

УДК 556.53

ГРУППИРОВКИ И СМЕНА ЛЕТ РАЗНОЙ ВОДНОСТИ В РЯДАХ ГОДОВОГО СТОКА БОЛЬШИХ РЕК ЕВРОПЕЙСКОЙ РОССИИ

© 2026 г. В. И. Бабкин^{1,*}, А. В. Бабкин¹, О. В. Мёрзлый¹, Е. Л. Скорятина¹

¹Государственный гидрологический институт, Санкт-Петербург, Россия

*e-mail: vladimir-babkin@mail.ru

Поступила в редакцию 31.01.2025 г.

После доработки 16.10.2025 г.

Принята к публикации 23.12.2025 г.

Многолетние ряды годовых значений стока больших рек Европейской России (Северной Двины, Печоры, Невы, Кубани, Дона, Волги и Терека) проанализированы с целью выявления в них группировок маловодных, средних по водности и многоводных лет, а также для оценки вероятности смены лет одной водности на другие водности. Ряды обрабатывались с момента начала наблюдений по 2015 г. Самым длинным из них является ряд стока Невы, непрерывные значения которого имеются с 1859 г. Ряды стока Печоры и Терека – самые короткие, они начинаются с 1925 г. К многоводным относились те годы, сток которых превышал среднее значение ряда более чем на 5%. Если он был меньше его среднего значения более чем на 5%, этот год считался маловодным. Когда сток превышал среднее значение ряда, либо был меньше него менее чем на 5%, то этот год рассматривался как средний по водности. Группировкой ряда является непрерывная последовательность лет той же водности. Вероятность перехода стока из области одних значений в другие оценивалась по отношению числа таких переходов к общему числу лет его нахождения в области, из которой происходит переход. Установлено, что маловодные группировки на отдельных реках имеют продолжительность 2–13 лет, а многоводные – 2–10 лет. Для отдельных лет наиболее вероятно продолжение в последующем лет однотипной водности.

Ключевые слова: большие реки, Европейская Россия, временные ряды, градации водности рек, продолжительность группировок, изменения водности

DOI: 10.7868/S2658697526020127

ВВЕДЕНИЕ

Гидрологические наблюдения за уровнями и стоком воды были начаты на отдельных реках России с конца XVIII в. (Водные ..., 1987; Водные ..., 2008). Накопленные за этот период данные по стоку больших рек нашей страны имеют продолжительность 80–100 лет и более. Это является предпосылкой для проведения исследований по изучению внутренней структуры колебаний стока целого ряда рек (Шикломанов и др., 2010).

Изучение группировок водности рек и их предсказание важно для практики водного хозяйства, поскольку группировки лет с пониженным стоком формируют дефицит водных ресурсов (Андреянов и др., 1965), к которому весьма чувствительны регионы нашей страны, расположенные в зоне недостаточного увлажнения.

В гидрологии часто отмечалось, что в многолетних рядах наблюдений годового стока встречаются и одиночные годы с его как повышенными, так и пониженными значениями, и непрерывные последовательности таких лет. В качестве одного из объяснений наличия группировок лет различной водности рассматривается корреляционная связь между стоком смежных лет (Крицкий, Менкель, 1968). На тенденцию к группированию лет повышенной и пониженной водности при высокой автокорреляции стока по результатам анализа его рядов бассейна Вилюя указано в работе (Юмина, Терешина, 2017). В рядах стока выделялись циклы, которые описывались как чередования группировок лет повышенной и пониженной водности (Воскресенский, 1962; Кузин, 1979).

В работе (Киреева и др., 2018) проанализированы данные по стоку бассейна Дона по 2015 г.

Показано негативное влияние маловодных группировок стока 1972–1977 и 2007–2015 гг. на условия жизни многих рыб и на качество воды в реке. В исследовании (Болгов, 2016) сделан вывод о том, что группирование маловодных лет притока вод в оз. Байкал может вызвать понижение его уровня ниже отметки, установленной постановлением Правительства РФ № 231.

Поскольку многолетние ряды годового стока рек имеют разную длину и могут быть недостаточно продолжительными для анализа их группировок различной водности, в ряде работ использовались их модели в 1000 последовательных значений каждая, составленные на основе метода Монте-Карло (Сванидзе, 1964). Возможность использования методологии цепей Маркова при анализе и описании колебаний стока обоснована в работе (Крицкий, Менкель, 1968), а в исследованиях (Раткович, 1970, 1972) она применялась при разработке его стохастических моделей.

В работе (Раткович, 1970) на основании данных наблюдений стока примерно на 400 реках мира исследовалось распределение по длительности группировок маловодных и многоводных лет, а также проводился анализ стохастической зависимости между положением года внутри группировок и его водностью. Рассматривались два состояния водности — пониженное и повышенное, которые определялись обеспеченностью относящихся к ним значений стока. Расчеты проводились по различным стохастическим моделям, сформированным в зависимости от параметров распределения вероятностей и модификации цепи Маркова. В результате был сделан вывод, что средняя длительность маловодных группировок превосходит среднюю длительность многоводных.

В исследованиях, обобщенных в монографии (Пространственно-временные ..., 1988), также рассматривались две градации водности реки — повышенная и пониженная. При этом водность отдельных лет определялась по медианному принципу. По оценкам этой монографии, во всех районах СССР однолетка повторяется чаще, чем группировка любой продолжительности, причем повторяемость многоводных и маловодных группировок практически одинакова.

В исследованиях (Картвелишвили, 1967; Картвелишвили, Корганова, 1972) чередование группировок стока рассматривается как признак присутствия в рядах его наблюдений скрытых периодичностей. Кроме отдельных случаев, которые могут быть проявлением 11-летнего периода колебаний солнечной ак-

тивности, авторам не удалось с использованием информации о группировках лет различной водности выявить периоды в многолетних рядах наблюдений стока.

