

Б. М. Гончаронок

ХАРАКТЕРИСТИКИ ВНУТРИГОДОВОЙ НЕРАВНОМЕРНОСТИ СТОКА РЕК БЕЛОРУССИИ

Характер внутригодичного распределения стока играет существенную роль в гидрологических и водохозяйственных расчетах.

Показатели равномерности или неравномерности стока могут быть установлены на основе календарного хода (гидрографа) или статистического распределения расходов в году (кривой обеспеченности суточных расходов).

Попытки характеризовать степень равномерности внутригодичного режима стока рек Европейской части СССР как в хронологическом, так и в статистическом распределении были сделаны Д. И. Кочериным еще в 1927 г. [7, 8]. Он рассматривал вопрос о равномерности режима стока в году и по годам (в многолетнем разрезе). При этом математических показателей равномерности режима стока Д. И. Кочерин не предлагал.

Позже появился ряд предложений по характеристике внутригодичной выравненности стока, главным образом на основе статистического распределения расходов в году, т. е. на основе кривой обеспеченности суточных расходов.

Остановимся на некоторых, с нашей точки зрения, наиболее рациональных характеристиках. С. И. Рыбкин [14] предложил для характеристики внутригодичной выравненности стока показатель естественной зарегулированности (μ). Показатель представляет собой величину дефицита стока межени (с учетом восстановления), соответствующего расходу, равному среднемуголетнему. Эта величина равна избытку стока при таком же расходе.

Подобный показатель предложил П. М. Дмитриевский [6] — коэффициент естественной зарегулированности стока (C_r). Коэффициент представляет собой выраженный в процентах от среднемуголетнего стока воображаемый объем водохранилища, необходимый для полного годового регулирования в среднеарифметическом году.

Д. Л. Соколовский [15] для численного выражения выравненности стока в году предложил принять величину площади кривой обеспеченности суточных расходов (или гидрографа) до среднего годового расхода (рис. 1). Выражая кривую обеспеченности в безразмерных величинах, получаем

$$\varphi_3 = \int_0^1 pdk,$$

$$\text{где } k = \frac{Q}{Q_{\text{ср.г}}}; p = \frac{t}{365}.$$

Д. Л. Соколовский [16] для выделенных им 13 типов режимов рек по характеру кривых обеспеченности суточных расходов показал наличие тесной связи между величиной φ_3 и типом режима. Этот показатель также назван коэффициентом естественной зарегулированности стока.

В. Г. Андреяновым [2] для численного выражения неравномерности стока принята величина $\bar{d} = 1 - \varphi_3$, названная им коэффициентом внутригодовой неравномерности. Показатели неравномерности стока С. И. Рыбкина, П. М. Дмитриевского и В. Г. Андреянова весьма близки.

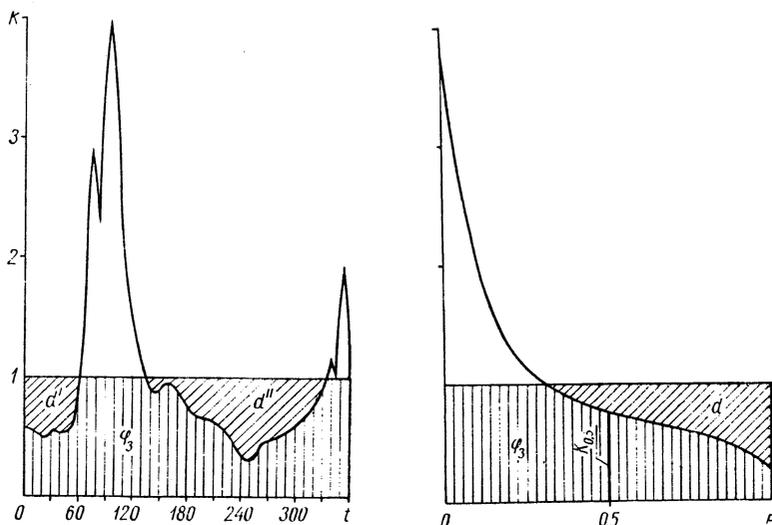


Рис. 1. Характеристики внутригодовой неравномерности стока.

И. М. Лившиц в качестве параметра равномерности внутригодового режима стока предложил величину медианного модульного коэффициента кривой обеспеченности суточных расходов.

