидрологии.- Л.:Гидрометеиздат, 1974.
5. Соколовский Д.Л. Речной сток.-Л.:Гидрометеиздат,1968.

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ПРАКТИЧНИХ ЗАНЯТЬ З
ДИСЦИПЛІНИ “ГІДРОЛОГІЧНІ РОЗРАХУНКИ”**

Укладач: доц.Овчарук В.А.

Підп. до друку
Умовн. друк. арк.

Формат
Тираж

Папір
Зам. №

Надруковано з готового оригінал-макета

Одеський державний екологічний університет
65016, Одеса, вул.Львівська, 15
