

## КОЛЕБАНИЕ И ИЗМЕНЧИВОСТЬ ГОДОВОГО СТОКА РЕК ЭСТОНСКОЙ ССР

В. А. ИОНАТ,

кандидат технических наук

При производстве гидрологических расчетов обычно требуется определение размера годового стока, отвечающего заданной обеспеченности. Так, например, при проектировании водоснабжения за расчетную обеспеченность, как правило, принимают 90—99%, для рыбного хозяйства — 85—90%, для энергетики — 50—75% и т. д.

Необходимость получения расчетных характеристик заданной обеспеченности требует детального изучения речного стока в течение длительного периода и установления вероятных размеров амплитуды его колебания. Решение вопроса о размерах годового стока заданной обеспеченности может быть произведено при наличии достаточно продолжительных измерений (20—40 лет) путем построения эмпирических кривых обеспеченности или, в случае отсутствия продолжительных наблюдений, путем построения кривых обеспеченности методами вариационной статистики, дающих меньшую точность.

Как указывает проф. А. В. Огиевский<sup>(2)</sup>, «конечной целью изучения режима стока является установление вероятных колебаний его для нужд водохозяйственных расчетов и проектирования сооружений. Намечаемое использование водных потоков всегда основывается на предположениях о том возможном будущем режиме этих потоков, которого следует ожидать после постройки тех или иных сооружений».

В настоящей работе мы рассматриваем колебания и изменчивость годового стока рек Эстонской ССР.

### 1. Исходные материалы и их оценка

Исследование изменчивости годового стока рек Эстонской ССР проводится на основании материалов гидрометрических измерений, осуществляемых в сети Управления гидрометеорологической службы ЭССР и дающих наиболее надежные данные для гидрологических расчетов. Для вычисления коэффициентов вариации используются ряды наблюдений с продолжительностью, превышающей 20 лет. При среднем значении  $C_v = 0,35$  средняя квадратичная ошибка коэффициента вариации при  $n = 20$  лет с учетом асимметричности рядов равна по С. Н. Крицкому и М. Ф. Менкелю<sup>(1)</sup>

$$\sigma_{C_v} = C_v \sqrt{\frac{1 + 3C_v^2}{2(n-1)}} = 0,35 \sqrt{\frac{1 + 3 \cdot 0,35^2}{2 \cdot 19}} = 0,19 C_v$$

Относительная ошибка составит, таким образом, около 19%.



Как указывает Д. Л. Соколовский <sup>(3)</sup>, «действительные средние ошибки коэффициента изменчивости близки к теоретическим и даже несколько ниже, что объясняется близостью распределения коэффициентов изменчивости к нормальному, особенно при невысоких значениях последних». Так, Д. Л. Соколовским установлено, что для рек Волхова, Днепра и Западной Двины ошибка при вычислении  $C_v$  за десятилетний период составила всего 12—19% при теоретическом ее значении 26—27%. Данное обстоятельство дает нам основание считать, что при вычислении коэффициентов вариации для рек Эстонской ССР, имеющих 20-летние ряды измерений, ошибка определения  $C_v$  составит не более 12—15%, т. е. вычисления будут производиться с достаточной для практики точностью. Наконец, принимая во внимание еще и то, что некоторые ряды имеют продолжительность большую, чем 20 лет, можно считать, что в среднем ошибка при вычислении  $C_v$  для всех рассматриваемых рек составит около 10%.

Наиболее полно в гидрометрическом отношении освещены следующие реки Эстонской ССР (табл. 1).

Таблица 1

Река	Створ	Площадь водосбора км <sup>2</sup>	Число полных лет наблюдений
Нарва	Васкнарва	47 800	38
Пуртсе	Люганусе	792	27
Васалемма	Урба	383	22
Кейла	Кейла	665	26
Лейва	Паюба	84,3	23
В. Эмайыги	Тыллисте	1070	28
С. Эмайыги	Тарту	7850	34
Выханду	Химмисте	853	26
Педья	Тырве	792	20
Пярну	Ореюла	5180	29

Кроме того, имеются наблюдения на реках Ягала — 14 лет, Пирита — 16 и Вихтерпалу — 19 лет. Таким образом, непосредственное вычисление  $C_v$  возможно только для ограниченного числа рек.

