

05.23.16 Гидравлика и инженерная гидрология

Оригинальная статья

УДК 502/504: 551.585

DOI: 10.26897/1997-6011-2022-2-69-78

АНАЛИЗ И ПРОГНОЗ РЕЧНЫХ ВОД В ЗОНЕ ФОРМИРОВАНИЯ СТОКА РЕКИ ВОЛГИ МЕТОДОМ ТЕНДЕНЦИЙ

ИСМАЙБЛОВА ИРИНА ГАБИЛОВНА, заведующий лабораторией
igism37@mail.ru

ИСМАЙБЛОВ ГАБИЛ ХУДУШ ОГЛЫ[✉], д-р техн. наук, профессор
gabil-1937@mail.ru

РАТКОВИЧ ЛЕВ ДАНИЛОВИЧ[✉], д-р техн. наук, профессор
levkivr@mail.ru

МУРАЩЕНКОВА НАТАЛЬЯ ВЛАДИМИРОВНА, канд. техн. наук, доцент
splain75@mail.ru

ПЕРМИНОВ АЛЕКСЕЙ ВАСИЛЬЕВИЧ, канд. техн. наук, доцент
alexperminov@gmail.com

Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 125434, г. Москва,
ул. Прянишникова 19, корп. 28, Россия

Излагаются результаты исследования по анализу, обобщению и прогнозу изменений среднемноголетней величины годовых и сезонных объемов (расходов) р. Волги до г. Волгограда (зоны формирования). Для прогноза используются временные стоковые ряды за периоды 1881/1882-2020/2021 гг., N-140 лет и 1914/1915/2020/2021 гг., N-107 лет. Эти периоды приняты как базисные, характеризующие формирование стока р. Волги до г. Волгограда. Выявлено, что многолетние колебания стока р. Волги содержат три периода в первом ряду, два периода во втором ряду, существенно различающиеся среднемноголетними величинами. Установлено, что рассматриваемым периодам свойственно наряду со статистическими среднемноголетними величинами и динамические, являющиеся функциями во времени. Также выявлены разнонаправленные тренды в рассматриваемых стоковых временных рядах. Получены функциональные уравнения для выявленных трендов этих периодов. Таким образом, наличие циклов и трендов в многолетних колебаниях годовых и сезонных величин притока речных вод, а также функциональных уравнений служат научной основой их прогнозирования на определенные периоды в будущем, в том числе на первую половину XXI в. Анализ на основе достаточно длительных временных рядов реки Волги до г. Волгограда показывает, что в видимой перспективе существует большая вероятность проявления различной интенсивности годового и сезонного стока по причине свойственных ему циклических колебаний. Подтверждением этого, в частности, служит выявление изменения характера тренда ежегодных колебаний величин стока р. Волги до г. Волгограда.

Ключевые слова: тренд, тенденция, среднемноголетние значения стока, норма, линейные и нелинейные связи, прогнозирование, функциональное уравнение, многолетние колебания стока, расчетные периоды, статистические и динамические нормы речного стока

Формат цитирования: Исмайлова И.Г., Исмайлов Г.Х., Раткович Л.Д., Муращенко Н.В., Перминов А.В. Анализ и прогноз речных вод в зоне формирования стока реки Волги методом тенденций // Природообустройство. – 2022. – № 2. – С. 69-78. DOI: 10.26897/1997-6011-2022-2-69-78.

© Исмайлова И.Г., Исмайлов Г.Х., Раткович Л.Д., Муращенко Н.В., Перминов А.В., 2022

Original article

ANALYSIS AND FORECAST OF RIVER WATERS IN THE VOLGA RIVER RUNOFF FORMATION ZONE BY THE TRENDS METHOD

ISMAILOVA IRINA GABILOVNA, head of the laboratory

igism37@mail.ru

ISMAIYLOV GABIL KHUDUSH OGLY[✉], doctor of technical sciences, professor

gabil-1937@mail.ru

RATKOVICH LEV DANILOVICH[✉], doctor of technical sciences, professor

levkivr@mail.ru

MURASHCHENKOVA NATALIA VLADIMIROVNA, candidate of technical sciences, associate professor

splain75@mail.ru

PERMINOV ALEXEY VASILYEVICH, candidate of technical sciences, associate professor

alexperminov@gmail.com

Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy named after C.A. Timiryazev; 125434, Moscow, Pryanishnikova 19, bldg.28. Russia

The results of the study on the analysis, generalization and forecast of changes in the average annual and seasonal volumes (flows) of the Volga River to Volgograd (the formation zone) are presented. For the forecast, time flow series are used for the periods 1881/1882-2020/2021, N-140 years and 1914/1915/2020/2021, N-107 years. These periods are accepted as the basic periods characterizing the formation of the Volga River flow to Volgograd. It is revealed that the long-term fluctuations of the Volga River flow contain three periods, the first series, two periods, the second series, significantly differing in average annual values. It is established that these periods under consideration are characterized, along with statistical long-term averages, by dynamic ones, which are functions in time. Also, the multidirectional trend (trends) in the considered flow time series are revealed. Functional equations for the identified trends for these periods are obtained. Thus, the presence of cycles and trends, in the long-term fluctuations of annual and seasonal values of river water inflow, as well as functional equations serve as the scientific basis for their prediction for certain periods of time in the future, including the first half of the XXI century. The analysis based on sufficiently long time series of the river Volga to Volgograd shows that in the future there is a high probability of manifestation of different intensity of annual and seasonal flow due to its characteristic cyclical fluctuations. Confirmation of this, in particular, is the identification of changes in the nature of the trend of annual fluctuations in the flow of the Volga River in Volgograd.

Keywords: trend, tendency, average long-term flow value, norm, linear and nonlinear relationships, forecasting, functional equation, long-term flow fluctuations, calculation periods, statistical and dynamic norms of river flow

Format of citation: Ismajylova I.G., Ismajylov G.H., Ratkovich L.D., Murashchenkova N.V., Perminov A.V. Analysis and forecast of River waters in the Volga River Flow Formation Zone by the Trend Method // Prirodoobustrojstvo. – 2022. – No. 2. – S. 69-78. DOI: 10.26897/1997-6011-2022-2-69-78.