Как известно, большинство рек нашей страны относится, по Д. И. Кочерину, к типу «с преобладающим низким режимом» [8]. Для этих рек отношение медианного расхода к среднему ($k_{0,5} = Q_{0,5} : Q_{ср. г}$) всегда меньше единицы (положительная асимметрия) и отражает характер вариации расходов в году. Чем больше неравномерность, тем меньше величина $k_{0,5}$, и наоборот. Так, для реки Свирь с сильно выравненным режимом [3] имеем величину $\bar{k}_{0,5} = 1,03$, а для реки Сарысу (Центральный Казахстан), где сток за восемь месяцев межени составляет всего 0,25% от годового, величина $\bar{k}_{0,5} = 0,03$ [9].

Исследования, проведенные И. М. Лившицем на материалах по рекам Европейской территории Союза, показали наличие тесной связи между величиной $k_{0,5}$ и другими показателями выравненности стока в году, в частности с φ_3 .

Так, при исследовании связи медианного модульного коэффициента $k_{0,5}$ с коэффициентом естественной зарегулированности стока φ_3 для 70 гидрологических пунктов Европейской территории СССР получен коэффициент корреляции $r = 0,95 \pm 0,004$.

При этом уравнение регрессии имеет вид

$$\bar{\varphi}_3 = 0,65\bar{k}_{0,5} + 0,24. \quad (1)$$

Соответственно значение коэффициента неравномерности

$$\bar{d} = 1 - \bar{\varphi}_3 = 0,76 - 0,65\bar{k}_{0,5}, \quad (2)$$

где $\bar{k}_{0,5}$ — медиана так называемой средней кривой обеспеченности суточных расходов (кривой среднегодовых характеристик обеспеченности по Д. И. Кочерину).

И. М. Лившицем проведена проверка формулы (1) на материалах по рекам Словакии, Грузии, Средней Азии, Сибири и получены положительные результаты.

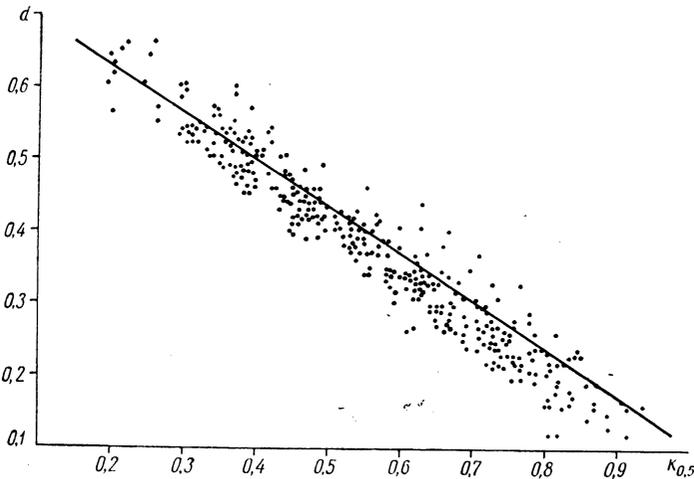


Рис. 2. Связь коэффициентов внутригодовой неравномерности стока d с модульными коэффициентами $k_{0,5}$ для отдельных лет.

Рассмотренные показатели внутригодовой выравненности стока являются только характеристиками осредненного многолетнего режима. Для водохозяйственных расчетов представляет интерес изменчивость ежегодных характеристик внутригодовой выравненности стока.

Исследование этого вопроса нами проведено на материалах по рекам Белоруссии и Верхнего Поднепровья [12].

Колебания внутригодовой выравненности стока. В качестве характеристики выравненности стока отдельных лет нами также принят медианный модульный коэффициент, т. е. отношение медианного расхода ($Q_{0,5}$) каждого реального года к среднему за этот же год

$$k_{0,5} = \frac{Q_{0,5}}{Q_{\text{ср.г}}}.$$

Прежде чем перейти к установлению закономерностей изменения $k_{0,5}$, мы исследовали связь ежегодных значений $k_{0,5}$ и d . На рис. 2 показана связь между сопряженными значениями их для пунктов Не-

ман—Смалининкай, Вилия—Залесье, Зап. Двина—Витебск, Лучеса—Лускинополь, Дисна—Козьяны, Днепр—Могилев, Ухлясть—Радьково, Свислочь—Теребуты, Сушанка—Суша, Беседь—Светиловичи, Уза—Прибор, Оресса—Верхутино, Птичь—Лучицы, Припять—Мозырь.

