

ВАРИАЦИЯ СТОКА И ЕГО ФАКТОРОВ¹

Н. П. Чеботарев

*профессор, доктор технических наук
Воронежский государственный университет
Воронеж, 1949*

Аннотация: Редакция журнала «Вестник ВГУ. Серия: География. Геоэкология» публикует монографию Н. П. Чеботарева «Вариация стока и его факторов». Проблема поднятая автором в середине XX века актуальна и сегодня. Однако монография Н. П. Чеботарева стала библиографической редкостью уже сразу после выхода в свет.

Текст книги воспроизводится в авторском варианте. Для понимания важности проблемы в современных исследованиях в области гидрологии публикацию книги предваряет комментарий кандидата географических наук С. Д. Дегтярева.

Ключевые слова: речной сток, вариация стока, факторы стока.

Variation of runoff and its factors

N. P. Chebotarev

Abstract: The editorial board of the journal «Bulletin of VSU. Series: Geography. Geoecology» publishes the monograph of N. P. Chebotarev «Variation of runoff and its factors». The issue raised by the author in the middle of the 20th century is still relevant today. However, the monograph of N. P. Chebotarev became a bibliographic rarity immediately after the publication.

The text of the book is reproduced in the author's version. To understand the importance of the problem in modern research in the field of hydrology, the publication of the book is preceded by a comment by S. D. Degtyarev – candidate of geographical sciences.

Key words: river runoff, runoff variation, runoff factors.

V. АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ ФОРМУЛ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ВАРИАЦИИ ГОДОВОГО СТОКА

Из опубликованных формул для определения коэффициента вариации годового стока в пределах территории СССР нам известны следующие: 1) Соколовского Д. Л., 2) Кривицкого С. Н. и Менкеля М. Ф., 3) Антонова Н. Д., 4) Ефимовича П. А. и 5) Шевелева М. Э. Эти формулы имели наиболее широкое применение в практике. Формула Соколовского Д. Л. по своей конструкции, была подобрана автором чисто эмпирическим путем.

© Чеботарев Н. П., 2019

¹ Продолжение. Начало в журналах «Вестник ВГУ. Серия: География. Геоэкология» № 3/2018 г., № 4/2018 г., № 1/2019 г., № 2/2019 г. и № 3/2019 г.

Параметр a_1 был охарактеризован как параметр, учитывающий климатические условия. Для параметра же n , имеющего постоянное значение для всей территории ЕТС, физического смысла автором не найдено. Этот параметр имеет постоянное значение, равное 0,063. В процессе практического применения формулы Д. Л. Соколовского было обнаружено, что зависимость C_{vy} и F на некоторых речных бассейнах отсутствует или является прямой (а не обратной, как и должно быть). Об этом пишет А. Н. Гольдштейн (6), указывая, что C_{vy} для р. Волги не убывает с увеличением площади бассейна. Более широкая проверка тесноты связей между C_{vy} и F была произведена Кочуковой Г. Н. и Слободзинской А. Р. (7). Результаты проверки показали, что зависи-



Материал статьи доступен по лицензии Creative Commons "Attribution" 4.0

мость C_{vy} от F довольно слабая и в особенности для северной и центральной полос ЕТС. Объяснение, данное А. Н. Гольдштейном, по вопросу нарушения зависимости между C_{vy} и F , является недостаточным и просто формальным. Совершенно правильно пишет Д. Л. Соколовский (8) в ответ Гольдштейну, что: «... коэффициент вариации добавочного стока и коэффициент корреляции между стоком двух частных бассейнов, является не причиной падения коэффициента вариации с увеличением площади бассейна, а сами по себе функцией изменения географических и климатических условий стока в бассейне». В ответе, данным Д. Л. Соколовским Гольдштейну, мы все же не находим достаточного объяснения случаев нарушения зависимости C_{vy} от F . В ответе указывается, что в явлениях нарушения связей принимает участие целый ряд факторов, но какие именно и в какой степени, эти вопросы остались не освещенными.