## 2. Многолетний ход годового стока

Имеющиеся на 1 января 1953 года материалы гидрометрических измерений позволяют в первом приближении составить картину хода и колебаний годового стока, так как включают в свой состав как многоводные так и маловодные годы. Ход стока за последние 25—30 лет, в течение которых велись более или менее систематические гидрологические наблюдения, хорошо выражен на графиках изменения средних модулей стока по годам (рис. 1, 2, 3, 4). К сожалению, ряды наблюдений имеют разрывы, обусловленные отсутствием данных за период военных действий и падающие в основном на 1943—1945 годы.

При рассмотрении многолетнего хода стока обращает на себя внимание чрезвычайная маловодность периода с 1936 по 1941 год. Начавшееся с 1935 года понижение водности достигло своего предела в 1939—1940 годах. Так, в 1939 году среднегодовое значение стока составило только 0,46 нормы для реки Кейла, 0,44 для реки Васалемма и 0,39 для реки Пярну. В 1940 году особая маловодность отмечена на реках Педья и Нарва (сток реки Педья составил 0,64, а реки Нарва — 0,48 от нормы).



В рассматриваемый период только 1936 год, да и то не по всем рекам, дал значения стока, приближающиеся к норме. На р. Пярну не было ни одного года, равного по водности среднему или близко приближавшемуся к нему. Средний сток за 1936—1941 годы на реках бассейна Финского

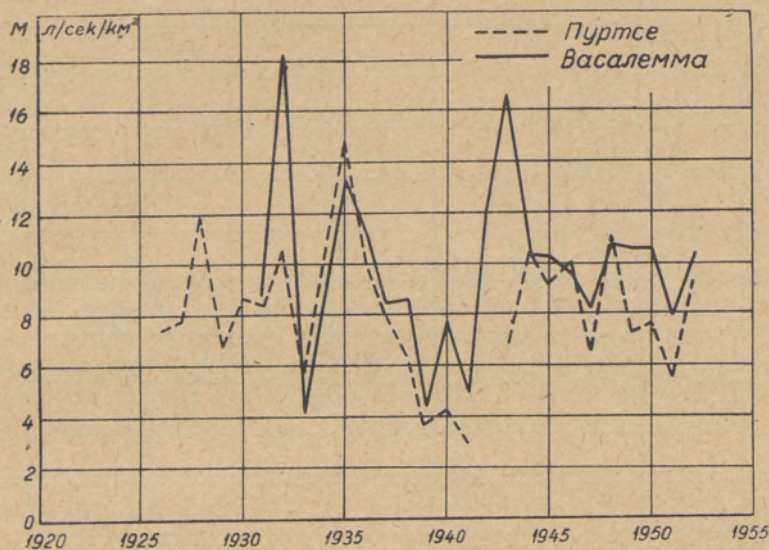


Рис. 1.

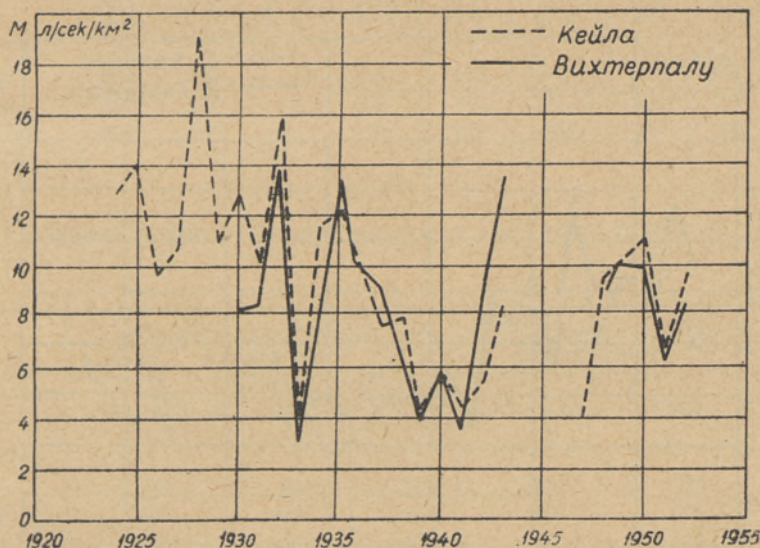


Рис. 2.