На основании рис. 2 можно заключить, что формула (2) остается верной и для годовых значений $k_{0,5}$ и d . Коэффициенты корреляции для сопряженных ежегодных значений $k_{0,5}$ и d являются высокими. Так, для пунктов Припять—Мозырь, Птичь—Лучицы, Вилия—Залесье значения r соответственно равны 0,93; 0,98 и 0,92.

Следует отметить следующее:

а) значения модульных коэффициентов, соответствующих средней кривой обеспеченности суточных расходов, получаются по отношению

$$\bar{k}_{0,5} = \frac{\sum_1^n Q_{0,5}}{n} : \frac{\sum_1^n Q_{\text{ср.г}}}{n} = \frac{\sum_1^n Q_{0,5}}{\sum_1^n Q_{\text{ср.г}}} \quad (3)$$

При использовании ежегодных медианных модульных коэффициентов получаем

$$\bar{k}'_{0,5} = \frac{\sum_1^n \frac{Q_{0,5}}{Q_{\text{ср.г}}}}{n} \quad (4)$$

Исследования, произведенные для 20 гидрологических пунктов, показали практически совпадающие результаты по формулам (3) и (4). Это видно из рис. 3. В связи с этим в дальнейшем не делаем различий между $\bar{k}_{0,5}$ и $\bar{k}'_{0,5}$;

б) уравнение (2) позволяет перейти от коэффициента вариации ежегодных значений $k_{0,5}$ к коэффициенту вариации ежегодных значений d .

Действительно, если x и y связаны линейной зависимостью $y = a + bx$, то среднее значение y и среднеквадратическое отклонение σ_y можно выразить так:

$$\bar{y} = \frac{\sum_1^n y}{n} = \frac{\sum_1^n (a + bx)}{n} = a + b\bar{x}; \quad (5)$$

$$\sigma_y = \sqrt{\frac{\sum_1^n [(a + bx) - (a + b\bar{x})]^2}{n - 1}} = b \sqrt{\frac{\sum_1^n (x - \bar{x})^2}{n - 1}} = b\sigma_x. \quad (6)$$

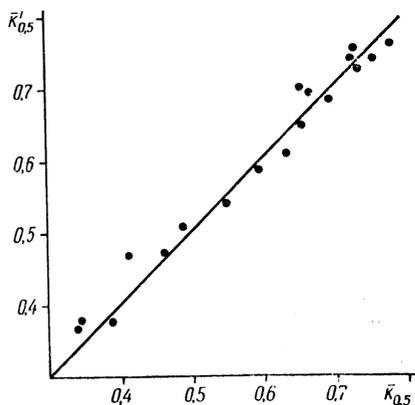


Рис. 3. Связь модульных коэффициентов $\bar{k}'_{0,5}$ с $\bar{k}_{0,5}$.

Коэффициент вариации C_{vy} соответственно

$$C_{vy} = \frac{\sigma_y}{\bar{y}} = \frac{b\sigma_x}{a + b\bar{x}} = \frac{\sigma_x}{\frac{a}{b} + \bar{x}}. \quad (7)$$

Подставив в уравнение (2) вместо x и y величины $k_{0,5}$ и d и вместо a и b соответствующие им коэффициенты, получаем выражения среднего, среднеквадратического отклонения и коэффициента вариации \bar{d} через параметры распределения $k_{0,5}$:

$$\bar{d} = 0,76 - 0,65\bar{k}_{0,5}; \quad (5')$$

$$\sigma_d = 0,65\sigma_{k_{0,5}}; \quad (6')$$

$$C_{vd} = \frac{\sigma_d}{\bar{d}} = \frac{0,65\sigma_{k_{0,5}}}{0,76 - 0,65\bar{k}_{0,5}} = \frac{\sigma_{k_{0,5}}}{1,17 - \bar{k}_{0,5}} = \frac{C_{vk_{0,5}}\bar{k}_{0,5}}{1,17 - \bar{k}_{0,5}}. \quad (7')$$