В работах (Бабкин, Серков, 1974; Вагер, Серков, 1996) методология цепей Маркова адаптирована для трех состояний стока — повышенного, пониженного и близкого к среднему, что открывает возможность оценки вероятности его перехода из области одних значений в две другие, либо сохранения его текущего состояния.

На основе концепции группировок этих трех состояний значений стока предложена методика оценки синхронности его колебаний для различных рек (Бабкин и др., 2022). Она основана на балльной системе. Так, в частности, если в какой-либо год водность рек находится в одной области значений, ей присваивается балл 1, а если в противоположной области, то –1. Если значения стока находятся в смежных областях, им присваивается соответствующая доля балла. Синхронность и асинхронность колебаний стока оценивается по суммам баллов всех лет.

Причиной появления и группирования маловодных лет указывалось соотношение тепла и влаги в пределах речного бассейна, когда минимальные осадки сочетаются с максимумами радиационного баланса (Болгов и др., 2009). В исследовании (Черенкова, Сидорова, 2021) установлена связь стока рек европейской части России и увлажнения в их бассейне, описываемого индексом SPEI. Маловодные годы для бассейнов Волги и Дона в основном случаются при дефиците увлажнения либо в текущем году, либо в течение двух лет подряд. Сток северных рек реагирует на недостаточное увлажнение в их бассейнах в том же году.

Целью настоящего исследования является выявление группировок лет повышенных, пониженных и близких к средним значениям в рядах стока больших рек европейской части России, а также оценка вероятностей перехода стока из областей одних значений в другие. При достижении этой цели решались задачи по отношению каждого года рядов стока соответствующих рек к той или иной водности, установлению непрерывных последовательностей лет той же водности и оценке их продолжительности, расчету числа переходов значений рядов от одной водности к другой, а также анализа и обобщения этих данных.

Полученные результаты могут оказаться полезными для развития методик прогнозирования стока с соответствующей заблаговременностью и при разработке мер по управлению водными ресурсами рассматриваемых рек.

МАТЕРИАЛЫ НАБЛЮДЕНИЙ И МЕТОДЫ

В качестве исходных материалов для выполнения исследований использованы данные о годовых значениях стока семи больших рек европейской части России: Северной Двины, Печоры, Невы, Дона, Кубани, Волги и Терека за периоды от начала наблюдений по 2015 г. включительно, содержащиеся в Автоматизированной информационной системе Государственного водного кадастра.

Методическую основу исследований составили представления о трех состояниях водности рек (Бабкин, Серков, 1974; Вагер, Серков, 1996) — соответственно маловодного, среднего по водности, и многоводного. Причисление годового стока к какой-либо водности реки проводилось с учетом его среднего значения Q_{cp} , принимая во внимание ошибку при его оценке σ_n , которая рассчитывается следующим образом (Пособие ..., 1984):

$$\sigma_n = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \sqrt{\frac{1+r}{1-r}}, \quad (1)$$

где σ — среднее квадратическое отклонение ряда из n членов, r — его автокорреляция со смежными значениями.

Полученные ошибки, отнесенные к средним значениям стока σ_n/Q_{cp} , указаны в табл. 1 в тех же строках, где приводятся названия рек и постов наблюдений, а также периоды, за которые проводилась обработка рядов. Самая маленькая относительная ошибка (2.08%) оказалась у ряда стока Северной Двины. Самое большое ее значение отмечается у стока Дона. Оно составляет 4.32%.

Относительная ошибка среднего значения стока каждой из рассматриваемых рек не превышает 5%. Этот процент принят как определяющий его средний по водности диапазон. Для разграничения областей стока каждой реки его среднее значение умножалось на два коэффициента, равные соответственно 0.95 и 1.05.

Все значения стока, находящиеся в интервале $0.95Q_{cp} - 1.05Q_{cp}$, относились к стоку средних по водности лет. Те из них, которые были меньше по величине $0.95Q_{cp}$, причислялись к стоку маловодных лет, а большие $1.05Q_{cp}$ — к стоку многоводных лет.

Исходные стокосовые ряды заменялись цифрами 1, 2, 3, которые присваивались каждому году, если его сток попадал соответственно в диапазон низких, средних, либо высоких значений. Для каждой реки с начала периода наблюдений за ее стоком производилась оценка соответственно числа непрерывных последовательностей тех же цифр и числа лет в каждой из них. Таким

образом, выделялись группировки различной водности и определялась их продолжительность.

На рис. 1 в качестве примера представлены многолетние колебания стока р. Кубани, разграниченные указанными областями ее водности. Наряду с одиночными значениями стока в той или иной области, какими является пониженный сток 1918 г. и высокий 1997 г., можно отметить непрерывные последовательности лет нахождения стока в них.

С 1937 по 1942 г. все годы сток находился в области повышенных значений, а в 1983–1986 гг. — в его пониженном диапазоне. В указанные годы сток сформировал группировки длиной соответственно 6 лет и 4 года. В диапазоне средних значений стока встречаются двухлетки, в частности 1912–1913 гг.

В группировке лет сток находится в той же самой области его значений. Между последним годом группировки и следующим годом происходит переход стока из соответствующей области в одну из двух других областей. Так, после шестилетки повышенной водности 1937–1942 гг. сток перешел в диапазон его средних значений, а после двухлетки средней водности 1912 и 1913 гг. — в многоводную область.

Там, где значения ряда одиночные, переход стока в другую область происходит сразу. От пониженного значения 1918 г. сток перешел в повышенный диапазон, а от высокого стока 1997 г. — в область средних значений.

