

ВАРИАЦИЯ СТОКА И ЕГО ФАКТОРОВ

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.

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.

Книга выдающегося советского ученого гидролога, одного из основателей научной дисциплины «Учение о стоке», организатора и первого заведующего кафедрой гидрологии суши на географическом факультете ВГУ Чеботарева Николая Петровича «Вариация стока и его факторов» – жемчужина научной литературы по гидрологии. Несмотря на то, что Н. П. Чеботарев автор ряда известных учебников – «Сток и гидрологические расчеты (1939)», «Гидрология суши (1960)», «Учение о стоке (1962)», а также ряда статей по наиболее актуальным проблемам гидрологии суши и водного хозяйства, данная монография в силу ее публикации небольшим тиражом и в местной печати, а также из-за опережающей время новизны методологии, не получила широкой известности среди специалистов гидрологов и географов.

Она представляет собой полиграфический вариант диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук, успешно защищенной им в 1944 году в Московском гидромелиоратив-

ном институте. Ответы на вопросы о приоритете идей докторской диссертации доказательно изложены в заключительной части предисловия к монографии.

Книга написана в период работы Н. П. Чеботарева на физико-математическом факультете Воронежского государственного университета и несет в себе отголоски той методологической революции, которая произошла в физике после создания квантовой теории. Внедрение идеологии статистического подхода к объяснению генезиса гидрологических процессов – это основной вклад Н. П. Чеботарева в современную гидрологию, который не был оценен современниками ученого и который до сих пор остается актуальным. Публикация этой сравнительно небольшой книги в «Вестнике ВГУ. Серия: География. Геоэкология» – не только дань памяти выдающемуся ученому, работавшему в Воронежском государственном университете, но и приглашение молодым ученым к продолжению работ по развитию этого направления в гидрологической науке.

Монография состоит из 9 разделов, охватывающих практически все наиболее важные теоретические и прикладные вопросы учения о стоке.

В первом разделе (Введение) автор дает характеристику роли изменчивости и ее показателей (дисперсии и коэффициента вариации) в исследованиях стока и его факторов, показывает источники ошибок при оценке изменчивости.

Во втором разделе (Изменчивость годового стока в зависимости от его факторов) Н. П. Чеботарев подробно рассматривает основные методологические принципы исследования изменчивости, основанные на рассмотрении дисперсии функции нескольких аргументов применительно к уравнению водного баланса речного водосбора за годовой период с учетом корреляционной связи между аргументами. Он проводит анализ уравнения коэффициента вариации годового стока и упрощение полученных теоретических зависимостей с учетом генетических и географических закономерностей.

Третий раздел монографии (Коэффициент вариации осадков, его зависимость от основных факторов и роль в определении C_{vy}) посвящен чрезвычайно важному вопросу – изучению изменчивости атмосферных осадков (C_{vx}) и ее учету при анализе изменчивости стока (C_{vy}). В этом разделе Н. П. Чеботарев поднял очень важную проблему – изучения изменчивости осадков как по площади, так и по высоте, что привело его к выводу очень простой зависимости C_{vx} от площади водосбора, которая широко известна в гидрологической литературе. Автором, эта связь была генетически обоснована. В дальнейшем эти работы были продолжены только в 70-х годах XX века при оценке водного баланса. В инженерной и прикладной гидрологии эти работы до сих пор не развиваются несмотря на то, что учет изменения климата при оценке водных ресурсов требует продолжения исследований изменений осадков от площади выпадения и высоты местности. В третьем разделе автор исследует изменчивость осадков на примере конкретного водосбора реки Воронеж, а также для различных географических условий (север и юг Европейской территории), предельные расстояния между дождемерами, вводит в гидрологию понятие нормы расхода атмосферы и находит зависимость изменчивости осадков от нормы расхода атмосферы.

В четвертом разделе (Коэффициент вариации годовой высоты испарения с поверхности бассейна) Н. П. Чеботарев дает теоретический анализ ко-

эффициента вариации испарения с поверхности бассейна и выводит простую формулу для расчета испарения от определяющих факторов (осадков и дефицита влажности воздуха). К сожалению, данные по испарению с поверхности речных бассейнов в период написания монографии были ненадежны и малочисленны, поэтому данный раздел требует существенного обновления и уточнения зависимостей.