залива составил, соответственно, для реки Пуртсе 0,72, для р. Васалемма 0,77, р. Кейла 0,70 от среднего многолетнего стока, а дефицит стока за этот период составил в среднем 1,62 годовых объема стока.

Для реки Пярну средняя величина годового стока за эти годы была еще меньше и равнялась лишь 0,64 от средней многолетней величины, а дефицит стока за период составил, соответственно, 2,16 годовых



объема. У реки Суур Эмайыги дефицит стока за рассматриваемый промежуток времени составил 1,92 годовых объема стока. Маловодность 1936—1941 годов не являлась региональным явлением, характерным лишь для территории Эстонской ССР. Как указывает Д. Л. Соколов-

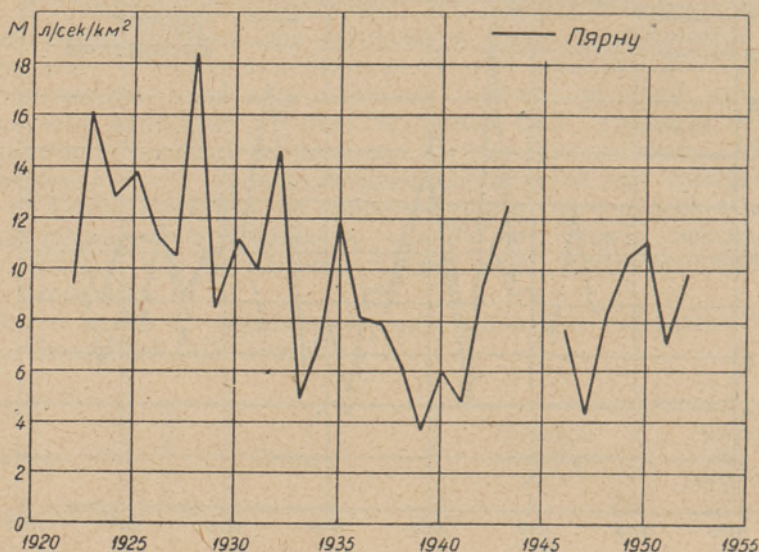


Рис. 3.

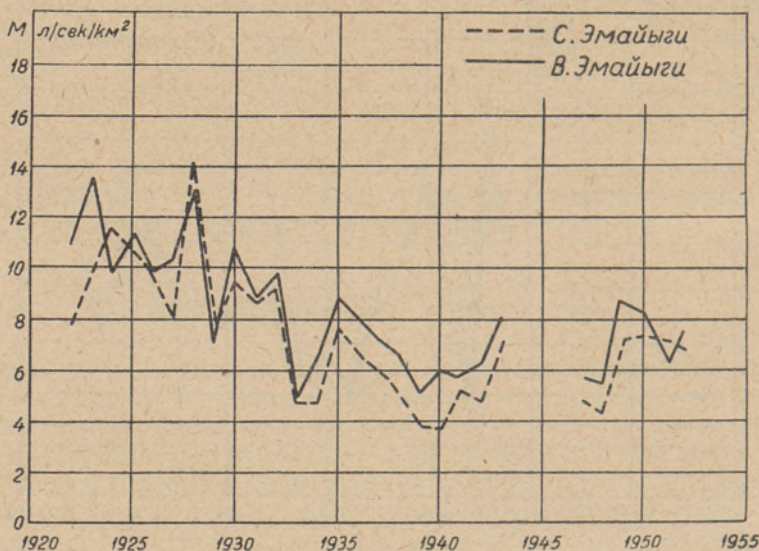


Рис. 4.

ский <sup>(4)</sup>, депрессия 1930—1940 годов захватила и удаленные от Эстонской ССР районы Урала, бассейны рек Волги и Дона и северную часть Белоруссии. Для иллюстрации распределения водности периода с 1923 по 1929 и с 1930 по 1940 годы приводим данные по указанным выше районам, заимствованные у Д. Л. Соколовского.



Река	Пункт	Отношение к среднему многолетнему расходу	
		1923—1929 гг.	1930—1940 гг.
Кама	Молотов	1,23	0,82
Белая	Уфа	1,18	0,69
Урал	Кушум	1,20	0,64
Волга	Горький	1,07	0,86
Волга	Сталинград	1,09	0,78
Дон	Калач	1,09	0,80
Зап. Двина	Витебск	1,12	0,91

Основной причиной маловодности в 1936—1941 годах явился дефицит осадков, причем особенно значительный в летне-осенний период. Для иллюстрации приводим средние значения средних сумм годовых и сезонных осадков за период с 1920 по 1940 год и средние суммы годовых осадков за период с 1936 по 1940 год по основным метеорологическим станциям Эстонской ССР (табл. 3).