Таблица 1

Характеристики внутригодовой неравномерности стока рек

Река	Пункт	Число лет наблю- дений	Площадь водо- сбора, км ²	Характеристики							
				по фактическим данным				по формулам			
				$\bar{k}_{0,5}$	$C_{vk_{0,5}}$	\bar{d}	C_{vd}	\bar{d}	C_{vd}	$\frac{\bar{d}_{\text{выч}}}{\bar{d}_{\text{факт}}}$	$\frac{C_{vd \text{ выч}}}{C_{vd \text{ факт}}}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Зап. Двина	Витебск	81	27300	0,49	0,26	0,44	0,18	0,44	0,18	1,00	1,00
Лучеса	Лускинополъ	23	3280	0,41	0,20	0,49	0,16	0,49	0,15	1,00	0,94
Неман	Гродно	79	33600	0,73	0,12	0,26	0,25	0,29	0,20	1,11	0,80
Виляя	Залесье	27	6840	0,70	0,17	0,29	0,22	0,30	0,25	1,03	1,13
Днепр	Могилев	24	20800	0,46	0,24	0,45	0,16	0,46	0,16	1,02	1,00
Ухлясть	Радьково	29	258	0,55	0,25	0,40	0,25	0,40	0,23	1,00	0,92
Свислочь	Теребуты	28	4050	0,66	0,18	0,31	0,25	0,33	0,23	1,06	0,92
Сушанка	Суша	17	153	0,53	0,23	0,40	0,20	0,42	0,19	1,05	0,95
Уза	Прибор	26	680	0,38	0,32	0,51	0,15	0,51	0,15	1,00	1,00
Птичь	Лучицы	54	8770	0,60	0,25	0,36	0,25	0,37	0,26	1,03	1,04
Припять	Мозырь	74	97200	0,66	0,22	0,32	0,28	0,33	0,28	1,03	1,00
Оресса	Верхутино	27	520	0,43	0,21	0,46	0,13	0,48	0,12	1,04	0,92
Дубиса	Чякишке	28	1930	0,49	0,24	0,45	0,16	0,44	0,17	1,98	1,06
Швянтойи	Укмярге	32	5345	0,67	0,21	0,32	0,19	0,32	0,28	1,0	1,47
Неман	Смалининкай	137	81200	0,76	0,13	0,24	0,25	0,36	0,24	1,08	0,96
Виляя	Вильнюс	333	15200	0,76	0,13	0,24	0,21	0,26	0,24	1,08	1,14
Виляя	Йонова	35	24500	0,74	0,14	0,26	0,24	0,28	0,22	1,08	0,92
Шешупе	Скиргайляй	19	1880	0,34	0,25	0,53	0,11	0,54	0,10	1,02	0,91

В табл. 1 приведены результаты вычисления \bar{d} по формуле (2) и C_{vd} по формуле (7'). Полученные данные показывают, что нормы внутригодовой неравномерности \bar{d} и коэффициенты вариации C_{vd} можно вычислять по соответствующим параметрам медианных модульных коэффициентов ($\bar{k}_{0,5}$ и $C_{vk_{0,5}}$).

Нетрудно убедиться, что коэффициенты асимметрии для $k_{0,5}$ и d при принятии линейной связи между ними по абсолютной величине равны.

Действительно, на основании формул (5) и (6) находим

$$C_{sy} = \frac{\sum_1^n (y - \bar{y})^3}{n\sigma_y^3} = \frac{\sum_1^n [(a + bx) - (a + b\bar{x})]^3}{nb^3\sigma_x^3} = C_{sx}. \quad (8)$$

Подставляя вместо x и y соответствующие им в уравнении (5') $k_{0,5}$ и d и учитывая знак коэффициента при $k_{0,5}$, получаем уравнение

$$C_{sd} = -C_{sk_{0,5}}. \quad (8')$$

В связи с тем что совокупность фактических наблюдений не позволяет определить C_s с надлежащей точностью, нами проведены исследования для косвенного их определения. При этом брались ряды $k_{0,5}$. Для исследований C_s использовался как метод графического анализа (на клетчатках вероятностей), так и графо-аналитический метод [1], основанный на связи между коэффициентами скошенности и асимметрии. В результате нами получены для 9 пунктов из 20 отношения C_s/C_v , весьма близкие к 2, а для остальных пунктов результаты разноречивы. Данный вопрос требует дополнительных исследований. Для приближенного определения C_s можно рекомендовать соотношение $C_s = 2C_v$, или подбор по аналогии. Последнее подкрепляется тем, что, например, для трех пунктов Немана и двух пунктов Вилии отношение C_s к C_v одинаковое ($C_s/C_v = 2$).