Введение. С развитием экономики и, в частности, водного хозяйства страны гидрологический прогноз получает все более широкое распространение. Под гидрологическим прогнозом подразумевается разработка методов и способов, позволяющих заблаговременно определить возможные изменения гидрологических процессов и явлений, которые происходят в реках, озерах и других водных объектах, на основе гидрометеорологических наблюдений.

Формальное определение прогноза в теории случайных процессов таково: под прогнозом понимается условное (зависящее от времени и начальных условий) среднее статистических значений (математическое ожидание) процессов в момент времени $t + \Delta t$, где Δt – время упреждения

прогноза. Дается также и возможная ошибка прогноза с принятой доверительной вероятностью.

Заблаговременные и достоверные прогнозы гидрологических режимов рек являются одним из важнейших направлений современных гидрологических наук. Это объясняется тем, что обоснованные предсказания гидрологических режимов рек являются основой для рационального функционирования многих секторов экономики включая социальные и экологические среды.

В настоящее время результаты гидрологического прогноза широко используются для планирования систем промышленного и бытового водоснабжения и орошения, работы гидроэлектрических станций, судоходства, а также обводнения территории, особенно в маловодные годы. Кроме

того, гидрологические прогнозы необходимы для предупреждения об опасных гидрологических явлениях – в частности, для предупреждения о прохождении паводков, о наводнениях и т.п. При этом необходимо отметить, что прогнозирование гидрологических процессов во многом определяется двумя факторами: во-первых, уровнем развития экономики страны; во-вторых, развитием смежных дисциплин гидрометеорологического цикла. Необходимо отметить, что с увеличением длительности временных гидрологических рядов создаются предпосылки выявления основных закономерностей развития гидрологических процессов, что обуславливается получением более надежных и обоснованных прогнозов о будущих режимах притока речных вод в основных гидроузлах водохозяйственных систем страны. Соответственно возрастает интерес к исследованиям и прогнозам основных элементов годовых и сезонных водных режимов рек, сток которых зарегулирован гидроузлами с водохранилищ.

Методам прогнозов весеннего половодья и летне-осеннего и зимнего водного режима равнинных рек посвящено множество источников литературы [2, 3, 5, 7, 9]. По содержанию эти работы в основном посвящены краткосрочным прогнозам уровня (расхода) воды. В статье в отличие от прежних работ изложены методы долгосрочного прогноза элементов водного режима р. Волги применительно к условиям регулирования стока каскадом Волжско-Камского каскада водохранилищ. Рассматриваются основные особенности развития формирования притока годового и сезонного стока р. Волги у г. Волгограда (приток к Волгоградскому гидроузлу) за достаточно длительный период: 1881/1882-2020/2021 гг. При использовании выявленных особенностей в многолетних колебаниях р. Волги у г. Волгограда осуществлен долгосрочный прогноз изменений среднесезонных объемов (расходов) притока речных вод к Волгоградскому гидроузлу на уровне 2030 и 2050 гг.

Материалы и методы исследований.

Для анализа и оценки особенности развития гидрологических процессов в бассейне р. Волги были использованы многолетние данные о колебаниях притока речных вод к Волжско-Камскому каскаду водохранилищ у г. Волгограда – приток к Волгоградскому гидроузлу. Статистическому анализу подвержены два временных гидрологических ряда разной длительности. Первый ряд охватывает период 1881/1882-2020/2021 гг., второй – период 1914/1915-2020/2021 гг., причем первый ряд имеет две версии: фактическая (наблюденная) и условно естественная (данные института «Гидропроект»). Для периода 1881/1882-1933/1934 гг. объемы годового стока для обеих версий

совпадают, а для периода 1934/1935-2020/2021 гг. объемы годового стока первой версии отражают интегральное влияние антропогенных факторов на формирование годового стока р. Волги.

Предположим, что исследуется временной гидрологический ряд, выраженный либо расходом воды (Q_i), либо объемом воды (W_i). Для прогнозирования объема (расхода) притока речных вод к гидроузлам производятся анализ и оценка наличия тенденции (тренда), свойственной динамическому гидрологическому ряду W_1, W_2, \dots, W_N , где N – количество расчетных временных отрезков в данном ряду (годы). Назовем величины W_i (Q_i) уровнем гидрологического ряда в момент времени t , а закон эволюции уровня гидрологического процесса во времени – трендом. Тренд может быть выражен как детерминированными, так и случайными функциями либо их комбинациями. Стохастические тренды имеют, например, формирования речного стока со случайным уровнем.

Уравнение детерминированного квадратичного тренда имеет следующий вид:

$$W(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2. \quad (1)$$

Уравнение тренда случайного процесса –

$$W(t) = W(t-1) + u_t = W_0 + \sum_{i=1}^t u_i. \quad (2)$$

Уравнение тренда смешанного типа –

$$W(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + u_t = m(t) + u_t, \quad (3)$$

где a_0, a_1, a_2 – постоянные коэффициенты; $u(t)$ – случайная функция; W_0 – некоторое начальное значение; $m(t)$ – детерминированная функция.

Результаты многолетних исследований в области гидрологии показывают, что речной сток как динамико-стохастический процесс может быть представлен регрессионным уравнением [1, 4]:

$$K_{i+1}(K_i) = \bar{K}_{(i+1)} + r \frac{\sigma_{K(i+1)}}{\sigma_{K_i}} (K_i - \bar{K}_i) + \Phi_{i+1} C_v \sqrt{1-r^2} \quad (4)$$

где K_{i+1}, \bar{K}_i – среднесезонные значения коэффициента стока для $(i+1)$ -го и i -го гг.; $K_{i+1}(K_i)$ – условное значение K_{i+1} при заданном K_i ; $\sigma_{K(i+1)}$ и σ_{K_i} – среднеквадратичные отклонения годовых объемов речного стока.