Помимо сохранения стоком своего значения в той же области непрерывно в течение ряда лет, оценивалось число его переходов из области одних значений в другие. По отношению этого числа к числу лет нахождения стока в диапазоне его значений, из которого осуществлялся переход, рассчитывались вероятности перехода стока из одной области в другие.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Группировки лет разной водности

Реки европейской части России, для которых выполнены исследования, принадлежат бассейнам двух океанов: Северного Ледовитого (Печора и Северная Двина), Атлантического (Нева, Дон, Кубань), а также к области внутреннего стока — бассейну Каспийского моря (Волга и Терек).

Общие сведения о выявленных группировках лет различной водности для исследуемых семи речных бассейнов приведены в табл. 1. Продолжительность группировок указана в верхней строке. Цифрами I и II обозначены соответ-

Таблица 1. Продолжительность (число лет) и количество группировок лет различной водности в стоке крупных рек европейской части России

Наименование группировок лет	Продолжительность группировок лет												Итого	
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	I	II
р. Северная Двина — с. Усть-Пинега, 1882–2015 гг., $\sigma_n/Q_{cp} = 2.08\%$														
Маловодные	10	5	1	1									17	44
Средние по водности	1	1	1										3	9
Многоводные	7	3	3										13	35
р. Печора — с. Оксино, 1925–2015 гг., $\sigma_n/Q_{cp} = 2.27\%$														
Маловодные	2	4	2	1									9	29
Средние по водности	2	1	2										5	15
Многоводные	3						1		1				5	24
р. Нева — д. Новосаратовка, 1859–2015 гг., $\sigma_n/Q_{cp} = 2.45\%$														
Маловодные	5	6	2	3	1								17	57
Средние по водности	4	1	1										6	15
Многоводные	5	2	3		2								12	40
р. Дон — станица Раздорская, 1891–2015 гг., $\sigma_n/Q_{cp} = 4.32\%$														
Маловодные	6	5	1		1	1		1					15	53
Средние по водности	0												0	0
Многоводные	6	5	1	1									13	36
р. Кубань — г. Краснодар, 1912–2015 гг., $\sigma_n/Q_{cp} = 2.10\%$														
Маловодные	5	6	1										12	32
Средние по водности	3												3	6
Многоводные	6	2	1		1								10	28
р. Волга — г. Волгоград, 1879–2015 гг., $\sigma_n/Q_{cp} = 2.31\%$														
Маловодные	7	6	2				1						16	48
Средние по водности	3	1		1									5	14
Многоводные	6	3	5										14	41
р. Терек — с. Степное, 1925–2015 гг., $\sigma_n/Q_{cp} = 3.02\%$														
Маловодные	5	4		1								1	11	40
Средние по водности	2												2	4
Многоводные	3	3		1		1							8	27
Все реки (суммы)														
Маловодные	40	36	9	6	2	1	1	1	0	0	0	1	97	303
Средние по водности	16	4	4	1	0	0	0	0	0	0	0	0	24	63
Многоводные	36	18	13	2	3	1	1	0	1	0	0	0	75	231

Примечание: 2, 3, 4 ... — число лет группировки; I — общее количество группировок; II — число лет в них; σ_n/Q_{cp} — относительная средняя квадратическая ошибка определения среднего значения стока.

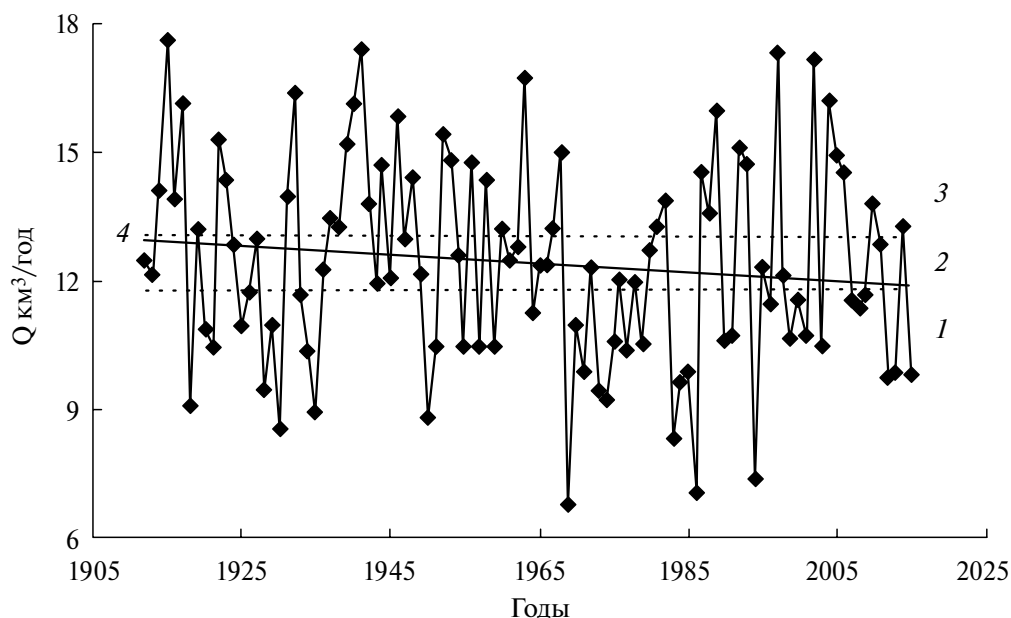


Рис. 1. Сток р. Кубани — г. Краснодар в трех его диапазонах: 1 — область пониженных значений; 2 — область значений, близких к среднему; 3 — область повышенных значений; 4 — линейная тенденция ряда.

ственно общее число группировок всех длин и число их лет.

В нижних строках табл. 1 найдены суммы числа группировок тех же длин соответствующей водности всех рек. В нижнем правом ее углу для всех рек получены соответственно общее число и группировок всех длин, и их лет, соответственно маловодного, среднего по водности и многоводного диапазонов.