Пятый раздел монографии (Анализ существующих формул для определения коэффициента вариации годового стока) представляет блестящий образец изучения генезиса эмпирических формул для определения коэффициента вариации годового стока, хорошо обоснованных данными наблюдений, и представляет «эстетическое удовольствие» для специалиста в области речного стока, показывающий важность теории для исследования процессов стока даже в прикладном аспекте. В разделе проанализированы формулы Д. Л. Соколовского, С. Н. Крицкого и М. Ф. Менкеля, Н. Д. Антонова, П. А. Ефимовича, М. Э. Шевелева.

В шестом разделе (Предлагаемый метод определения коэффициента вариации годового стока в прикладном значении) Н. П. Чеботарев излагает метод расчета коэффициента вариации годового стока, основанный на изучении вариации осадков и испарения, и дает все необходимые зависимости для определения параметров расчетных формул, а также оценивает влияние озерности и заболоченности бассейнов на изменчивость годового стока. Предложенный автором метод расчета широко использовался в инженерной гидрологии до 70-х годов прошлого века, давал очень хорошие результаты, излагался в наиболее популярных пособиях и только после формализации методов расчета в 1972 году (СН 435-72) перестал рекомендоваться для расчетов, что привело к существенному обеднению инструментария расчетов стока.

Седьмой раздел (Вариация экстремального стока) посвящен теоретическим основам исследования вариации максимального стока талых вод (максимальных расходов, продолжительности половодья, ливневого стока) и минимального стока. В данном разделе Н. П. Чеботарев развивает методологические принципы исследования изменчивости годового стока к экстремальным видам стока (максимальному и минимальному), при этом он использует физические закономерности формирования талого стока (тепловой баланс снеготаяния, осадки и др.). Это совершенно новый для того времени метод исследования изменчивости экстре-

мальных величин, имеющий чрезвычайно важное значение для прикладной гидрологии.

Специалистам в области прикладной гидрологии этот раздел позволит разработать методическую основу для учета изменений климата и антропогенного воздействия на характеристики экстремального стока. Современные нормативные документы основаны только на статистических исследованиях гидрологических рядов, не дающих возможности обобщить их результаты на водосборы с отсутствием наблюдений, а математические модели пока требуют значительных объемов информации о природных комплексах, которые не могут быть собраны изыскателями за практически приемлемые сроки (продолжительность сбора информации для моделей сопоставима с нормативным сроком эксплуатации объекта).

Работы Н. П. Чеботарева по вариации минимального стока были продолжены и развиты на географическом факультете Воронежского государственного университета его учеником – доктором географических наук, профессором А. Г. Курдовым.

В восьмом разделе (Вариация весеннего стока) описывается методика определения коэффициента вариации весеннего стока, играющего большое значение при оценке объемов весеннего стока для целей строительства прудов и водохранилищ. Полученная зависимость коэффициента вариации от площади водосбора подтверждается эмпирическими исследованиями выдающегося гидролога Н. Д. Антонова и показывает необходимость пересмотра существующих рекомендаций нормативных документов по картированию этой гидрологической характеристики. Автором, впервые в гидрологической литературе, показана роль продолжительности половодья в формировании вариации стока половодья. Исследования Н. П. Чеботарева в области изменчивости весеннего стока были продолжены и развиты на факультете географии, геоэкологии и туризма Воронежского государственного университета его учеником, доктором географических наук, профессором В. М. Мишоном.

В девятом разделе монографии (Анализ уравнения годового стока в связи вариацией его) дается анализ эмпирических зависимостей годового стока с осадками, полученных рядом исследователей для отдельных рек. Эмпирические зависимости годового стока от осадков представляли линейные зависимости и были достаточно точными, но параметры этих уравнений для отдельных рек сильно отличались друг от друга. Н. П. Чебо-

тарев с позиции общей теории устанавливает, что параметры этих уравнений зависят от отношения коэффициентов вариации осадков и коэффициента вариации стока и дает методику получения параметров эмпирического уравнения для любого гидрологического створа. Блестящий генетико-статистический анализ сложнейшего вопроса показывает высочайший методологический уровень автора монографии и является заключительной точкой этого выдающегося классического научного труда.

Последним разделом книги являются краткие выводы, изложенные в 22 пунктах на трех страницах, где отображены все наиболее существенные положения монографии. Она является классическим примером краткого изложения выводов для молодых и опытных исследователей.