В уравнении (4) первые два слагаемых выражают детерминированную часть формирования годового речного стока, последнее слагаемое – случайная часть этого процесса. Таким образом, уравнение (4) свидетельствует о том, что формированию среднесезонных годовых объемов (расходов) речного стока свойственна

тенденция, являющаяся функцией времени, которая может служить основанием для долгосрочного прогнозирования (на несколько лет вперед). Следовательно, при данной постановке для прогнозирования среднесезонных годовых объемов речного стока (норма стока) можно использовать метод тенденций.

Метод тенденций – это метод прогноза речного стока путем экстраполяции его уравнения связи. Вместе с тем известно, что экстраполяция любой кривой может быть произведена несколькими способами, которые отличаются друг от друга исходными предпосылками и точностью. Все существующие способы экстраполяции делятся на две группы: линейные и нелинейные.

Способ линейного экстраполяции основан на предположении постоянства градиента рассматриваемого процесса во времени. В отличие от этого способа нелинейное экстраполяция основано на предположении о непостоянстве градиента рассматриваемого процесса во времени. Экстраполяция среднесезонного годового объема речного стока как в первом, так и во втором случаях, производится аналитическим уравнением рассматриваемого процесса. Практически применение этого способа выполняется следующим образом.

Предположим, имеется отрезок графика изменения среднесезонного значения годовых объемов речного стока (рис. 1) за период от t_0 до t (период наблюдения), причем t – начало экстраполяции (прогноза). Требуется дать прогноз среднесезонного объема годового стока в момент $t + \tau_2$, то есть заблаговременностью τ_2 . Обозначим приращение среднесезонного годового объема речного стока в период от t до $t + \tau_2$ через ΔW_{τ_2} , а приращение t_0 до t – через ΔW_{τ_1} . Тогда

$$W_{\tau_2} = W_t + \Delta W_{\tau_2} \text{ или } W_{\tau_2} = W_{\tau_1} + \Delta W_{\tau}, \quad (5)$$

где W_{τ_2} – среднесезонный объем годового речного стока в момент $t + \tau_2$, то есть прогноз среднесезонного объема годового речного стока с заблаговременностью τ_2 ; W_t – среднесезонный объем годового речного стока в момент t (начало периода, который осуществляет прогноз); W_{τ_1} – среднесезонный объем годового речного стока в момент t_0 (начало периода наблюдений); $\Delta W_{\tau} = \Delta W_{\tau_1} + \Delta W_{\tau_2}$ – суммарные изменения среднесезонного объема годового речного стока от момента $t - \tau_1$ до момента $t + \tau_2$.

Результаты и их обсуждение. Анализ динамики многолетних колебаний не зарегулированного притока речных вод р. Волги у г. Волгограда (рис. 1) показывает, насколько разное сочетание климатических и не климатических факторов, в том числе антропогенные, определяет многообразие реакции речных водосборов на выпадающие осадки. Современная гидрологическая наука не располагает возможностью

календарного предвидения изменения речного стока на ближайшие годы. Поэтому такие методы, как метод тенденций, позволяют экстраполировать выявленные тенденции на многолетнем колебании годовых и сезонных значений стока на ближайшие годы.

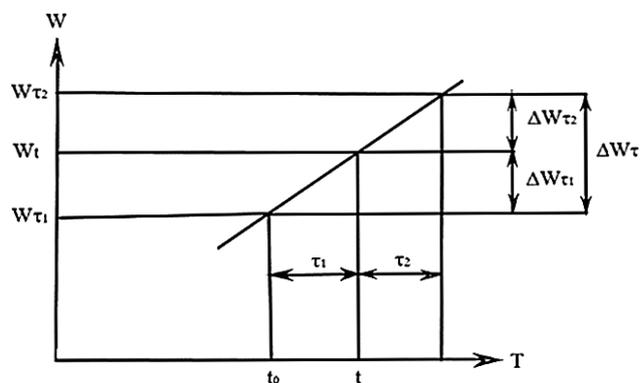


Рис. 1. Линейные изменения нормы стока во времени

Fig. 1. Linear changes of the flow rate in time

Анализ графиков, приведенных на рисунке 1, показывает, что многолетние колебания речного стока и определяющие его климатические факторы относятся к разряду сложных природных процессов. Как следует из рисунка, для периода 1914/1915-2020/2021 гг. выделяются два периода: маловодный период 1914/1915-1975/1976 гг. и многоводный 1976/1977-2020/2021 гг. (рис. 1 а, б). Для периода 1881/1882-2020/2021 гг. выделяются три периода: многоводный 1881/1882-1929/1930 гг.; маловодный 1930/1931-1975/1976 гг.; многоводный 1976/1977-2020/2021 гг. (рис. 1 в).

Статистические параметры годового и сезонного стока р. Волги у г. Волгограда для этих периодов различаются (табл. 1). Как следует из таблицы, среднесезонный объем годового и межсезонного стока (норма) варьируется в зависимости от продолжительности расчетного периода в пределах соответственно 228-272 км³/год и 85-119 км³/год, для периода половодья изменение является незначительным. Аналогично и другие статистические параметры изменяются в небольшом диапазоне.

Таким образом, анализ динамики гидрологических процессов в бассейне р. Волги показывает, что в XX и начале XXI вв. формирование объема (расхода) годового и сезонного стока не только свойственна стохастическая составляющая. Они обладают и детерминированной составляющей в виде тренда, что подтверждается графиками, приведенными на рисунках 2 и 3. Как следует из графиков, многолетним колебаниям объема годового и сезонного стока свойственны разнонаправленные (положительные и отрицательные) тренды.