На Северной Двине выявлено 17 маловодных группировок лет. Всего в них было 44 года. Средними по водности было 3 группировки с общим числом лет в них, равным 9. В многоводные годы в стоке этой реки отмечено 13 группировок, в которых было 35 лет. Итого: в стоке Северной Двины выявлены 33 группировки лет различной водности. Эти группировки охватывали 88 лет, то есть 66.2% продолжительности ряда. 45 лет (33.8%) не входили в группировки — это однолетки. Таким образом, доля маловодных группировок лет от общего числа группировок составила 51.5%, средних по водности группировок лет — 9.1%, а многоводных группировок лет — 39.4%. Доля числа лет в маловодных группировках от общего числа лет наблюдений равна 33.1%, в группировках лет средней водности — 6.8%, в многоводных группировках — 26.3%. Доля однолеток, не вошедших в группировки, от общего числа лет составила 33.8%.

В стоке Печоры наблюдалось 19 группировок лет различной водности. Эти группировки охватывали 68 лет, что составляет от общего периода наблюдений 74.7%. Оставшиеся 25.3% всех лет ряда стока (23 года) относятся к не входящим в группировки однолеткам. Доля маловодных

группировок лет от общего числа группировок составила 47.4%, средних по водности и многоводных — 26.3% каждая. Доля числа лет в маловодных группировках от общего числа лет равна 31.9%, средних по водности лет — 16.4%, многоводных — 26.4%.

В стоке Невы выявлено 35 группировок лет различной водности. В эти группировки входило 112 лет, что составляет 71.8% продолжительности ряда. 44 года — однолетки. Их доля от общего числа лет оказалась равной 28.2%. Доля маловодных группировок лет от общего числа группировок составила 48.6%, доля группировок средних по водности лет — 17.1%, а многоводных — 34.3%. Доля числа лет в маловодных группировках от общего числа лет равна 36.5%, в группировках лет средней водности — 9.6%, в многоводных — 25.6%.

В стоке Дона выявлено 15 маловодных группировок и 13 многоводных. Среди маловодных группировок присутствуют и те, что рассмотрены в работе (Киреева и др., 2018): 2007–2015 гг., продолжительностью 9 лет, и шестилетка 1972–1977 гг. (см. табл. 1). У Дона нет группировок средней водности стока, но в этом диапазоне его значений находятся 13 однолеток. Группировки стока Дона составили 89 лет, то есть 71.8% всех лет ряда. 35 однолеток не входили в них. Доля маловодных группировок лет от общего числа группировок равна 53.6%, а многоводных — 46.4%. Доля числа лет в маловодных группировках от общего числа лет равна 42.7%, а в многоводных группировках — 29.0%. Доля однолеток, не вошедших в группировки лет различной водности, составила 28.3%.

В стоке воды Кубани у Краснодара выявлено 25 группировок лет различной водности. В эти группировки вошло 66 лет, что составляет 64.1% длины ряда. Также установлено 37 однолеток. Доля маловодных группировок лет от общего числа группировок составила 48%, доля группировок средних по водности лет — 12%, а многоводных — 40%. Доля числа лет в маловодных группировках от общего числа лет равна 31.1%, в группировках лет средней водности — 5.8%, в многоводных — 27.2%. Доля однолеток от общего числа лет составила 35.9%.

В стоке Волги выявлено 35 группировок лет различной водности. В эти группировки вошло 103 года, что составляет 75.7% всех лет ряда. Доля маловодных группировок лет от общего числа группировок составила 45.7%, группировок средних по водности лет — 14.3%, а многоводных — 40%. Доля числа лет в маловодных группировках от общего числа лет наблюдений равна 35.3%, лет средней водности — 10.3%, в многоводных — 30.1%. Доля однолеток от общего числа лет составила 24.3%.

В стоке Терека установлена 21 группировка лет различной водности. Маловодных группировок было выявлено 11, средних по водности — 2, многоводных — 8. В эти группировки входил 71 год, что составляет 78.9% длины ряда. 19 однолеток не входили в группировки. Вместе с другими в число маловодных группировок входит тринадцатилетка (с 1947 по 1959 г.). Это самая длинная группировка из установленных для стока всех рассматриваемых рек. Доля маловодных группировок лет от общего числа группировок составила 52.4%, доля группировок средних по водности лет — 9.5%, а многоводных — 38.1%. Доля числа лет в маловодных группировках от общего числа лет наблюдений равна 44.4%, в группировках лет средней водности — 4.4%, в многоводных — 30%. Доля однолеток, не вошедших в группировки лет различной водности, от общего числа лет составила 21.1%.

Вероятность смены лет одной водности на другую

Результаты исследований по оценке вероятности смены лет одной водности на другую в стоке рек семи речных бассейнов европейской части России приведены в табл. 2. Стрелками в этой таблице показано, что смена вероятностей одной водности на другие происходит по направлению столбцов сверху вниз.