*кандидат географических наук,
сотрудник института
Гипростроймост, г. Москва,
С. Д. Дегтярев*

ПРЕДИСЛОВИЕ¹

Необъятные просторы нашей Родины таят в себе огромные естественные богатства, превосходящие по своим размерам другие страны мира, и в частности – по водным ресурсам Союз Советских Социалистических Республик занимает первое место в мире. На территории нашей страны протекает более 100 тысяч рек, ресурсы которых использованы очень мало. Эти водные ресурсы страны могут дать стране водный транспорт, гидроэнергию, они могут служить источниками для орошения, водоснабжения и для других целей народного хозяйства страны.

В четвертом сталинском пятилетнем плане восстановления и развития народного хозяйства СССР мы находим отражение больших работ в области водного хозяйства, и в частности к концу пятилетия мощность гидроэлектрических станций должна вырасти на 2300 тыс. киловатт, широко должны быть развернуты работы по восстановлению и строительству гидроэлектростанций местного значения с вводом в действие по малым гидроэлектростанциям мощности в 1000 тыс. киловатт.

В соответствии с постановлением февральского Пленума ЦК ВКП(б) по докладу т. Андреева намечены грандиозные задачи в отношении значи-

¹ Эта работа была доложена на Ученом совете Московского Гидромелиоративного Института в 1944 году.

тельного развития орошения в районах Средне-Русской возвышенности, а по постановлению Совета Министров СССР от 14.VII.1947 г. в Воронежской, Орловской, Курской и Тамбовской областях уже к 1950 году площадь орошенных участков должна составлять 472 тыс. га, а к 1953 году – 575 тыс. га.

Согласно историческому постановлению Совета Министров СССР и ЦК ВКП(б) по сталинскому плану наступления на засуху до 1955 года должно быть построено около 45 тыс. прудов в колхозах и совхозах в центральной и южной частях СССР.

Этим перечнем далеко не исчерпываются предстоящие задачи текущего пятилетия по использованию водных ресурсов рек и др. естественных водоемов страны. Но и этого достаточно, чтобы видеть, какое значение имеют реки и их сток в народном хозяйстве нашей Родины.

Вопросы годового стока, максимальных расходов и другие вопросы гидрологии являются далеко неразрешенными не только с теоретической, но и с практической стороны.

В цикле неразрешенных вопросов занимают видное место и вопросы вариации стока, которые в настоящее время, в связи с широким применением в гидрологии методов математической статистики, приобрели актуальное значение. Трудно найти какой-либо гидрологический или водохозяйственный расчет, где бы не фигурировала математическая статистика в какой-то части и в частности в отношении вариации стока. Еще не так давно вариации стока уделялось мало внимания, но с тех пор как начали прививаться кривые распределения в исчислении стока с заданной вероятностью, этим вопросам стали придавать большое значение. В настоящее время это значение возросло еще более, так как возникли интерес и практическое применение вопросов вариации не только в отношении стока, но и в отношении его факторов: осадков, испарения, а также и других элементов гидрологии.

Поэтому достаточно глубокое научно обоснованное освещение вопросов вариации стока и его факторов, рациональное разрешение этих вопросов в области практического применения, должны представлять собой значительный интерес и ценность в области гидрологии, а следовательно, в соответствующих отраслях народного хозяйства.

Настоящая работа довольно близка к высказанному положению. В работе предлагаются новые методы определения коэффициента вариации го-

дового стока при отсутствии или недостаточности наблюденных данных; в ней можно видеть обоснованность и точность этих методов, стоящих выше существующих методов; приводятся исследования различных вопросов вариации, которые дают возможность объяснить те или другие явления, ранее остававшиеся неясными и недоказанными (например, связь коэффициента вариации с площадями бассейна), определить параметры уравнения годового стока в зависимости от осадков для любого пункта ЕТС, определить коэффициент вариации осадков и пути к разысканию коэффициента вариации испарения и стока горных рек. Этим перечнем далеко не исчерпывается весь комплекс вопросов, затронутых в настоящей работе.

Настоящая работа была готова к печати в 1944 г., а в июне месяце 1945 г. она была подана в Гидрометеоздат и включена последним в план издания 1946 г. Спустя полгода, рукопись была возвращена автору по мотивам, что на такую тему ГГИ подал работу. Действительно, в сборнике «Метеорология и гидрология» № 5 за 1946 г. появляется статья Л. К. Давыдова (зам. отв. редактора) «О коэффициенте вариации годового стока рек». В последней трактуется вопрос о вариации стока, при этом исходное уравнение и конечное такие же, как и у автора данной работы.