Статистические параметры годового и сезонного стока р. Волги в зоне формирования у г. Волгограда

Table 1

Statistical parameters of the annual and seasonal flow of the Volga River in the zone of formation near the city of Volgograd

Период наблюдений <i>Period of observations</i>	Кол-во лет наблюдений <i>Number of years of observations</i>	Средний годовой сток, W_{cp} км ³ /год <i>Average annual unoff, W_{av} km³/year</i>	Среднеквадратическое отклонение $\sigma_{W_{cp}}$, км ³ <i>Standard deviation $\sigma_{W_{cp}}$, km³</i>	Коэффициент вариации C_v <i>Coefficient of variation C_v</i>	Коэффициент асимметрии $C_s = 2C_v$ <i>Coefficient of asymmetry $C_s = 2C_v$</i>	Коэффициент автокорреляции, r [1] <i>Coefficient of autocorrelation, r [1]</i>
Статистические параметры годового и сезонного стока р. Волги в зоне формирования у г. Волгограда за период 1914/1915-2020/2021 гг. <i>Statistical parameters of the annual and seasonal flow of the Volga River in the zone of formation near the city of Volgograd for the period of 1914/1915-2020/2021 years</i>						
Год / Year						
1914/1915-2020/2021	107	248	45	0,18	0,36	0,48
1914/1915-1975/1976	62	233	45	0,19	0,38	0,41
1976/1977-2020/2021	45	269	37	0,14	0,28	0,24
Межень / Low water						
1914/1915-2020/2021	107	99	28	0,28	0,56	0,40
1914/1915-1975/1976	62	85	21	0,25	0,50	0,25
1976/1977-2020/2021	45	119	24	0,21	0,42	-0,16
Половодье / High water						
1914/1915-2020/2021	107	149	30	0,20	0,40	0,18
1914/1915-1975/1976	62	148	33	0,22	0,44	0,14
1976/1977-2020/2021	45	150	25	0,17	0,34	0,14
Статистические параметры годового и сезонного стока р. Волги в зоне формирования у г. Волгограда за период 1881/1882-2020/2021 гг. <i>Statistical parameters of the annual and seasonal flow of the Volga River in the zone of formation near the city of Volgograd for the period of 1881/1882-2020/2021 years</i>						
Условно-естественный / Conditionally natural						
1881/1882-2020/2021	140	257	43	0,17	0,34	0,40
1881/1882-1929/1930	49	259	45	0,17	0,34	0,36
1930/1931-1975/1976	46	242	40	0,16	0,32	0,39
1976/1977-2020/2021	45	272	38	0,14	0,28	0,25
Наблюденный / Observed						
1881/1882-2020/2021	140	250	42	0,17	0,34	0,38
1881/1882-1929/1930	49	259	45	0,17	0,34	0,36
1930/1931-1975/1976	46	228	35	0,15	0,30	0,20
1976/1977-2020/2021	45	263	36	0,14	0,28	0,18

Используя имеющиеся в нашем распоряжении достаточно длительные ряды наблюдений формирования объема годового и сезонного стоков р. Волги у г. Волгограда (1881/1882-2020/2021 гг., $N_1 = 140$ лет и 1914/1915/2020/2021 гг., $N_2 = 107$ лет), получили функциональные уравнения тренда для рассмотренных нами расчетных периодов.

Уравнение тренда условно-естественного объема годового стока р. Волги в зоне формирования у г. Волгограда (км³/год):

$$W_{cp}(t) = 0,1429t + 247 \quad (6)$$

за период 1881/1882 – 2020/2021 гг.;

$$W_{cp}(t) = 0,6545t + 243 \quad (7)$$

за период 1881/1882 – 1929/1930 гг.;

$$W_{cp}(t) = 0,7405t + 224 \quad (8)$$

за период 1930/1931 – 1975/1976 гг.;

$$W_{cp}(t) = -0,6718t + 287 \quad (9)$$

за период 1976/1977 – 2020/2021 гг.

Уравнение тренда наблюдаемого (фактического) объема годового стока р. Волги в зоне формирования у г. Волгограда (км³/год):

$$W_{cp}(t) = 0,059t + 246 \quad (10)$$

за период 1881/1882 – 2020/2021 гг.;

$$W_{cp}(t) = 0,6545t + 243 \quad (11)$$

за период 1881/1882 – 1929/1930 гг.;

$$W_{cp}(t) = 0,2075t + 223 \quad (12)$$

за период 1930/1931 – 1975/1976 гг.;

$$W_{cp}(t) = 0,1403t + 259 \quad (13)$$

за период 1976/1977 – 2020/2021 гг.

Уравнение тренда объема годового и сезонного стока р. Волги в зоне формирования у г. Волгограда за период 1914/1915-2020/2021 гг. с подразделением на два подпериода:

Уравнение за год в целом, млн м³/год:

$$W_{cp}(t) = 384,28t + 227438 \quad (14)$$

за период 1914/1915 – 2020/2021 гг.;

$$W_{cp}(t) = -367,49t + 244916 \quad (15)$$

за период 1914/1915 – 1975/1976 гг.;

$$W_{cp}(t) = -359,82t + 276924 \quad (16)$$

за период 1976/1977 – 2020/2021 гг.

Уравнение межени, млн м³/год:

$$W_{cp}(t) = 443,27t + 75398 \quad (17)$$

за период 1914/1915 – 2020/2021 гг.;

$$W_{cp}(t) = -163,76t + 90153 \quad (18)$$

за период 1914/1915 – 1975/1976 гг.;

$$W_{cp}(t) = 122,86t + 116266 \quad (19)$$

за период 1976/1977 – 2020/2021 гг.

Уравнение половодья, млн м³/год:

$$W_{cp}(t) = -58,987t + 152040 \quad (20)$$

за период 1914/1915 – 2020/2021 гг.;

$$W_{cp}(t) = -203,73t + 154764 \quad (21)$$

за период 1914/1915 – 1975/1976 гг.;

$$W_{cp}(t) = -482,68t + 160658 \quad (22)$$

за период 1976/1977 – 2020/2021 гг.