Таблица 3

Метеорологическая станция	Среднегодовая сумма осадков, мм			Средняя сумма осадков					
				за зимний период (XI—III), мм			за летний период (IV—X), мм		
	1920— 1940 гг.	1936— 1940 гг.	Разница в %	1920— 1940 гг.	1936— 1940 гг.	Разница в %	1920— 1940 гг.	1936— 1940 гг.	Разница в %
Пярну	564	495	—12,2	154	155	+0,6	410	340	—17,1
Таллин	597	560	— 6,2	178	180	+1,12	419	340	—18,8
Васкнарва	668	580	—13,1	195	188	—3,6	473	392	—17,1

Особенно велик дефицит осадков в 1939 году (табл. 4).

Таблица 4

Метеорологическая станция	Среднегодовая сумма осадков, мм			Средняя сумма осадков за летний период (IV—X), мм		
	1920—1940 гг.	1939 г.	Разница в %	1920—1940 гг.	1939 г.	Разница в %
Пярну	564	343	—39,2	410	225	—45,0
Таллин	597	421	—29,4	419	294	—29,9
Васкнарва	668	452	—32,4	473	274	—42,0

Приведенные данные показывают, что водность рек Эстонской ССР в значительной мере определяется размером осадков летнего периода. Значительный дефицит осадков за этот период (например, в 1939 году) ведет не только к снижению расходов рек в текущем году, но и в значительной мере снижает сток зимних месяцев следующего года вследствие резкого уменьшения запаса грунтовых вод.

С другой стороны, обильные дождевые осадки (например, в 1923,



(1928 и 1935 годах) обуславливают повышение водности рек в указанные годы и в зимний период следующих за ними лет.

Абсолютные значения амплитуды колебания стока за период наблюдений по рассматриваемым рекам не превышают 15 л/сек/км<sup>2</sup>. Наибольшие размеры модуля годового стока зарегистрированы на реке Кейла в 1928 году — 19,1 л/сек/км<sup>2</sup>. Наименьший модуль стока (2,7 л/сек/км<sup>2</sup>) имела река Пуртсе в 1941 году. Равномерность годового стока можно в первом приближении определить размером отношения  $\tau = \frac{M_{\max}}{M_{\min}}$ .

Размер  $\tau$  для различных рек Эстонской ССР приводится в таблице 5.

Таблица 5

Река	Створ	Площадь водосбора км <sup>2</sup>	Число лет наблюдений	$M_{\max}$	$M_{\min}$	$\tau = \frac{M_{\max}}{M_{\min}}$
Нарва	Васкнарва	47 800	38	13,6	3,4	4,0
Пуртсе	Люганусе	792	27	14,9	2,7	5,5
Ягала	Линнамяэ	1582	14	13,9	3,5	4,0
Пирита	Лагеди	675	15	16,7	3,3	5,1
Кейла	Кейла	665	26	19,1	4,0	4,8
Васалемма	Урба	383	22	18,2	4,0	4,6
Вихтерпалу	Энглема	468	19	13,8	3,1	4,5
Пярну	Орекюла	5180	29	18,4	3,7	5,0
В. Эмайыги	Тыллесте	1070	28	13,6	4,9	2,8
С. Эмайыги	Тарту	7850	34	14,3	3,8	3,8
Выханду	Химмисте	853	26	14,1	5,1	2,8
Педья	Тырве	792	20	10,5	3,7	2,8
Лейва	Паюба	84,3	23	15,3	4,2	3,7

Данные таблицы 5 не могут служить точным критерием зарегулированности стока, так как они относятся к створам, имеющим различные размеры водосборной площади, различную продолжительность наблюдений и т. д. Однако они в основном правильно отражают картину зарегулированности стока, давая меньшие значения  $\tau$  для зарегулированных озерами и имеющих лучшее грунтовое питание рек бассейна Чудского озера и повышенное значение для слабо зарегулированных рек западной части бассейна Финского и Рижского заливов.