Значительная часть существующих формул основана на обратной зависимости с F .

Обратимся к формуле (18), полученной выше. В этой формуле площадь бассейна в явной форме отсутствует: она входит в значение C_{vx} , зависящее от нее. Наличие зависимости C_{vx} от площади бассейна было показано выше, выражение типом уравнения

$$C_{vx} = \frac{B}{F^n}.$$

Подставляя это выражение C_{vx} в формулу (18), получим, что

$$C_{vy} = \frac{Ba^m}{F^n}. \quad (65)$$

Сравнивая формулу (65) с наиболее распространенным типом

$$C_{vy} = \frac{A}{F^n},$$

находим, что

$$A = Ba^m = C_{vx(i)} a^m. \quad (66)$$

Таким образом, мы нашли более полное физическое содержание параметра «А», которое можно формулировать так: параметр «А», характеризующий климатические условия, равен элементарному коэффициенту вариации годовых осадков и стока, возведенное в некоторую степень m .

Величина $C_{vx(i)}$ как было показано выше, мало колеблется и в среднем равна 0,34.

Следовательно, мы еще раз имеем возможность убедиться в том, что зависимость C_{vy} от F не является непосредственной, а она возникает вследствие наличия связи между C_{vx} и F .

Теперь можно объяснить случаи нарушения связи между C_{vy} и F . Возьмем бассейн р. Волги и приведем для ряда пунктов вниз по реке значения C_{vy} , C_{vx} и a^m (табл. 5).

Из этой таблицы видно, что с ростом площади бассейна падает не C_{vy} , а C_{vx} ; уменьшение же C_{vy} с увеличением площади бассейна не может произойти

по причине возрастания отношения $a = \frac{\bar{x}}{y}$

севера к югу.

Для бассейна р. Волги из рассмотренных цифр видно большое влияние, которое оказывает на выравнивание C_{vy} по длине реки, возрастание потерь на испарение.

Рассмотри все случаи: (табл. 5а, б).

Для этого последнего бассейна падение C_{vy} строго соответствует падению C_{vx} , так как дефициты влажности одинаковы, а величины a^m мало отличаются друг от друга.

Приведенные примеры достаточно ясно вскрывают причины нарушения связи между C_{vy} и F , и вообще этот вопрос в нашем изложении получил достаточную ясность.

Остановимся теперь на особенностях формул тип

$$C_{vy} = \frac{A}{F^n}.$$

К этому типу формул относятся формулы Менкеля и Крицкого и две формулы Антонова.

Таблица 5а

№№ п/п	Река	Пункт	F км ²	C_{vy}	C_{vx}	a^m	m
1	Кама	Пермь	167500	0,19	0,144	1,492	0,73
2	"	Чистополь	510000	0,20	0,133	1,500	0,50
3	Волга	Куйбышев	1222000	0,20	0,133	1,620	"
4	"	Сталинград	1354000	0,19	0,117	1,620	"

В этом типе формулы некоторый интерес представляет параметр A , и в частности, вопрос, почему этот параметр возрастает от севера к югу.

Найденное выражение (66) для параметра « A » состоит из двух множителей. Первый из них $C_{vx(i)}$ имеет относительно небольшое колебание, зависящее от разнородности микро- и макроклиматических условий и от широтного положения бассейна почти не зависит. Второй множитель a^m по существу и является основной причиной изменения параметра « A » в широтном отношении. В самом деле, отношение a в широтном отношении изменяется в довольно больших пределах от 1 на севере и до 15 и более – на юге. По существу отношение должно иметь верхним своим пределом бесконечность, что возможно при $y_0 = 0$, т.е. для абсолютно бессточных областей.

Показатель степени m убывает от севера к югу, но пределы колебания его относительно невелики: величина m лежит в пределах от 1 до 0,45. В результате степень a^m достаточно резко возрастает от единицы на севере до 2,5 и более на юге. Возрастание же степеней от севера к югу вызывается возрастанием испарения, что в свою очередь влечет за собой убывание нормы стока и возрастания отношения a .