І. ВВЕДЕНИЕ

1. ИЗМЕНЧИВОСТЬ СТОКА И ЕЕ РОЛЬ В ГИДРОЛОГИИ

Метеорологические условия, как известно, не остаются постоянными во времени: они меняются в течение суток, в течение года и более длительных отрезков времени. Колебание метеорологических величин влечет за собой и колебание, как следствие, стока. Последний, так же как и метеорологические элементы, колеблется изо дня в день, из года в год. Изменчивость метеорологических и гидрологических элементов обусловлена какими-то, до сих пор неизвестными законами. Если бы эти законы были известны, как известны законы движения планет в космическом пространстве, легко было бы предсказать метеорологические и гидрологические явления. Но жизненные запросы практики требуют ответа сегодня, когда еще законы остаются неизвестными, и поэтому такой ответ мы можем дать с помощью применения теории вероятности и методов математической статистики. Правда, ответ этот не является достаточно полным и точным: ответ содержит, какое-то вероятное число или ряд чисел метеорологичес-

кого или гидрологического значения, появление которых нужно ожидать в течение определенного отрезка времени.

Теория вероятности и методы математической статистики указывают нам пути для определения той или другой величины с определенной вероятностью. В основу такого определения положены кривые распределения признака. Мы знаем кривые распределения ряда авторов. Эти кривые в аналитическом виде могут быть выражены через 3 или 4 параметра, в число которых входит и коэффициент изменчивости или коэффициент вариации, характеризующий изменчивость ряда или вообще какой-либо совокупности. Коэффициент вариации вычисляется по известной в математической статистике формуле на основе наблюдаемых данных, а при отсутствии или недостаточности последних, по одной из эмпирических формул.

Для определения годового стока с заданной обеспеченностью требуется вычисление трех параметров: норма стока, коэффициент вариации и коэффициент асимметрии. При отсутствии наблюдаемых или кратковременных данных, первый параметр (норма стока) легко определяется с достаточной, для практических целей, точностью, по изолиниям; третий параметр обычно берется равным двойному значению второго параметра, для чего необходимо знать коэффициент вариации C_v т. е. второй параметр. Точность определения коэффициента вариации почти одинакова с точностью определения модульного коэффициента стока, а если еще принять во внимание, что погрешность нормы стока сравнительно невысокая, то можно прийти к выводу, что от точности определения C_v зависит почти полностью точность модуля стока. Поэтому второму параметру – коэффициенту вариации – приходится придавать особое внимание при определении стока с определенной обеспеченностью.

2. ПОГРЕШНОСТИ КОЭФФИЦИЕНТА ВАРИАЦИИ

При вычислении коэффициента вариации на основе наблюдаемых данных необходимо различать две группы ошибок.

1-я группа. Ошибки измерений и обработки исходных данных. Сюда следует отнести ошибки: 1) при измерениях и обработке расходов; 2) при построении кривой расходов; 3) при измерениях уровней; 4) при учете межлетнего стока; (наличии растительности в русле) и др.

2-я группа. Ошибки при вычислении нормы стока и коэффициента вариации, зависящие от длины ряда.

Первая группа содержит многочисленные источники ошибок. Общая величина ошибки этой группы получается как сумма многочисленных «элементарных ошибок».

$$Dx_0 = Dx_1 + Dx_2 + Dx_3 + \dots + Dx_m. \quad (1)$$

Каждая элементарная ошибка может быть и положительной и отрицательной, и поэтому сумма Dx_0 может по своей величине иметь небольшое значение. Однако, в отдельных случаях, могут некоторые из элементарных ошибок преобладать по величине и иметь только положительный или только отрицательный знак.

Так, например, если в пойменной части русла не было произведено наблюдений над расходами, экстраполированная часть кривой расходов ошибочно проведена более крутой ветвью, вследствие чего снятые с кривой ежедневные расходы для уровней выше межлетнего русла оказались бы преуменьшенными.