### Изменчивость годового стока

Ряды распределения годового стока лучше всего характеризуются параметрами кривых распределения — коэффициентами вариации и асимметрии. Как указывалось выше, имеющийся в наличии материал гидрометрических измерений дает возможность вычисления коэффициентов вариации с точностью порядка 10—15%. Непосредственное вычисление же коэффициентов асимметрии методами вариационной статистики при длине рядов в 20—25 лет дает слишком большие ошибки и не может быть рекомендовано. Действительно, ошибка вычисления  $C_s$  по формуле, предложенной С. Н. Крицким и М. Ф. Менкелем (1), при  $n = 20$  лет составит при  $C_v = 0,35$  и  $C_s = 2C_v = 0,70$

$$\sigma_{C_s} = \sqrt{\frac{6}{n} (1 + 6C_v^2 + 5C_v^4)} = \sqrt{0,543} = 0,74,$$

или относительная ошибка

$$\frac{\sigma_{C_s}}{C_s} = \frac{0,74}{0,70} = 1,06 = 106\%.$$



Таким образом, ошибки вычисления  $C_s$  весьма велики, и  $C_s$  необходимо отыскивать иным способом.

Принимая во внимание указанное обстоятельство, нами для вычисления  $C_s$  применена формула С. Н. Крицкого и М. Ф. Менкеля, согласно которой для асимметричной биномиальной кривой

$$C_s = \frac{2C_v}{1-K_{\min}}$$

Вычисленные значения  $C_v$  и  $C_s$  приводятся в таблице 6.

Таблица 6

Река	Створ	Число лет наблюдений	$C_v$	$\sigma_{C_v}$	$K_{\min}$	$C_s$	$\frac{C_s}{C_v}$
Нарва	Васкнарва	38	0,326	0,044	0,470	1,230	3,77
Пуртсе	Люганусе	27	0,331	0,052	0,318	0,971	2,93
Лейва	Паюба	23	0,364	0,064	0,480	1,400	3,85
Кейла	Кейла	26	0,390	0,066	0,417	1,338	3,43
Васалемма	Урба	22	0,350	0,063	0,409	1,185	3,39
Пярну	Ореюла	29	0,370	0,058	0,386	1,206	3,26
В. Эмайыги	Тыллесте	28	0,294	0,045	0,598	1,463	4,98
С. Эмайыги	Тарту	34	0,336	0,046	0,506	1,361	4,05
Выханду	Химмисте	26	0,266	0,041	0,644	1,495	5,62
Педья	Тырве	20	0,255	0,045	0,500	1,024	4,00

Данные таблицы 6 показывают, что при вычислении  $C_s$  по формуле Менкеля—Крицкого для рек Эстонской ССР получается значение  $C_s$  большее, чем  $2C_v$ , причем в некоторых случаях в 2—2,5 раза. Применение зависимости  $C_s = 2C_v$  для случаев, когда на деле  $C_s > 2C_v$ , дает несколько преумноженное значение модульных коэффициентов для обеспеченностей 0,1—10% и 90—99,9%. Так, например, принимая для реки Пярну  $C_s = 2C_v = 0,74$ , вместо 1,206, получим для расхода обеспеченности 0,1% при  $C_v = 0,37$ : а) при  $C_s = 1,206$   $K = 1 + 0,37 \cdot 4,82 = 2,78$ ; б) при  $C_s = 0,74$   $K = 1 + 0,37 \cdot 4,16 = 2,54$ .

Таким образом, расчетный расход обеспеченности 0,1% был бы ниже действительного на 8,6%.

Для проверки совпадения эмпирических кривых с теоретическими кривыми при принятых округленно значениях  $C_s = 2C_v$ ,  $4C_v$  и  $5C_v$  произведена накладка эмпирических и теоретических кривых (рис. 5, 6, 7, 8), причем обеспеченность расходов определялась по формуле

$$p = \frac{m}{n+1} 100.$$

Применение довольно распространенной, так называемой американской формулы

$$p = \frac{m-0,5}{n} 100$$

не рекомендуется, так как эта формула, как указывает А. В. Огиевский<sup>(2)</sup>, дает для первого члена убывающего ряда повторяемость, равную  $2n$ , что явно не отвечает действительности.