Итак, следовательно, основной непосредственной причиной возрастания параметра A от севера к югу является возрастание испарения в том же направлении:

Формулы других типов

Третья формула Крицкого С. Н. и Менкеля М. Ф.

р. Днепр

Третья формула представляет собой зависимость C_{vy} от двух факторов: площади F и модуля стока (нормы). По своей конструкции эта последняя формула может быть так же сведена к первому типу. Вся разница третьей формулы от двух первых заключается в том, что параметр « A » выражен в зависимости от нормы стока.

Посмотрим теперь, каким образом эта формула согласуется с нашей формулой. Параметр « A », как было сказано, может быть выражен в зависимости от нормы, тогда

$$A = C_{vx(i)} a^m = f(q_0), \quad (67)$$

где q_0 – модуль стока в л/с с $1 \text{ км}^2 = \frac{y_0}{t}$, t – число секунд в году.

Перепишем теперь выражение для параметра « A » (66) так, чтобы отношение a^m представилось отношением модулей осадков и стока, а именно:

$$A = \frac{C_{vx(i)} \left(\frac{x_0}{t}\right)^m}{\left(\frac{y_0}{t}\right)^m}. \quad (68)$$

Представив полученное значение « A » в формулу, получим:

$$C_{vy} = \frac{C_{vx(i)} \left(\frac{x_0}{t}\right)^m}{\left(\frac{y_0}{t}\right)^m F^n} = \frac{0,83}{q^{0,27} F^{0,06}}. \quad (69)$$

Следовательно, в этой формуле (69) Крицкий и Менкель как бы осредняют значение нормы

Таблица 5б

№№ п/п	Река	Пункт	F км ²	C_{vy}	C_{vx}	a^m	m
1	Днепр	Смоленск	13692	0,25	0,16	1,62	0,55
2	"	Орша	17423	0,27	0,16	1,64	"
3	"	Киев	326500	0,24	0,13	2,11	"
4	"	Лоц. Кам.	459107	0,26	0,12	2,25	"

р. Печора

Таблица 6

№№ п/п	Река	Пункт	F км ²	C_{vy}	C_{vx}	a^m	m	d
1	Печора	Якша	500	0,17	0,155	1,222	0,82	1,6
2	"	Тр. Печерск	30900	0,16	0,140	1,128	"	1,6

осадков и значение $C_{vx(i)}$ и все вместе выражают одним коэффициентом = 0,83. Осреднение касается также и показателя m , равного 0,27.

Формула Антонова Н. Д. (1934 г.).

Для определения коэффициента вариации годового стока Антоновым Н. Д. предложено две формулы: одна для площадей > 10000 км² типа:

$$C_{vy} = \frac{A}{(F + 1)^n} \quad (70)$$

и другая – для площадей < 10000 км² типа:

$$C_{vy} = 0,5A. \quad (71)$$

Первая относится к известному, ранее рассмотренному, типу. Параметр A в этих формулах можно находить по изолиниям или в зависимости от дефицита влажности. В последнем случае эмпирическая зависимость $A = f(d)$ получилась в таком виде

$$A = 0,295 d_0^{0,89}. \quad (72)$$

Так как параметр A , как было показано выше, зависит, главным образом, от испарения, а дефицит влажности является его главным фактором¹, то найденная зависимость вполне отвечает содержанию параметра.

Так как по нашей формуле в состав параметра A входит отношение: a , т.е. обратная величина коэффициента стока, то не трудно получить из существующих эмпирических формул зависимость a от дефицита влажности.

Так, например, исходя из формулы проф. Б. В. Полякова (20), можно найти, что

$$a = \frac{1}{h} = \frac{d^3 + 9}{9},$$

где h – коэффициент стока или приближенно

$$a = 0,1d^3 + 1. \quad (73)$$

Результаты рассмотренного примера подтверждают сказанное.