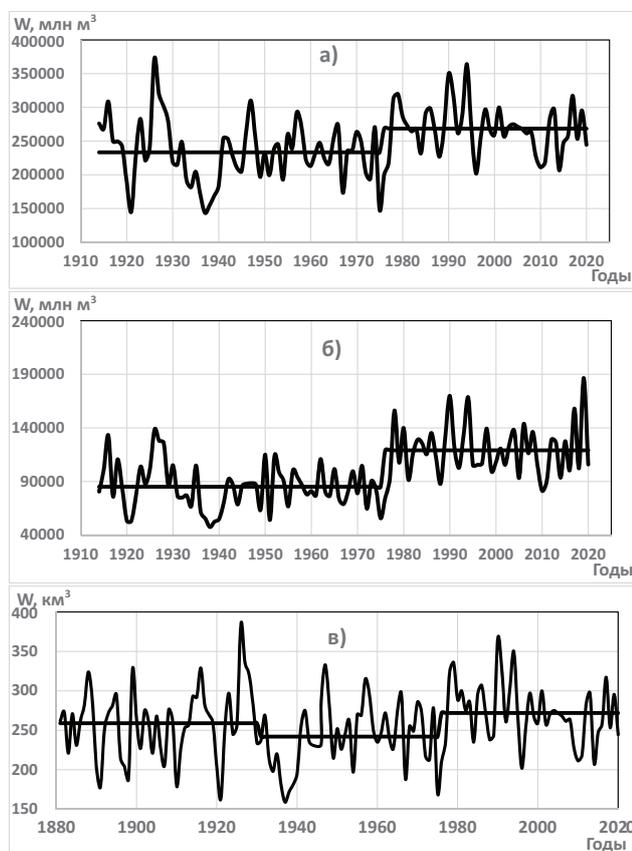


Рис. 1. График изменения стока р. Волги за многолетний период:

- а) годового объема стока за 1914/1915-2020/2021 гг. с выделением двух периодов: 1914/1915-1975/1976 и 1976/1977-2020/2021 гг.;
- б) меженного объема стока за тот же период;
- в) годового объема стока за период 1881/1882-2020/2021 гг.

Fig. 1. Schedule of flow changes of the Volga River for a long-term period: annual flow volume for 1914/1915-2020/2021 years; а) low water flow volume for the same period; б) annual flow volume for the period of 1881/1882-2020/2021 years

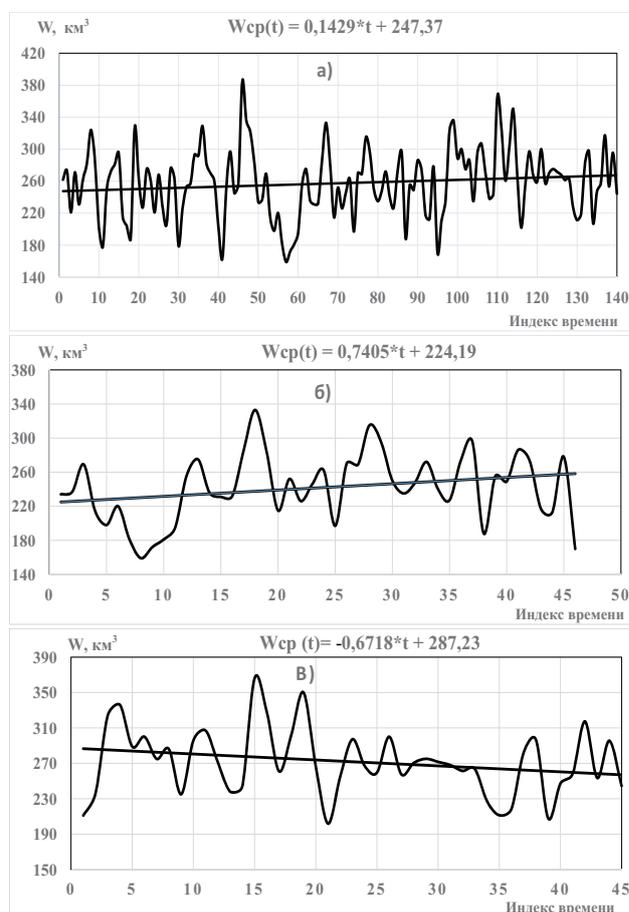


Рис. 2. Условно-естественный объем годового стока р. Волги в зоны формирования (до г. Волгограда):

- а) за период 1881/1882-2020/2021 гг.;
- б) за период 1930/1931-1975/1976 гг.;
- в) за период 1976/1977-2020/2021 гг.

Fig. 2. Conditionally natural volume of annual flow of the Volga River in the zone of formation (up to Volgograd): а) for the period 1881/1882-2020/2021; б) for the period 1930/1931-1975/1976; в) for the period 1976/1977-2020/2021

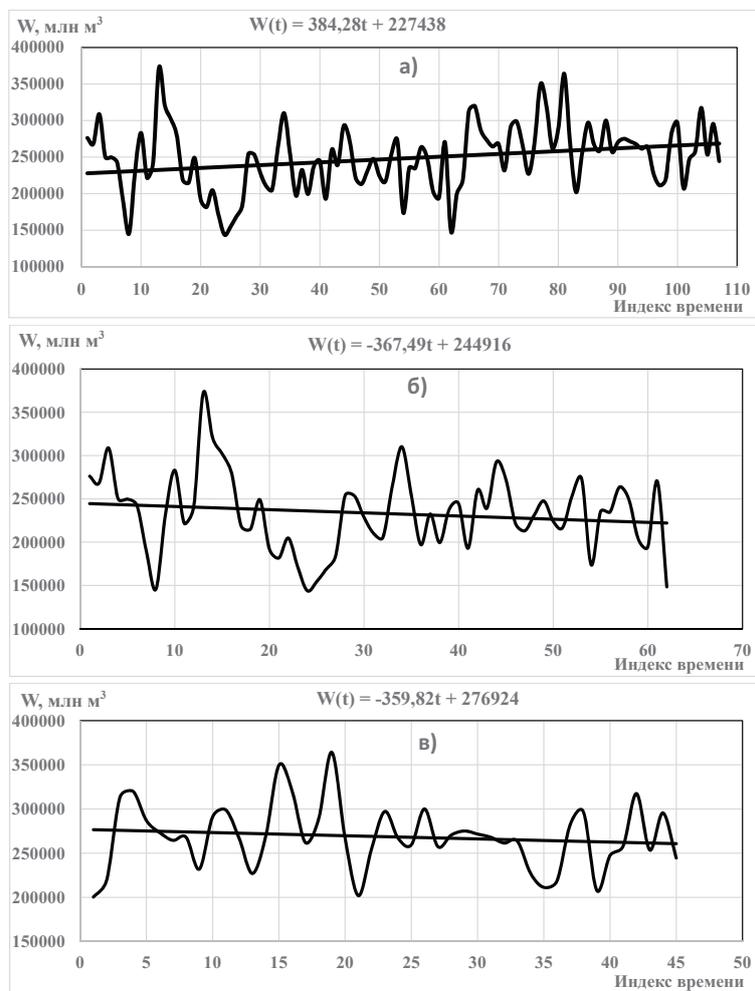


Рис. 3. Многолетние колебания годового объема р. Волги в зоне формирования (г. Волгоград) и линейный тренд:

- а) за период 1914/1915-2020/2021 гг.; б) за период 1914/1915-1975/1976 гг.;
в) за период 1976/1977-2020/2021 гг.