Рассмотрение эмпирических кривых обеспеченности и кривых, построенных по отношениям  $C_s = 2C_v$ ,  $C_s = 4C_v$  и  $C_s = 5C_v$  показывает, что эмпирическая кривая дает расхождение с теоретическими кривыми, особенно заметное на концах кривых в зонах с обеспеченностью 0,1—10%



и 90—99,9%. Значения  $C_s$ , вычисленные по формуле Менкеля—Крицкого, дают кривые, наиболее приближающиеся к эмпирическим в зоне расходов с обеспеченностью 0,1—10%, зато в зоне с обеспеченностью расходов 90—99,9% кривые дают значительное (15—20%) завышение модульных коэффициентов. Кривые  $C_s = 2C_v$  дают несколько большее

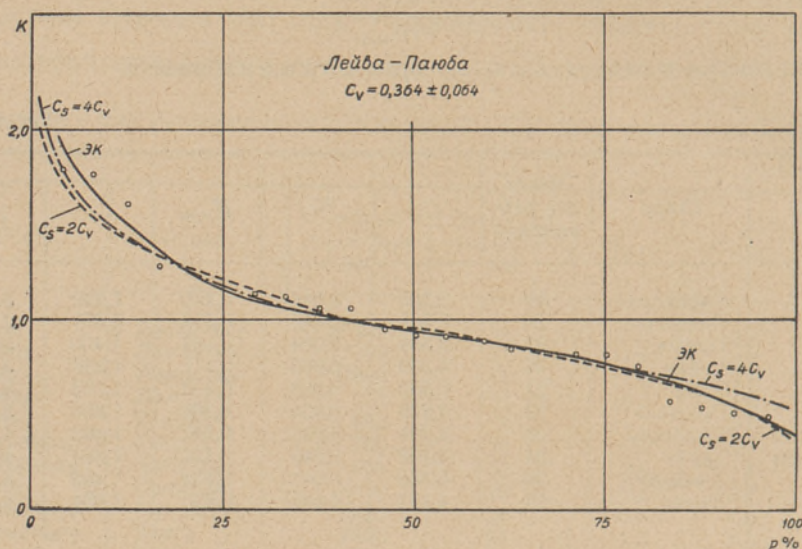


Рис. 5.

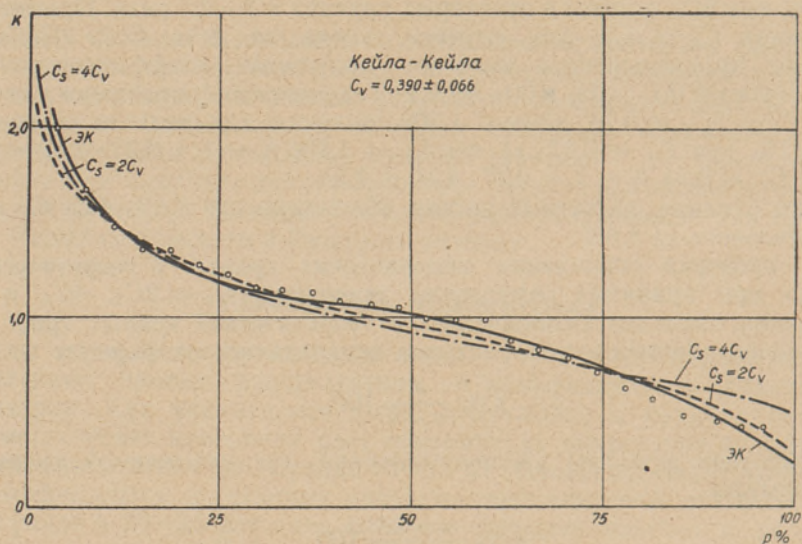


Рис. 6.

расхождение в зоне расходов с обеспеченностью 0,1—10% и более близкие значения в зоне расходов с обеспеченностью 90—99,9%.

Так как размеры среднегодового стока в зоне максимумов (0,1—10%) особого практического значения для гидрологических расчетов не имеют, а расходы с обеспеченностью 80—99,9%, наоборот, имеют весьма важное значение для энергетики, водоснабжения и рыбного хозяйства, то



можно рекомендовать при производстве расчетов в этом случае применение кривой  $C_s = 2C_v$ . Для расходов с обеспеченностью 10—80% эмпирическая кривая не дает значительных расхождений с кривыми, построенными по соотношению  $C_s = 2C_v$ ,  $4C_v$  и  $5C_v$ . Таким образом, можно рекомендовать при производстве гидрологических расчетов принимать для всех рек Эстонской ССР  $C_s = 2C_v$ .