Из анализа данных этой таблицы следует, что вероятность сохранения либо смены лет одной водности на другую для каждого речного бассейна строго индивидуальна. Однако наибольшая вероятность сохранения водности характерна для маловодных лет. Она изменяется от 0.49

Таблица 2. Вероятность смены лет одной водности на другую в рядах стока

р. Северная Двина — с. Усть-Пинега			
Водность	1	2	3
1	0.49	0.43	0.35
2	0.24	0.21	0.19
3 ↓	0.27	0.36	0.46
р. Печора — с. Оксина			
Водность	1	2	3
1	0.61	0.33	0.16
2	0.18	0.42	0.25
3 ↓	0.21	0.25	0.59
р. Нева — д. Новосаратовка			
Водность	1	2	3
1	0.69	0.26	0.14
2	0.19	0.24	0.34
3 ↓	0.12	0.50	0.52
р. Кубань — г. Краснодар			
Водность	1	2	3
1	0.51	0.50	0.30
2	0.19	0.14	0.21
3 ↓	0.30	0.35	0.49
р. Дон — станция Раздорская			
Водность	1	2	3
1	0.61	0.54	0.43
2	0.13	0.00	0.09
3 ↓	0.27	0.46	0.49
р. Волга — г. Волгоград			
Водность	1	2	3
1	0.60	0.26	0.30
2	0.11	0.33	0.22
3 ↓	0.29	0.41	0.48
р. Терек — с. Степное			
Водность	1	2	3
1	0.68	0.43	0.19
2	0.16	0.14	0.22
3 ↓	0.16	0.43	0.59

Примечание: 1, 2, 3: по горизонтали — исходный диапазон значений стока; по вертикали — область значений, в которую осуществляется переход.

(Северная Двина) до 0.69 (Нева). Среднее значение вероятности сохранения маловодных лет для всех семи рек составляет 0.60.

Вероятность сохранения многоводных лет также велика. Она изменяется от 0.46 (Северная Двина) до 0.59 (Печора, Терек). Среднее значение вероятности сохранения многоводных лет рассматриваемых рек составляет 0.52.

Вероятность сохранения средних по водности лет для исследуемых рек весьма невелика. Она изменяется от 0 для Дона до 0.42 для Печоры. Среднее значение вероятности сохранения средних по водности лет для всех рек равно 0.21. Вероятность смены маловодных лет на средние по водности изменяется от 0.11 (Волга) до 0.24 (Северная Двина), а смены на многоводные — от 0.12 (Нева) до 0.30 (Кубань). Среднее значение вероятности указанных переходов для всех рек составляет соответственно 0.17 и 0.23. У средних по водности лет вероятность их смены на маловодные годы находится в пределах от 0.26 (Нева, Волга) до 0.54 (Дон), а смены на многоводные — от 0.25 (Печора) до 0.50 (Нева). Среднее значение вероятности перехода стока из этой области в два другие диапазона равны между собой и составляют 0.39.

Вероятность смены многоводных лет на маловодные изменяется от 0.14 (Нева) до 0.43 (Дон). Средняя вероятность смены многоводных лет на маловодные равна 0.27. Вероятность смены лет повышенного стока на средние по водности годы изменяется от 0.09 (Дон) до 0.34 (Нева), составляя в среднем 0.22.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

На значительной части бассейнов исследуемых рек интенсивно развивается хозяйственная деятельность. На р. Кубани у Краснодара использование человеком ее водных ресурсов отчасти обусловило тенденцию к их сокращению (см. рис. 1). Эта тенденция проявилась в том, что во второй половине ряда стока, с 1964 по 2015 г., отмечается большее число и маловодных группировок, и числа лет в них, чем в первую. На вторую половину ряда приходится 7 маловодных группировок: 2 двухлетки, 4 трехлетки и 1 четырехлетка. В эти группировки входит 20 лет. В первую половину ряда, с 1912 по 1963 г., выделяется таких 5 группировок общей длиной 12 лет. На первую и вторую половины ряда приходится одинаковое количество многоводных группировок — по 5. Но в группировки его первой половины входит большее число лет, чем второй. В первую половину ряда отмечались соответственно 3 двухлетки, 1 четырехлетка и 1 шестилетка. Общее число лет в них — 16. Число лет многоводных группировок второй половины

ряда равно 12. Здесь отмечаются 3 двухлетки и 2 трехлетки.

Из табл. 1 видно (три нижние строки), что с увеличением длительности группировок их количество в рядах стока уменьшается. Такой же вывод был сделан и в работах (Андреев и др., 1965; Пространственно-временные ..., 1988; Раткович, 1970). По данным настоящего исследования число маловодных и средних по водности группировок сокращается монотонно.

Общее число группировок и суммарное количество лет в них по каждой реке подчиняются определенной закономерности. Так, везде самое большое количество группировок, как и числа лет в них, приходится на маловодные годы. Везде число многоводных группировок и лет в них меньше, чем маловодных.

В свою очередь количество группировок средних по водности лет меньше, чем многоводных везде, кроме бассейна Печоры, где число группировок многоводных и средних по водности рек оказалось равным. Но у этой реки некоторые группировки многоводных лет значительно длиннее, чем средних по водности. Число лет в многоводных группировках получилось больше, чем в средних по водности, для всех рек.

Таким образом, можно заключить, что у рассматриваемых рек повторяемость маловодных группировок стока превышает повторяемость многоводных. Это противоречит выводу работы (Пространственно-временные ..., 1988) о том, что повторяемость маловодных и многоводных группировок примерно равна.

То, что количество группировок и число лет в них средней водности меньше, чем тех, что находятся в маловодной и многоводной областях в значительной мере обусловлено выбором критериев разделения значений стока по диапазонам. Диапазон средних значений весьма узок и на него приходится меньше членов ряда, чем на два других диапазона.

Отношение числа всех группировок для всех рек соответственно многоводных и маловодных лет составило 0.77, а содержащихся в них лет — 0.76. По отношению общего числа лет всех группировок соответствующей водности всех рек к суммарному числу этих группировок можно оценить средние их длины. Оказалось, что средняя длина маловодной группировки равна 3.12 года, многоводной — 3.08 года, а средней по водности — 2.54 года.