Расчеты при отсутствии непосредственных наблюдений. Для построения кривых обеспеченности $k_{0,5}$ необходимо разработать косвенные методы определения норм и коэффициентов вариации ($\bar{k}_{0,5}$ и $C_{vk_{0,5}}$). Что же касается коэффициента асимметрии, то о методах приближенного установления его уже сказано выше.

Имея параметры кривой распределения $k_{0,5}$, можно перейти и к определению параметров распределения d по формулам (2) и (7').

Для определения нормы $\bar{k}_{0,5}$ рек Полесья И. М. Лившицем [10] получено уравнение

$$\bar{k}_{0,5} = aF^{0,08}, \quad (9)$$

где F — площадь водосбора, км²; a — параметр, отражающий физико-географические факторы внутригодичного распределения стока.

Подобное исследование произведено В. Г. Андреяновым [3] для косвенного определения \bar{d} . В качестве основных определяющих факторов им также приняты регулирующее влияние площади водосбора и зональные природные условия. В предложенной формуле [3] учтено и регулирующее влияние озерности. Общий вид формулы

$$\bar{d} = \left(a_d - c_d \lg \frac{F + 1}{2000} \right) (1 - \omega_{оз}^{2/3})^3, \quad (10)$$

где a_d — зональный параметр, определяемый по карте изолиний или по аналогии с изученными пунктами. При $F = 2000$ км² и $\omega_{оз} = 0$ параметр a_d равен коэффициенту неравномерности \bar{d} ; c_d — параметр, изменяющийся для Европейской территории Союза от 0,05 до 0,10; $\omega_{оз}$ — озерность водосбора.

Ю. П. Бурнейкис и Б. В. Гайлюшис [5] исследовали формулу В. Г. Андреянова для определения коэффициента внутригодовой неравномерности стока и внесли в нее некоторые коррективы для рек Литовской ССР. В частности, ими введен коэффициент, учитывающий регулирующее влияние песчаных грунтов.

Для крупных рек Белоруссии В. Н. Плужниковым и Л. В. Добролюбовой [11] проведены исследования по уточнению параметров формулы (10).

Нами исследована зависимость нормы медианного модульного коэффициента от зональных и азональных факторов. В результате получена формула

$$\bar{k}_{0,5} = a + 0,08 \lg(F + 1), \quad (11)$$

где a — географический параметр, определяемый по карте изолиний и представляющий собой минимальное значение $k_{0,5}$ при $F \rightarrow 0$.

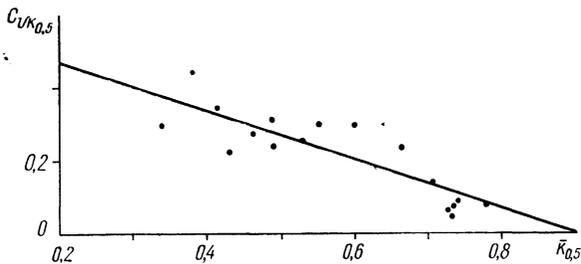


Рис. 4. Связь между коэффициентом вариации $C_{vk_{0,5}}$ и $\bar{k}_{0,5}$.

При установлении приведенной зависимости использованы данные по 176 водопостам рек Белоруссии и Верхнего Поднепровья.

Переход к d по формуле (2) дает

$$\bar{d} = 1,17 - a - 0,08 \lg(F + 1). \quad (12)$$

Что же касается изменчивости медианного модульного коэффициента, то математическая зависимость между $C_{vk_{0,5}}$ и предполагаемыми его факторами нами не выведена. Намечается явная связь между $C_{vk_{0,5}}$ и $\bar{k}_{0,5}$ (рис. 4). Это вполне закономерно, так как величина $\bar{k}_{0,5}$, так же как и коэффициент вариации, зависит от бассейна и зональных факторов.

Можно предположить, что факторы, влияющие на внутригодовую неравномерность стока, являются определяющими и для характеристик ее изменчивости ($C_{vk_{0,5}}$, C_{vd}) в многолетнем разрезе. Коэффициент корреляции между $C_{vk_{0,5}}$ и $\bar{k}_{0,5}$ получился равным 0,79. Это указывает на реальность связи, так как согласно критерию В. В. Романовского [13],

$$|r| \sqrt{n-1} = 0,79 \sqrt{20} = 3,5 > 3,0. \quad (13)$$

Для приближенного определения $C_{vk_{0,5}}$ можно рекомендовать график $C_{vk_{0,5}} = f(\bar{k}_{0,5})$ (см. рис. 4).