Рассмотрим вторую формулу Н. Д. Антонова. Представим формулу (65) несколько иначе, т.е. обозначив выражение коэффициента редукиции

$\frac{1}{F^n}$ через j , получим:

$$C_{vy} = jBa^m = jA. \quad (74)$$

¹ Дефицит влажности является главным фактором только при наличии достаточного количества влаги в почве: на юге, где в почве влаги мало, роль его значительно снижается.

Полученное выражение (74) представляет собой вторую формулу Н. Д. Антонова, в которой значение редукиционного коэффициента принято равным 0,5.

Принимая $n = 0,077$ (нами найденный) получим следующие значения коэффициента j , при площадях $F \leq 10000$ км².

F км ²	φ
10000	0,500,
5000	0,520,
1000	0,588,
100	0,702.

Из полученных чисел мы видим, что коэффициент редукиции не остается постоянным, а он меняется в зависимости от площади бассейна.

Принятие $j = \frac{1}{F^n}$ для площадей < 10000 км²

постоянным значением = 0,5 является часто искусственным упрощением, которое не может быть оправдано высказанным автором формулы положением, что для площадей < 10000 км² микро- и макро физико-географические условия являются, якобы однородными, не имеющими значения для C_{vy} . К этому следует добавить следующее. В распоряжении автора формулы не было многолетних данных для малых бассейнов, вследствие чего он не мог убедиться непосредственно на эмпирическом материале в размере влияния редукиции на конечный результат в определении C_{vy} , а близкие значения F к 5000-10000 км² не давали больших расхождений. Для малых бассейнов формулой (0,5а) вносится погрешность и тем больше, чем меньше площадь бассейна. Погрешность влечет за собой преуменьшение значения C_{vy} . Такое преуменьшение при $F = 1000$ составляет на 15,3 %, а при $F = 100$ км² на 28,5 %.

Поэтому вторая формула Н. Д. Антонова для малых площадей бассейнов, может иметь применение только в пределах площадей от 10000 до 5000 км², а ниже – необходимо учитывать редукицию.

Формула Антонова Н. Д. (1941 г.)

Переходя теперь к рассмотрению второй работы Н. Д. Антонова (29), мы должны отметить, что предлагаемая им формула для определения изменчивости годового стока представляет собой некоторое развитие формулы первой работы. При этом тип формулы оставлен прежним, если не считать введение корректирующего коэффициента за счет озерности. Точность новой формулы мало отличается от точности формул других существующих

щих формул. Автор формулы в своей работе указывает, что коэффициент вариации годового стока возрастает от севера к югу и даже дает графическую зависимость C_{vy} от географической широты места. Объясняя наличие этой зависимости климатическими условиями, автор формулы не дает более углубленного анализа этого явления. Из нашей формулы (18) легко видеть, что основной причиной широтного изменения C_{vy} является резкое возрастание отношения от севера к югу. Далее автор формулы приводит зависимость между C_{vy} и средним годовым модулем стока. Тип формулы этой связи представляют так:

$$C_{vy} = \frac{D}{M^m},$$

где $D = 0,63$, а $m = 0,45$

Этот тип формулы можно получить так же, как формулы Менкеля и Крицкого, из нашей формулы, а именно:

$$C_{vy} = C_{vx} a^m = \frac{A_1}{F^{n_1}} \cdot \frac{\bar{x}}{M^m},$$

откуда

$$C_{vy} = \frac{A_1}{x T^m} \cdot \frac{\bar{x}^{m-n_1} F^{-n}}{M^m}.$$

Следовательно, в формуле Н. Д. Антонова осредняются влияния значений \bar{x} и F . Здесь интегрально указать на значения параметра m , который у Н. Д. Антонова получается $= 0,45$, а у нас он является величиной, лежащей в пределах от 0,40 до 1,00, но среднее значение очень близко к 0,50. Осредняя значение параметра m , мы осредняем условия относительно испарения, от которого зависит этот параметр.