В табл. 3 приводится число группировок маловодных и многоводных лет в рядах стока рек СССР (Пространственно-временные ..., 1988). Арабскими цифрами в верхней строке в ней указаны длины группировок. Под ними, во второй и третьей строках — числа группировок соответ-

Таблица 3. Группировки различной длительности в многолетних рядах стока рек СССР (Пространственно-временные ..., 1988)

Водность	Длина группировки, лет									Итого	
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	I	II
Пониженная	1400	894	377	227	140	72	60	23	12	3205	10276
Повышенная	1432	726	411	242	114	72	46	10	15	3068	9692

Примечание: 2, 3, 4 ... — число лет группировки; I — общее количество группировок; II — число лет в них.

ственно пониженной и повышенной водности каждой из указанных длин. Под цифрой I здесь рассчитаны суммы числа группировок соответственно пониженной и повышенной водности, а цифрой II обозначено число лет в них. Видно, что и в работе (Пространственно-временные ..., 1988), несмотря на сделанное в ней заключение, что повторяемость маловодных и многоводных группировок примерно равна, общее число группировок и суммарное число лет пониженной водности больше, чем повышенной.

Отношение числа группировок и содержащихся в них лет повышенной и пониженной водности составило соответственно 0.957 и 0.943. Эти отношения здесь больше, и ближе к 1, чем те, что получены по результатам наших расчетов. Это может быть объяснено тем, что в работе (Пространственно-временные ..., 1988) не выделялись средние по водности годы. Области повышенных и пониженных значений здесь смежные, и число группировок и лет в этих группировках ближе друг к другу.

По количеству группировок, а также общему числу лет в них можно заключить, что средняя длина группировки повышенной водности составляет 3.16 года, а пониженной — 3.20 года (Пространственно-временные ..., 1988). Эти значения очень близки к тем, что получены в настоящем исследовании, средняя длина группировки маловодных лет несколько больше, чем многоводных. И по результатам наших расчетов, и по тем, что выполнены в (Пространственно-временные ..., 1988), можно заключить, что отношение числа группировок повышенной и пониженной водности несколько больше отношения числа содержащихся в них лет.

Распределение группировок по водности в некоторой мере определяет вероятность перехода стока в другую область его значений, либо его сохранения в той же области. Поэтому, чем больше группировок лет в определенной области значений стока и чем больше лет в них, тем выше вероятность сохранения этого диапазона водности. Для каждой из семи рек вероятность сохранения стоком своего значения в маловодной области выше, чем в многоводной.

В свою очередь, вероятность сохранения стока в области повышенных значений больше, чем в области средних значений.

Вероятность перехода стока из области одних значений в другие может характеризовать инерционные свойства его ряда. У большинства рек вероятность перехода из области низких значений в многоводную область больше, чем в область средних значений. У Терека эти вероятности равны. У Невы вероятность перехода стока из области низких значений в средние выше, чем в высокие. Это может быть объяснено более высокой по сравнению с другими реками инерционностью в колебаниях стока Невы, которая определяется, в том числе, инерционностью уровня воды Ладожского озера, откуда эта река берет свое начало. У Невы самая большая среди рассмотренных рядов стока вероятность перехода из области средних значений в высокие. Здесь преимущественно переход стока из области низких значений к высоким происходит не непосредственно, а через средние значения. Более высокая инерционность колебаний стока Невы также проявилась в самой большой среди рассмотренных рек вероятности перехода стока из многоводного диапазона в область средних значений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что в стоке больших рек европейской части России довольно часто присутствуют группировки лет различной водности: маловодные, средние по водности и многоводные. Их продолжительность чаще всего колеблется от двух до шести лет. Однако у Терека она достигает тринадцати лет (1947–1959 гг.).

Во всех рассмотренных рядах стока число и многоводных группировок, и содержащихся в них лет соответственно меньше, чем у маловодных.

Везде, кроме Печоры (где число группировок многоводных и средних по водности лет равно друг другу) количество многоводных группировок больше, чем средних по водности. У всех рядов число лет многоводных группировок больше, чем средних по водности.

Среднее значение длины маловодной группировки по данным настоящей работы составило 3.12 года, многоводной — 3.08, средней по водности — 2.54. Таким образом, представленные расчеты подтверждают заключение (Раткович, 1970) о том, что в рядах стока средняя длительность маловодных группировок превосходит среднюю длительность многоводных.

Вывод, сделанный в работе (Пространственно-временные ..., 1988), что повторяемость многоводных и маловодных группировок практически одинакова, следует уточнить. По результатам этого исследования при среднем ее равенстве маловодные группировки повторяются несколько чаще многоводных. В настоящей работе превосходство повторяемости маловодных группировок над многоводными более ощутимо, что, весьма вероятно, связано с заданным нами критерием выделения диапазона среднего стока.

Расположение группировок в ряду наблюдений зависит от наличия либо отсутствия многолетних изменений стока. Там, где в стоке реки присутствует тенденция к его понижению, обусловленная его изъятием на хозяйственные нужды либо изменениями климата, во второй половине ряда отмечается больше маловодных группировок с большим числом лет в них, чем в первой его половине. При этом число лет в многоводных группировках больше для первой половины ряда, чем для второй.

Выявлено, что стоку всех рассмотренных рек европейской части России свойственна закономерность продолжения в следующем году водности маловодных лет, наблюдавшейся в текущем году. Вероятность сохранения стоком в следующий год многоводного значения несколько ниже, хотя она также весьма значительна.

Вероятность перехода стока из области одних значений в другие также отражает инерционные закономерности его рядов. В среднем, для всех рассмотренных рек вероятность перехода стока из области повышенных значений в пониженный диапазон, и наоборот, больше, чем соответственно, вероятность перехода и из области высоких значений, и из области низких в средний диапазон. Но там, где сток характеризуется высокой инерцией, как например, у Невы, инерционность которого формируется в значительной мере колебанием уровня воды Ладожского озера, вероятность перехода из многоводной и маловодной области в среднюю выше, чем вероятность перехода из области высоких значений в область низких значений, и наоборот.