Так как наибольшие расходы охвачены верхней ветвью кривой, то ошибочное проведение кривой вызовет в этих расходах и годовом стоке значительную погрешность. И вообще всякое неправильное проведение кривой расходов влечет за собою ошибки одного знака для каждого расхода, снятого с кривой, и дает ощутительную ошибку для годового стока. Рассмотренный пример не является частым явлением: в настоящее время стремятся представить кривую поймы с достаточно хорошо освещенными расходами, даже для самых высоких уровней, тем не менее в отдельных случаях такие примеры имеют место. Теперь нас интересует вопрос: какое влияние могут оказать ошибки первой группы на результат вычисления нормы стока и коэффициент вариации? Очевидно, такое влияние может оказаться если неправильно построена кривая расходов, если неверно учтен зимний или межлетний сток, не учтены переменность русла, подпора и проч., когда сток каждого года может стать преувеличенным или преуменьшенным. Тогда наличие постоянной ошибки с одним и тем же знаком вызовет такую же ошибку и для нормы стока. Что же касается коэффициента вариации, то он не изменяет своего значения.

В самом деле, пусть имеется ряд:

$$y_1 + j y_1; y_2 + j y_2; y_3 + j y_3; \dots y_m + j y_m,$$

где $j y_i$ – ошибка,

или

$$y_1(1+j); y_2(1+j); y_3(1+j) \dots y_m(1+j),$$

норма стока

$$y'_o = \frac{(1+j) \sum y_i}{m} \quad (2)$$

имеет ту же ошибку, что и каждый член ряда.

Коэффициент вариации

$$C_V = \frac{s}{V_o} = \frac{(1+j) \sqrt{\sum (y_i - y_o)^2}}{\sqrt{m}(1+j)y_o} = \sqrt{\frac{\sum \left(\frac{y_i}{y_o} - 1\right)^2}{m}}, \quad (3)$$

т. е. на значение коэффициента вариации постоянная ошибка одного знака не оказывает никакого влияния. Поэтому при кривой расходов, дающей только преувеличение или только преуменьшение, на коэффициенте вариации погрешность не будет сказываться.

В остальных случаях, когда ошибки непостоянны или они для каждого года имеют разные знаки как норма, так и коэффициент вариации будут с ошибками. Но, принимая во внимание, что элементарные ошибки чаще всего имеют разные знаки, можно принять, что и в этих случаях коэффициент вариации не имеет больших погрешностей.

Итак, следовательно, можно предположить, что ошибки первой группы не могут оказывать существенного влияния на коэффициент вариации годового и максимального стока.

Обратимся к ошибкам второй группы, которые зависят от длины рядов.

В этом отношении нас интересуют среднеквадратические ошибки и ошибки коэффициента вариации. Из математической статистики известно выражение средней ошибки для C_V :

$$s_{CV} = \frac{C_V}{\sqrt{2n}} \sqrt{1 + 2C_V^2},$$

или

$$s_{CV} \% = \frac{100}{\sqrt{2n}} \sqrt{1 + 2C_V^2}, \quad (4)$$

которое указывает, что средняя ошибка s_{CV} находится в обратной зависимости от длины ряда.

При коротких рядах эта ошибка может быть значительна. В этом случае небольшое улучшение результата можно получить, пользуясь предложением проф. Д. Л. Соколовского. По этому вопросу проф. М. А. Великанов пишет: «Д. Л. Соколовский рекомендует, и с нашей точки зрения совершенно правильно, относить в этих случаях среднее квадратическое отклонение к среднему получаемому не непосредственно из данного ряда, а косвенным теоретическим путем» и далее: «Таким образом, возможно отделить друг от друга вычисление нормы и вычисление среднего квадратического, и результат должен получиться лучше».

Выше мы привели выражение для s_{CV} (4). Это выражение получается из отношения:

$$C_V = \frac{s}{y_o}, \quad (5)$$

где s – средняя квадратическая ошибка данного ряда, y_o – норма стока.

При выводе равенства (4) предполагалось, что длины периодов (числа лет) для среднего квадратического отклонения (n_1) и нормы (n_2) является одинаковым, т. е. $n = n_1 = n_2$.

Для вычисления ошибки, при разных значениях n , т. е. $n_2 > n_1$, можно пользоваться полученным тем же путем уравнением вида:

$$s_{CV} = \pm 100 \sqrt{\frac{1}{2n_1} + \frac{C_V^2}{n_2}}. \quad (6)$$

Так, например, средняя ошибка C_V при $C_V = 0,30$ и числах лет $n_1 = 10$ и $n_2 = 30$ лет составит $s_{CV} = \pm 23 \%$, тогда как при $n = n_1 = n_2 = 10$ годам $s_{CV} = \pm 24,3 \%$, т.е. ошибка в последнем случае получается немного больше.