В случае необходимости по полученным косвенным путем $\bar{k}_{0,5}$ и $C_{\sigma k_{0,5}}$ можно вычислить \bar{d} и $C_{\sigma d}$.

Следует отметить, что В. Г. Андреевым [3] был исследован вопрос о косвенном определении $C_{\sigma d}$ и сделаны некоторые выводы о соотношениях коэффициентов вариации показателя внутригодовой неравномерности с коэффициентами вариации годового стока для различных физико-географических районов. Подобное исследование и уточнение характеристик проведено и Ю. П. Бурнейкисом и Б. В. Гайлюшисом [4] для рек Литовской ССР.

Выводы

1. Из существующих показателей внутригодовой неравномерности распределения стока наиболее рациональным является коэффициент внутригодовой неравномерности \bar{d} или коэффициент естественной зарегулированности φ_3 . Однако определение ежегодных значений d связано с громоздкими вычислительными операциями.

2. Для рек с преобладающим низким режимом внутригодовая неравномерность может быть оценена отношением медианного расхода к среднему годовому $k_{0,5}$. Исследования показывают, что норма и ежегодные значения этой величины весьма тесно связаны с d . Связь выражается линейной зависимостью. Линейной зависимостью связаны также стандарты $\sigma_{k_{0,5}}$, σ_d и коэффициенты асимметрии. Это обстоятельство позволяет перейти от кривой обеспеченности $k_{0,5}$ к соответствующей кривой d .

3. Для неисследованных рек Белоруссии даны рекомендации для установления параметров распределения вероятностей $k_{0,5}$, а следовательно, и d .

Литература

1. Алексеев Г. А. Графо-аналитические способы определения и приведения к длительному периоду наблюдений параметров кривых распределения. Тр. ГГИ, вып. 73, 1960.
2. Андреев В. Г. Методика расчета внутригодового распределения стока с учетом водности года. Тр. ГГИ, вып. 38 (92), 1953.
3. Андреев В. Г. Внутригодовое распределение речного стока. Л., 1960.
4. Бурнейкис Ю. П., Гайлюшис Б. В. Исследования зависимостей коэффициента внутригодовой неравномерности стока рек Литовской ССР от величины площади и озерности водосбора. Тр. АН Лит. ССР, сер. Б 4(35), 1963.
5. Гайлюшис Б. В., Бурнейкис Ю. П. Исследования распределения по территории коэффициента внутригодовой неравномерности стока рек Литовской ССР. Тр. АН Лит. ССР, сер. Б 4(39), 1964.
6. Дмитриевский П. М. Качественный показатель для характеристики рек как объектов энергетического использования. «Гидротехническое строительство», 1960, № 9.
7. Кочерин Д. И. Средний многолетний, годовой и месячный сток рек Европейской части Союза. Тр. МИИТ, вып. VI, 1927.
8. Кочерин Д. И. Обеспеченность расходов в году и ее характеристика по реальным данным для рек СССР. Тр. МИИТ, вып. XI, 1929.
9. Кузин П. С. Режим рек южных районов Западной Сибири, Северного и Центрального Казахстана. Л., 1953.
10. Лившиц И. М. Обеспеченность суточных расходов рек Полесья. Тр. ин-та мелиорации, водного и болотного х-ва АН БССР, т. VI, 1955.
11. Плужников В. И., Добролюбова Л. В. К характеристике внутригодовой неравномерности стока рек БССР. Сб. «Использование и охрана водных ресурсов Белоруссии», ч. I. Минск, 1966.
12. Ресурсы поверхностных вод СССР, т. 5. Белоруссия и Верхнее Поднепровье. Л., 1966.
13. Романовский В. В. Элементы теории корреляции. Ташкент, 1928.
14. Рыбкин С. И. Новые универсальные характеристики речного стока и применение их к решению водохозяйственных задач. «Метеорология и гидрология», 1935, № 4.
15. Соколовский Д. Л. Гидрологические и водохозяйственные расчеты при проектировании малых ГЭС. Тр. НИУ ГУГМС, сер. IV, вып. 36, 1946.
16. Соколовский Д. Л. Речной сток. Л., 1959.