В дополнение к причинам появления группировок различной водности рек, установленным в (Болгов и др., 2009) и (Черенкова, Сидорова,

2021), укажем на инерционность колебаний стока как на фактор, влияющий на их формирование. Там, где сток характеризуется значительной инерцией, он не способен от года к году измениться на большую величину, и, увеличиваясь либо уменьшаясь соответственно от низких, либо высоких его значений, может оставаться в градациях той же водности.

Данные о высокой или низкой вероятности перехода стока из области одних значений в другие, как и его сохранения в той же области в последующие годы, могут оказаться полезными при его прогнозировании с соответствующей заблаговременностью. Целесообразно разработать методологию совместного использования предложенной схемы оценки группировок лет различной водности рек и вероятности перехода стока из области одних его значений в другие с технологиями анализа, моделирования и прогнозирования рядов стока, учитывающими их автокорреляцию, скрытые гармоники, а также связь с различными предикторами. Оправданность прогнозов может оказаться выше при учете вероятности его перехода из области одних значений в другие.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Андреянов В.Г., Воскресенский К.П., Глущенко Н.Я., Панова Н.Ф. Исследование повторяемости и продолжительности периодов разной водности на реках СССР // Тр. ГГИ. 1965. Вып. 127. С. 227–276.
- Бабкин В.И., Серков Н.К. Моделирование гидрологических характеристик с использованием цепей Маркова // Метеорология и гидрология. 1974. № 7. С. 55–59.
- Бабкин В.И., Бабкин А.В., Мерзлый О.В., Скорятина Е.Л. Синхронность колебаний годового стока крупнейших рек Азиатской части России // География и природные ресурсы. 2022. № 1. С. 21–27.
- Болгов М.В., Федоров В.М., Исмаилов Г.Х. Оценка условий формирования маловодных периодов в бассейне Волги // Природообустройство. 2009. № 2. С. 79–84.
- Болгов М.В. Оценка гидрологических и водохозяйственных характеристик в условиях неопределенности факторов формирования // Водное хозяйство России. 2016. № 4. С. 6–17.
- Вагер Б.Г., Серков Н.К. Конечные цепи Маркова в метеорологии и гидрологии. СПб.: ГАСУ, 1996. 111 с.
- Водные ресурсы СССР и их использование / ред. В.С. Вуглинский. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 301 с.
- Водные ресурсы России и их использование / ред. И.А. Шикломанов. СПб.: Гос. гидрол. ин-т, 2008. 599 с.

- Воскресенский К.П. Норма и изменчивость годового стока рек Советского Союза. Л.: Гидрометеиздат, 1962. 546 с.
- Картвелишвили Н.А. Теория вероятностных процессов в гидрологии и регулировании речного стока. Л.: Гидрометеорологическое изд-во, 1967. 292 с.
- Картвелишвили Н.А., Корганова Н.С. Современные проблемы стохастической гидрологии // Водные ресурсы. 1972. № 3. С. 147–160.
- Киреева М.Б., Илич В.П., Гончаров А.В., Богачев А.Н., Фролова Н.Л., Пахомова О.М., Соловьева В.В. Влияние маловодья 2007–2015 гг. в бассейне р. Дон на состояние водных экосистем // Вестн. Моск. ун-та. Серия 5. География. 2018. № 5. С. 3–13.
- Крицкий С.Н., Менкель М.Ф. О некоторых приемах статистического анализа гидрологических рядов // Тр. ГГИ. 1968. Вып. 143. С. 110–133.
- Кузин П.С. Циклические колебания стока рек Северного полушария. Л.: Гидрометеиздат, 1979. 178 с.
- Пособие по определению расчетных гидрологических характеристик / ред. А.В. Рождественский, А.Г. Лобанова. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 448 с.
- Пространственно-временные колебания стока рек СССР / ред. А.В. Рождественский. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 306 с.
- Раткович Д.Я. Закономерности чередования маловодных и многоводных лет как основа регулирования речного стока // Тр. ГГИ. 1970. Вып. 180. С. 179–251.
- Раткович Д.Я. Стохастическая модель колебаний речного стока // Водные ресурсы. 1972. № 1. С. 52–94.
- Сванидзе Г.Г. Основы расчета регулирования речного стока методом Монте-Карло. Тбилиси: Мецниереба, 1964. 371 с.
- Черенкова Е.А., Сидорова М.В. Оценка современных условий недостаточного увлажнения, влияющих на маловодность в бассейнах крупных рек Европейской части России // Водные ресурсы. 2021. Т. 48. № 3. С. 260–269.
- Шикломанов И.А., Георгиевский В.Ю., Бабкин В.И., Балонишников Ж.А. Проблемы изучения формирования и оценки изменений водных ресурсов и водообеспеченности России // Метеорология и гидрология. 2010. № 1. С. 23–32.
- Юмина Н.М., Терешина М.А. Многолетние изменения стока рек бассейна Вилуя // Вестн. Моск. ун-та. Серия 5. География. 2017. № 6. С. 62–70.

Groupings and Change of Years with Different Water Abundance in Annual Runoff Series of Large Rivers in the European Russia

V. I. Babkin^{a,*}, A. V. Babkin^a, O. V. Merslyi^a, and E. L. Skoriatina^a

^aState Hydrological Institute, St. Petersburg, Russia

*e-mail: vladimir-babkin@mail.ru

Long-term annual runoff series of major rivers in the European part of Russia—the Northern Dvina, Pechora, Neva, Kuban, Don, Volga, and Terek rivers—were analyzed to identify groupings of low-water, average-water, and high-water years and to estimate the transition probabilities between these water abundance categories. The data series cover the period from the start of observations to 2015. The longest continuous record is that of the Neva River, beginning in 1859. The shortest series are those of the Pechora and Terek rivers, starting in 1925. Years with runoff exceeding the series mean by more than 5% were classified as high-water years. If the runoff was more than 5% below the mean, the year was considered low-water. Years where the runoff deviated from the mean by less than 5% (either above or below) were regarded as average-water years. A grouping within a series is defined as a continuous sequence of years belonging to the same water abundance category. The transition probability from one water abundance category to another was estimated as the ratio of the number of such transitions to the total number of years spent in the originating category. It was found that low-water spells on individual rivers last from 2 to 13 years, while high-water spells range from 2 to 10 years. For individual years, it is most likely that the same water content will continue in subsequent years.