Fig. 3. Long-term fluctuations in the annual volume of the Volga River in the formation zone (Volgograd) and linear trend:

- a) for the period 1914/1915-2020/2021; b) for the period 1914/1915-1975/1976;
c) for the period 1976/1977-2020/2021

Полученные линейные уравнения (6)-(22) позволяют прежде всего оценить, как изменяется динамический среднегодовой и сезонный объем годового и сезонного стоков $W_{cp}(t)$ за рассматриваемые расчетные периоды. Так, для условно-естественной версии (период 1881/1882-2020/2021 гг.) динамическая среднеголетняя величина стока составляет $267 \text{ км}^3/\text{год}$, уравнение (6); статистическая среднеголетняя величина стока – $257 \text{ км}^3/\text{год}$ (табл. 1). Следовательно, изменение составляет $10 \text{ км}^3/\text{год}$. Для периода 1881/1882-1929/1930 гг. это $16 \text{ км}^3/\text{год}$; для периода 1930/1931-1975/1976 гг. – $16 \text{ км}^3/\text{год}$ и для периода 1976/1977-2020/2021 гг. – $15 \text{ км}^3/\text{год}$.

Из условий становится очевидным, что речной сток не только характеризуется

статистическим среднегодовым значением объема (расхода), но ему свойствен динамический среднегодовой объем (расход) воды, который является функцией во времени. Соответственно выявленные однонаправленные тенденции (тренды) в многолетнем колебании речного стока, характерные для отдельных временных отрезков, и их функциональные уравнения (6)-(22) могут выступать основанием для предвидения изменения среднегодовых величин (норма) речного стока во времени.

В таблицах 2, 3 приведена оценка возможного изменения среднегодовых величин годового и сезонного стоков р. Волги до г. Волгограда для $\tau = 10$ лет (уровень 2030 г.) и $\tau = 30$ лет (уровень – 2050 год). В качестве базового уровня приняты 2020 г., базовый период 1881/1882-2020/2021 гг. и 1914/1915-2020/2021 гг.

Таблица 2

Прогноз изменения среднемноголетнего объема годового стока р. Волги в зоне формирования у г. Волгограда по выявленным тенденциям периода 1881/1882-2020/2021 гг.

Table 2

Forecast of changes in the average long-term volume of annual runoff of the Volga River in the zone of formation near the city of Volgograd according to the identified trends of the period 1881/1882-2020/2021 years

№ п/п	Версия и периоды <i>Version and periods</i>	W_{cp} периода, $km^3/год$ W_{av} of the period, $km^3/year$	Прогнозы, W_{cp} периода, $km^3/год$ <i>Forecasts, W_{av} of the period, $km^3/year$</i>		Приращение, $km^3/год$ (в %) <i>Increment, $km^3/year$ (in %)</i>	
			Уровень 2030 г. <i>Level of 2030</i>	Уровень 2050 г. <i>Level of 2050</i>	Уровень 2030 г. <i>Level of 2030</i>	Уровень 2050 г. <i>Level of 2050</i>
1	Условно-естественный сток / Conditionally natural flow					
1.1	1881/1882-2020/2021 n=140 лет	257	269	272	12 (5)	15 (6)
1.2	1881/1882-1929/1930 n=49 лет	259	281	295	22 (8)	36 (14)
1.3	1930/1931-1975/1976 n=46 лет	242	266	281	24 (10)	39 (16)
1.4	1976/1977-2020/2021 n=45 лет	272	250	237	-22 (8)	-35 (13)
2	Наблюдаемый сток / Observed flow					
2.1	1881/1882-2020/2021 n=140 лет	250	255	256	5 (2)	6 (2)
2.2	1881/1882-1929/1930 n=49 лет	259	281	295	22 (8)	36 (14)
2.3	1930/1931-1975/1976 n=46 лет	228	234	239	6 (3)	11 (5)
2.4	1976/1977-2020/2021 n=45 лет	263	267	270	4 (2)	7 (3)

Таблица 3

Прогноз изменения среднемноголетнего объема годового и сезонного стока р. Волги в зоне формирования у г. Волгограда по выявленным тенденциям периода 1914/1915-2020/2021 гг.

Table 3

Forecast of changes in the average long-term volume of annual runoff of the Volga River in the zone of formation near the city of Volgograd according to the identified trends of the period 1914/1915-2020/2021 years