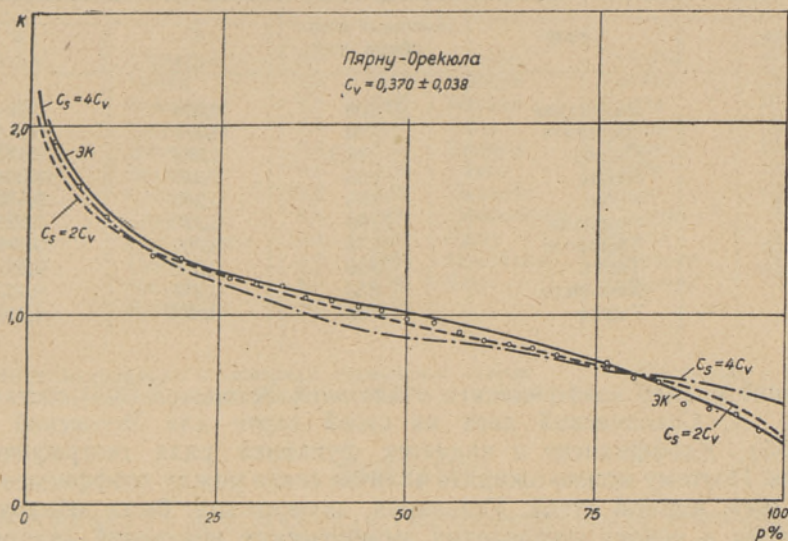


Рис. 7.

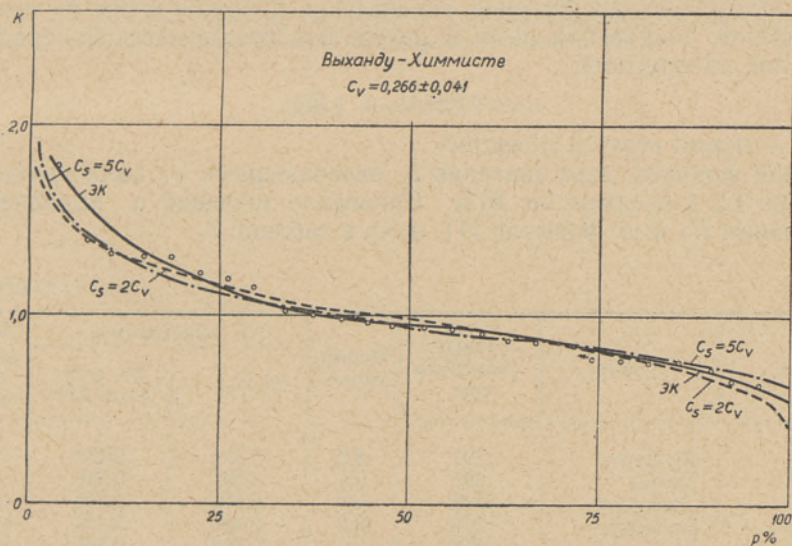


Рис. 8.

Для неисследованных рек Д. Л. Соколовский рекомендует определять коэффициент вариации  $C_v$  по формуле:

$$C_v = a - 0,063 \lg (F + 1),$$

где  $a$  — географический параметр, выражающий зависимость  $C_v$  от зональных ландшафтных условий;  $F$  — площадь бассейна в км<sup>2</sup>.



Значение параметра  $a$  для Эстонской ССР может быть определено на основании значений  $C_v$ , вычисленных для рек с продолжительными рядами гидрометрических измерений. Значения  $a$ , вычисленные по величине  $C_v$  для отдельных бассейнов рек Эстонской ССР, приводятся в таблице 7.