Keywords: large rivers, European Russia, time series, water abundance categories, period duration, transition between runoff ranges

REFERENCES

- Andreyanov V.G., Voskresenskii K.P., Glushchenko N.Ya., Panova N.F. Investigation of the recurrence and duration of periods of different water content in the rivers of the USSR. *Tr. GGI*, 1965, vol. 127, pp. 227–276. (In Russ.).
- Babkin V.I., Serkov N.K. Modeling of hydrological characteristics using Markov chains. *Meteorol. Gidrol.*, 1974, no. 7, pp. 55–59. (In Russ.).

- Babkin V.I., Babkin A.V., Merzlyy O.V., Skoryatina E.L. Synchronism of variations in the annual runoff of major rivers in the Asian Part of Russia. *Geogr. Nat. Resour.*, 2022, no. 1, pp. 14–20.
- Bolgov M.V. Assessment of hydrological and water management characteristics in conditions of uncertainty of formation factors. *Vodn. Khoz. Ross.*, 2016, no. 4, pp. 6–17. (In Russ.).
- Bolgov M.V., Fedorov V.M., Ismailov G.Kh. Assessment of conditions for the formation of low-water periods in the Volga basin. *Prirodoobustr.*, 2009, no. 2, pp. 79–84. (In Russ.).
- Cherenkova E.A., Sidorova M.V. On the impact of insufficient atmospheric moistening on the low annual discharge of large rivers in European Russia. *Water Resour.*, 2021, vol. 48, no. 3, pp. 351–360.
- Kartvelishvili N.A. *Teoriya veroyatnostnykh protsessov v gidrologii i regulirovani rechnogo stoka* [Theory of Probabilistic Processes in Hydrology and Regulation of River Flow]. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1967. 292 p. (In Russ.).
- Kartvelishvili N.A., Korganova N.S. Modern problems of stochastic hydrology. *Vodn. Resur.*, 1972, no. 3, pp. 147–160. (In Russ.).
- Kireeva M.B., Ilich V.P., Goncharov A.V., Bogachev A.N., Frolova N.L., Pakhomova O.M., Solovieva V.V. Influence of 2007–2015 extreme low flow period in the Don River Basin on water ecosystems. *Vestn. Mosk. Univ., Ser. 5: Geogr.*, 2018, no. 5, pp. 3–13. (In Russ.).
- Kritskii S.N., Menkel' M.F. On some ways of statistical analysis of hydrological series. *Tr. GGI*, 1968, vol. 143, pp. 110–133. (In Russ.).
- Kuzin P.S. *Tsiklicheskie kolebaniya stoka rek Severnogo polushariya* [Cyclical Fluctuations in the Flow of Rivers in the Northern Hemisphere]. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1979. 178 p.
- Posobie po opredeleniyu raschetnykh gidrologicheskikh kharakteristik* [A Manual to the Determination of Calculated Hydrological Characteristics]. Rozhdestvenskii A.V., Lobanova A.G., Eds. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1984. 448 p.
- Prostranstvenno-vremennye kolebaniya stoka rek SSSR* [Spatially Temporal Fluctuations in the Runoff of Rivers of the USSR]. Rozhdestvenskii A.V., Ed. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1988. 306 p.
- Ratkovich D.Ya. Regularities of alternating low-water and high-water years as the basis of regulating of river flow. *Tr. GGI*, 1970, vol.180, pp. 179–251. (In Russ.).
- Ratkovich D.Ya. Stochastic model of river flow fluctuations. *Vodn. Resur.*, 1972, no. 1, pp. 52–94. (In Russ.).
- Shiklomanov I.A., Georgievskii V.Yu., Babkin V.I., Balonishnikova Zh.A. Research problems of formation and estimation of water resources and water availability changes of the Russian Federation. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2010, no. 1. pp. 13–19.
- Svanidze G.G. *Osnovy rascheta regulirovaniya rechnogo stoka metodom Monte-Karlo* [Bases of Calculation of Regulation of River Runoff by the Monte Carlo Method]. Tbilisi: Metsniereba Publ., 1964. 371 p.
- Vager B.G., Serkov N.K. *Konechnye tsepi Markova v meteorologii i gidrologii* [Finite Markov Chains in Meteorology and Hydrology]. St. Petersburg: GASU Publ., 1996. 111 p.
- Vodnye resursy SSSR i ikh ispol'zovanie* [Water Resources of the USSR and Their Use]. Vuglinskii V.S., Ed. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1987. 301 p.
- Vodnye resursy Rossii i ikh ispol'zovanie* [Water Resources of the Russia and Their Use]. Shiklomanov I.A., Ed. St. Petersburg.: Gos. Hidrol. Inst., 2008. 599 p.
- Vokresenskii K.P. *Norma i izmenchivost' godovogo stoka rek Sovetskogo Soyuza* [The Norm and the Variability of Annual Flow of Rivers of the Soviet Union]. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1962. 546 p.
- Yumina N.M., Tereshina M.A. Estimating long-term changes of river runoff in the Vilyuy River Basin. *Vestn. Mosk. Univ., Ser. 5: Geogr.*, 2017, no. 6, pp. 62–70. (In Russ.).