№ п/п	Версия и периоды <i>Version and periods</i>	W_{cp} периода, $km^3/год$ W_{av} of the period, $km^3/year$	Прогнозы, W_{cp} периода, $km^3/год$ <i>Forecasts, W_{av} of the period, $km^3/year$</i>		Приращение, $km^3/год$ (в %) <i>Increment, $km^3/year$ (in %)</i>	
			Уровень 2030 г. <i>Level of 2030</i>	Уровень 2050 г. <i>Level of 2050</i>	Уровень 2030 г. <i>Level of 2030</i>	Уровень 2050 г. <i>Level of 2050</i>
1	Годовой объем стока / Annual flow volume					
1.1	1914/1915-2020/2021 n=107 лет	248	272	280	24 (10)	32 (13)
1.2	1914/1915-1975/1976 n=62 года	233	218	211	-15 (6)	-22 (9)
1.3	1976/1977-2020/2021 n=45 лет	269	257	250	-12 (4)	-19 (9)
2	Меженный объем стока / Low water flow volume					
2.1	1914/1915-2020/2021 n=107 лет	99	127	136	28 (28)	37 (37)
2.2	1914/1915-1975/1976 n=62 года	85	78	75	-7 (8)	-10 (12)
2.3	1976/1977-2020/2021 n=45 лет	119	123	125	4 (3)	6 (5)
3	Объем половодья / High water volume					
1.1	1914/1915-2020/2021 n=107 лет	149	145	144	-4 (3)	-5 (3)
1.2	1914/1915-1975/1976 n=62 года	148	142	140	-6 (4)	-8 (5)
1.3	1976/1977-2020/2021 n=45 лет	150	139	134	-11 (9)	-16 (11)

Предположим, что выявленные тренды (рис. 2, 3) сохранятся и в первой половине XXI в. В результате получим оценки изменения среднемноголетних величин годового

объема стока р. Волги у г. Волгограда (табл. 2, 3). Как видим, за первую половину XXI в. среднемноголетний условно-естественный сток р. Волги у г. Волгограда в 2030 г. достиг уровня

269 км³/год, а в 2050 г. – 272 км³/год. При этом увеличение по сравнению со статистическим среднемноголетним стоком за период наблюдений (1881/1882-2020/2021 гг.) составляет соответственно 12 км³/год (5%) и 15 км³/год (6%). В качестве альтернативы такому увеличению стока р. Волги до г. Волгограда в первой половине XXI в. могут служить тренды, выявленные за расчетные периоды 1881/1882-1929/1930 гг. (n = 49 лет), 1930/1931-1975/1976 гг. (n = 46 лет) и 1976/1977-2020/2021 гг. (n = 45 лет). Особый интерес вызывает последний расчетный период (1976/1977-2020/2021 гг.), когда происходит смена отрицательным трендом с интенсивностью снижения среднемноголетнего стока р. Волги

до г. Волгограда в 22 км³/год (8%) на уровне 2030 г. и 35 км³/год (13%) на уровне 2050 г.

В случае сохранения тенденции обнаруженная в расчетные периоды 1881/1882-1929/1930 гг. и 1930/1931-1975/1976 гг. интенсивность увеличения среднемноголетнего стока по сравнению со статистическим значением составляет соответственно 22 км³/год (8%), 36 км³/год (14%), 24 км³/год (10%), 39 км³/год (16%). Аналогичные изменения обнаруживаются при анализе полученных результатов расчетного периода 1914/1915-2020/2021 гг. и подпериодов как годовых, так и сезонных величин среднемноголетних объемов стока р. Волги у г. Волгограда (табл. 3).

Таблица 3

Прогноз изменения среднемноголетнего объема годового и сезонного стока р. Волги в зоне формирования у г. Волгограда по выявленным тенденциям периода 1914/1915-2020/2021 гг.

Table 3

Forecast of changes in the average long-term volume of annual runoff of the Volga River in the zone of formation near the city of Volgograd according to the identified trends of the period 1914/1915-2020/2021 years

№ п/п	Версия и периоды <i>Version and periods</i>	W _{ср} периода, км ³ /год <i>W_{av} of the period, km³/year</i>	Прогнозы, W _{ср} периода, км ³ /год <i>Forecasts, W_{av} of the period, km³/year</i>		Приращение, км ³ /год (в %) <i>Increment, km³/year (in %)</i>	
			Уровень 2030 г. <i>Level of 2030</i>	Уровень 2050 г. <i>Level of 2050</i>	Уровень 2030 г. <i>Level of 2030</i>	Уровень 2050 г. <i>Level of 2050</i>
1	Годовой объем стока / Annual flow volume					
1.1	1914/1915-2020/2021 n=107 лет	248	272	280	24 (10)	32 (13)
1.2	1914/1915-1975/1976 n=62 года	233	218	211	-15 (6)	-22 (9)
1.3	1976/1977-2020/2021 n=45 лет	269	257	250	-12 (4)	-19 (9)
2	Меженный объем стока / Low water flow volume					
2.1	1914/1915-2020/2021 n=107 лет	99	127	136	28 (28)	37 (37)
2.2	1914/1915-1975/1976 n=62 года	85	78	75	-7 (8)	-10 (12)
2.3	1976/1977-2020/2021 n=45 лет	119	123	125	4 (3)	6 (5)
3	Объем половодья / High water volume					
1.1	1914/1915-2020/2021 n=107 лет	149	145	144	-4 (3)	-5 (3)
1.2	1914/1915-1975/1976 n=62 года	148	142	140	-6 (4)	-8 (5)
1.3	1976/1977-2020/2021 n=45 лет	150	139	134	-11 (9)	-16 (11)

Таким образом, обобщая вышеприведенные результаты, можно прийти к выводу о том, что в первой половине XXI в. среднемноголетний объем годового стока р. Волги до г. Волгограда может изменяться в сторону как увеличения, так и уменьшения, поэтому говорить о резком изменении климата в ее бассейне не приходится. Будут иметь место свойственные речному стоку циклические колебания: чередование многоводных лет с маловодными, – связанные с фазами потепления и похолодания, обладающие динамическим средним с различной интенсивностью.

Выводы

Анализ динамики временных рядов, организованных годовыми и сезонными значениями объемов (расходов) стока р. Волги до г. Волгограда, показывает, что этим рядам (1881/1882-2020/2021 гг., N = 140 лет; 1914/1915-2020/2021 гг., N = 107 лет) свойственны различные периоды, существенно различающиеся среднемноголетними величинами (нормами). Это подтверждает ранее выявленные закономерности, свойственные многолетним колебаниям речного стока, – цикличности.

Статистически обоснованная оценка параметров (фаз и амплитуды) циклов, обнаруженных в многолетнем колебании речного стока, а также разнонаправленные тенденции (тренды) и их функциональные уравнения служат научной основой для прогнозирования притока речных вод в основных створах речных систем страны. При этом многолетним колебаниям речного стока свойственны наряду со статистическими среднелетними величинами (нормами) и динамические, являющиеся функциями во времени.