Таблица 7

Река	Створ	Площадь водосбора км <sup>2</sup>	$C$	$a$
Нарва	Васкнава	47 800	0,326	0,621
Пуртсе	Люганусе	792	0,331	0,514
Лейва	Паюба	84,3	0,364	0,485
Кейла	Кейла	665	0,390	0,568
Васалемма	Урба	383	0,350	0,513
Пярну	Орекюла	5180	0,370	0,603
В. Эмайыги	Тыллисте	1070	0,294	0,485
С. Эмайыги	Тарту	7850	0,336	0,581
Выханду	Химмисте	853	0,266	0,450
Педья	Тырве	792	0,256	0,440

Средний размер коэффициента  $a$  для всей Эстонской ССР составляет 0,54 (Д. Л. Соколовский дает на своей карте для Эстонской ССР  $a = 0,55$ ). Коэффициент  $a$  является функцией ряда географических факторов. Поэтому можно ожидать наличие связи между коэффициентом  $a$  и, например, нормой стока. Указанная зависимость была обнаружена и положена в основу составления эмпирических уравнений (например, формулы Шевелева), применяемых для определения значений  $C_v$  по величине нормы стока.

Для безозерных рек Эстонии определение  $a$  можно вести по следующей формуле, полученной нами в результате статистической обработки материалов наблюдений:

$$a = 0,05(M_0 + 1,35), \quad (1)$$

где  $M_0$  — норма стока в л/сек/км<sup>2</sup>.

Данная формула дает значения  $a$ , отличающиеся от вычисленных по значениям  $C_v$  в среднем на 10%. Сравнение значений  $a$ , вычисленных по значениям  $C_v$  и по формуле (1), дано в таблице 8.

Таблица 8

Река	Створ	Площадь водосбора км <sup>2</sup>	Норма стока	$a$ вычисленное		Расхождение в %
				по $C_v$	по формуле (1)	
Пуртсе	Люганусе	792	8,2	0,514	0,480	—6,5
Кейла	Кейла	665	9,4	0,568	0,538	—5,0
Пярну	Орекюла	5180	9,6	0,603	0,550	—8,5
В. Эмайыги	Тыллисте	1070	8,2	0,485	0,475	—2,0
Выханду	Химмисте	853	7,9	0,450	0,465	+3,0
Педья	Тырве	792	7,4	0,440	0,438	—0,5

Таким образом, формула (1) дает возможность довольно точно вычислить значение  $a$ , если известна норма стока данной реки. Подставив значение  $a$  в формулу Д. Л. Соколовского, получим формулу для определения коэффициента вариации годового стока рек Эстонской ССР:

$$C_v = 0,05 (M_0 + 1,35) - 0,063 \lg (F + 1). \quad (2)$$



Для уточнения параметра  $a$  по территории Эстонской ССР можно воспользоваться значениями  $a$ , вычисленными по формуле (1) и приведенными в таблице 9.

Таблица 9

Река	Створ	$M_0$	$a$	Река	Створ	$M_0$	$a$
Пюхайыги	Пюхайые	8,9	0,51	Касари	Тээнусе	10,1	0,57
Сельге	Арка	8,3	0,48	Касари	Касари	9,8	0,56
Валге	Ванакюла	9,7	0,55	Вигала	Рапла	10,8	0,61
Ягала	Линнамяэ	7,6	0,45	Энге	Ядивере	10,0	0,57
Пирита	Лагеди	9,8	0,55	Вяндра	Кийса	10,0	0,57
Вихтерпалу	Энглема	9,6	0,55	Сауга	Эльби	10,4	0,59
Раудна	Солгути	10,2	0,58	Навести	Аэсоо	10,0	0,57
Рейю	Сурью	8,6	0,50	Леммийыги	Сандра	9,6	0,55
Паадremaa	Мытсусилла	10,8	0,61	Кыпу	Римму	9,4	0,54
Быхне	Тырва	9,0	0,52	Мустйыги	Конувере	8,3	0,48
Эльва	Эльва	8,3	0,48	Ахья	Коорвере	8,6	0,50
Пунапеа	Метскюла	9,6	0,55				

Институт мелиорации и освоения осушенных земель  
Академии наук Эстонской ССР

Поступила в редакцию  
17 XII 1954

#### ЛИТЕРАТУРА

1. С. Н. Крицкий и М. Ф. Менкель, Гидрологические основы речной гидротехники, Изд. АН СССР, М.—Л., 1950.
2. А. В. Огиевский, Гидрология суши, Сельхозгиз, М., 1952.
3. Д. Л. Соколовский, Речной сток (Методы исследований и расчетов), Гидрометеоздат, Л., 1952.
4. Д. Л. Соколовский, Водные ресурсы рек промышленного Урала и методика их расчета, Гидрометеоздат, Свердловск—Москва, 1943.