Осреднение влияний \bar{x} , F и m влечет за собой значительные погрешности, поэтому такой тип формулы для C_{vy} является явно недостаточным. Из нашей формулы (18) непосредственно следует, что C_{vy} зависит главным образом только от климатических факторов, а именно от: 1) вариации годовых высот осадков, 2) соотношения норм осадков к стоку и 3) от параметра m , характеризующего влияние испарения, изменение запаса $\pm U$ и др. Площадь бассейна входит в формулу косвенным фактором, определяющим значение C_{vx} . Что же касается остальных факторов, перечисленных в работе Антонова Н. Д., та часть из них (озерность, растительность, рельеф и гидрогеологичес-

кое условие) оказывают непосредственное влияние на y , а следовательно, на a и C_{vy} , но влияние это небольшое, так как известно, что норма стока зависит главным образом от климатических условий. Что касается остальных условий (ледники и вечные снега), то их следует рассматривать как осадки, и вариация количеств такой воды для того или другого бассейна будет зависеть от площади бассейна.

Как в первой, так и во второй своих работах Антонов Н. Д. указывает на интегрирующее влияние площади бассейна на C_{vy} . Выше нами доказано, что площадь оказывает влияние на величину C_{vx} , в последний уже является фактором C_{vy} .

Касаясь малых водосборов, для которых значение C_{vy} мало зависит от площади бассейна, то, исходя из нашей же формулы (18), можно видеть, что площадь входит в состав C_{vx} , а для последнего площадь влияния равна около 1000 км² (при $C_{vx(i)} = 0,2$), следовательно, в среднем для площадей, не превышающих 1000 км², C_{vx} остается независимым от площади бассейна, а, следовательно, и C_{vy} в среднем для площадей < 1000 км² будет оставаться независимым от размера площадей бассейнов. Но площадь сферы влияния не остается постоянной по территории и зависит от вариации осадков отдельных дождемеров, а, следовательно, независимость от площади бассейнов C_{vy} малых бассейнов определяется площадью сферы влияния f . Так, из таблицы 3 мы видим, что для южных рек, где площадь влияния может достигать до 3,89 км², величина малого бассейна не превышает 4 км², тогда как для северных рек малый бассейн может достигать величины 107200 км².

Формула П. А. Ефимовича.

Как известно, П. А. Ефимович (21) для определения C_{vy} получил формулу типа:

$$C_{vy}^2 = \frac{B}{Q_0} + P, \quad (75)$$

где Q_0 – норма расхода атмосферы, B и P – параметры.

Попробуем получить этот тип формулы, исходя из нашей формулы (18). Выше, в гл. III, мы получили для C_{vx} выражение (51) в зависимости от нормы осадков. Приняв в выражение (18) показатель степени осредненным и равным 0,5, получим, что

$$C_{vy} = C_{vx} \sqrt{a}. \quad (76)$$

Поставив в последнее равенство (76) вместо C_{vx} его выражение (50) и возведя в квадрат, получаем, что

$$C_{vy}^2 = \frac{B_1 a}{x F} + D a . \quad (77)$$

Заменив отношение обратным значением коэффициента стока. Найдем, что

$$C_{vy}^2 = \frac{B_1}{h \bar{x} F} + D a . \quad (78)$$

Выразив знаменатель первого слагаемого правой части равенства (78) через Q_0 и обозначив aD через P , получим

$$C_{vy}^2 = \frac{B}{Q_0} + P , \quad (79)$$

т.е. мы пришли, исходя из нашей формулы, к формуле Ефимовича, полученной совершенно другим путем.

В этом типе формулы, в явном виде, отсутствует площадь бассейна: она входит в скрытом виде в значение Q_0 . Параметр P включает в себя значение a и, следовательно, должен изменяться в широтном направлении, уменьшаясь с юга на север.

Кроме того, оба параметра B и P должны изменяться вследствие того, что ими частично воспринимается редукция. Поэтому параметры B и P могут оставаться постоянными только для некоторых, более или менее определенных климатических условий.

Итак, следовательно, существующие наиболее распространенные типы формул для определения коэффициента вариации годового стока имеют в основе найденный нами общий тип формулы, достаточно теоретически обоснованный.