Возможные изменения климата в XXI в. по сравнению с климатом XX в., по-видимому,

Библиографический список

1. Оценка влияния изменений климата на водный режим и сток рек бассейна Волги / Алексеевский Н.И., Фролова Н.Л., Антонова М.М. и др. // Вода: химия и экология. – 2013. – № 4. – С. 3-12.
2. Аполлов Б.А., Калинин Г.П., Комаров В.Д. Курс гидрологических прогнозов. – Л.: Гидрометеоздат, 1974. – 417 с.
2. Бефани Н.Ф., Калинин Г.П. Упражнение и методические разработки по гидрологическим прогнозам. – Л.: Гидрометеоздат, 1983. – 389 с.
3. Bolgov M., Korobkina E., Filippova I. Bayesian Decision for Low Flow Evaluation in Non-Stationary Conditions//The Grand Challenges Facing Hydrology in the 21st Century: Dooge Nash International Symposium, 2014. – Ireland: Dublin, 2014. – P. 65-74.
4. Георгиевский Ю.М., Шаночкин С.В. Гидрологические прогнозы. – СПб.: РГМЧ, 2007. – 436 с.
5. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2020 год. – Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (РОСГИДРОМЕТ). – М.: 2021. – 104 с. – URL: <https://www.meteorf.gov.ru/press/news/23886/>.
6. Змиева Е.С. Прогноз притока воды к Куйбышевскому и Волгоградскому водохранилищам. – М.: Гидрометеоздат, 1983. – 389 с.
7. Изменение климата и водные ресурсы: Технический документ Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК). – Женева: 2008. – 228 с.
8. Руководство по гидрологическим прогнозам: Краткосрочный прогноз расхода и уровня воды на реках. Вып. 2. – Л.: Гидрометеоздат, 1989. – 245 с.
9. Естественная зарегулированность стока рек бассейна Волги в условиях меняющегося климата / Фролова Н.Л., Агафонова С.А., Нестеренко Д.П. и др. // Водное хозяйство России. – 2013. – № 6. – С. 32-49.

Критерии авторства

Исмайлова И.Г., Исмайлов Г.Х., Раткович Л.Д., Мурашченкова Н.В., Перминов А.В. выполнили теоретические исследования, на основании которых провели обобщение и написали рукопись, имеют на статью авторское право и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликтов интересов

Статья поступила в редакцию 10.03.2022 г.

Одобрена после рецензирования 18.04.2022 г.

Принята к публикации 25.04.2022 г.

приведут к изменению гидрологических характеристик, и прежде всего – среднелетних величин речных систем России [6, 8, 10]. Это особенно наблюдается при анализе временных стокowych рядов р. Волги до г. Волгограда (в зоне формирования). Основанием такого изменения являются результаты нашего исследования и наблюдаемые изменения температуры приземного слоя воздуха в бассейне р. Волги. Так, выделяются три периода: резкое потепление в первой трети XX в.; незначительное похолодание во второй трети века; новое потепление в последней трети XX в.

References

1. Otsenka vliyaniya izmeneniya klimata na vodnyj rezhim i stok bassejna Volgi / Alexeevskij N.I., Frolova N.L., Antonova M.M., Igonina M.I. // Voda: himiya i ekologiya. – 2013. – № 4. – S. 3-12.
2. Apollov B.A., Kalinin G.P., Komarov V.D. Kurs gidrologicheskikh prognozov. – L.: Gidrometeoizdat, 1974. – 417 sBefanin.
3. Befanin N.F., Kalinin G.P. Uprazhnenie i metodicheskie razrabotki po gidrologicheskim prognozam. – L.: Gidrometeoizdat, 1983. – 389 s.
4. Bolgov M, Korobkina E, Filippova I. Bayesian Decision for Low Flow Evaluation in Non-Stationary Conditions // The Grand Challenges Facing Hydrology in the 21st Century. Dooge Nash International Symposium, 2014, Dublin, Ireland. – P. 65-74.
5. Georgievskij Yu.M., Shanochkin S.V. Gidrologicheskie prognozy. – SPb.: RGMCH, 2007. – 436 s.
6. Doklad ob osobennostyah klimata na territorii Rossijskoj Federatsii za 2020 god. – Federalnaya sluzhba po gidrometeorologii i monitoringu okruzhayushchej sredy (ROSGIDROMET) – Moskva, 2021. – 104 str. <https://www.meteorf.gov.ru/press/news/23886/>
7. Zmieva E.S. Prognoz pritoka vody k Kujbyshevskomu i Volgogradskomu vodohranilishcham. – M.: Gidrometeoizdat, 1983. – 389 s.
8. Izmenenie klimata i vodnye resursy. Tehnicheskij dokument Mezhpravitelstvennoj gruppy ekspertov po izmeneniyu klimata (MGEIK). – Zheneva, 2008. – 228 s.
9. Rukovodstvo po po gidrologicheskim prognozam. Vyp2. Kratkosrochnyj prognoz rashoda i urovnya vody na rekah. – L.: Gidrometeoizdat, 1989. – 245 s.
10. Estestvennaya zaregulirovannost stoka rek bassejna Volgi v usloviyah menyayushchegosya klimata / Frolova N.L., Agafonova S.A., Nesterenko D.P., Povalishnikova E.S. // Vodnoe hozyajstvo Rossii. – 2013. – № 6. – S. 32-49.

Criteria of authorship

Ismajlova I.G., Ismajlov G.H., Ratkovich L.D., Murashchenkova N.V., Perminov A.V. carried out theoretical studies, on the basis of which they generalized and wrote the manuscript. Ismajlova I.G., Ismajlov G.H., Ratkovich L.D., Murashchenkova N.V., Perminov A.V. have a copyright on the article and are responsible for plagiarism.

Conflict of interests

The authors state that there are no conflicts of interests

The article was submitted to the editorial office 10.03.2022

Approved after reviewing 18.04.2022

Accepted for publication 25.04.2022