

2.1.6. Гидравлика и инженерная гидрология

Оригинальная статья

УДК 502/504:551.585

DOI: 10.26897/1997-6011-2022-5-74-82

ОБОСНОВАНИЕ РАЗВИТИЯ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДИНАМИКО-СТОХАСТИЧЕСКОГО ПОДХОДА

ИСМАЙЫЛОВА ИРИНА ГАБИЛОВНА, заведующий лабораторией
igism37@mail.ru

ИСМАЙЫЛОВ ГАБИЛ ХУДУШ ОГЛЫ[✉], д-р техн. наук, профессор
gabil-1937@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; 127434, г. Москва, Тимирязевская ул., 49, корп. 28, Россия

Разработана методика вероятностной оценки (прогноза) гидрологической характеристики годового притока воды $W(t)$ бассейна р. Волги в зоне формирования у г. Волгограда. Предложенная методика позволяет построить прогнозную функцию обеспеченности, характеризующую изменения будущего режима речного стока в заданном створе реки. Прогноз речных вод с заданной обеспеченностью позволяет эффективно варьировать режимы работы водохозяйственных систем речного бассейна в зависимости от ожидаемой водности. Для изучения развития гидрологических процессов в речном бассейне рекомендуется использовать динамико-стохастическую концепцию, исходящую из условия того, что колебаниям речного стока наряду со стохастической составляющей свойственна и детерминированная составляющая, проявляющаяся в виде монотонно направленных или периодических трендов. Как показал проведенный анализ, многолетние изменения водности р. Волги у г. Волгограда не вполне отвечают законам колебаний случайных величин. Отдельные параметры этого процесса (среднемноголетние значения) довольно существенно меняются во времени, другие характеристики (дисперсия, асимметричность распределения членов), наоборот, весьма мало изменяются с течением времени и могут считаться практически постоянными. Для построения прогнозных кривых обеспеченности решаются две взаимосвязанные задачи. Во-первых, это построение функциональных уравнений среднемноголетней величины (нормы) притока во времени, и на основе полученных зависимостей осуществляется экстраполяция нормы притока за первую половину XXI в. Во-вторых, с использованием трехпараметрического гамма-распределения С.Н. Крицкого и М.Ф. Менкеля, при известных прогнозных нормах, полученных в соответствующих выборках и соотношениях $C_s = 2C_v$, построены ансамбли прогнозных кривых обеспеченностей притока р. Волги в зоне формирования у г. Волгограда.

Ключевые слова: динамико-стохастическая концепция, прогнозные функции обеспеченности, приток речных вод, маловодные годы, прогнозирование, функциональные уравнения, тренды

Формат цитирования: Исмайылова И.Г., Исмайылов Г.Х., Муращенко Н.В., Перминов А.В. Анализ и прогноз речных вод в зоне формирования стока реки Волги методом тенденций // Природообустройство. – 2022. – № 5. – С. 74-82. DOI: 10.26897/1997-6011-2022-5-74-82.

© Исмайылова И.Г., Исмайылов Г.Х., Муращенко Н.В., Перминов А.В., 2022

Original article

SUBSTANTIATION OF THE DEVELOPMENT OF HYDROLOGICAL PROCESSES USING THE DYNAMIC-STOCHASTIC APPROACH

ISMAIYLOVA IRINA GABILOVNA, head of the laboratory

igism37@mail.ru

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

gabil-1937@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

A technique has been developed for the probabilistic assessment (forecast) of the hydrological characteristic of the annual water inflow $W(t)$ of the river basin Volga in the formation zone near the city of Volgograd. The proposed method makes it possible to build a predictive supply function that characterizes changes in the future regime of river flow in a given river section. The forecast of river water with a given availability makes it possible to effectively vary the operating modes of the water management systems of the river basin depending on the expected water content. To study the development of hydrological processes in a river basin, it is recommended to use the dynamic-stochastic concept, based on the condition that, along with the stochastic component, river runoff fluctuations also have a deterministic component, which manifests itself in the form of monotonically directed or periodic trends. As the analysis showed, long-term changes in the water content of the Volga River near the city of Volgograd do not fully comply with the laws of fluctuations of random variables. Some parameters of this process (average long-term values) change quite significantly over time, other characteristics (dispersion, asymmetric distribution of members), on the contrary, change very little over time and can practically be considered constant. To construct predictive supply curves, two interrelated tasks are solved, including, firstly, the construction of functional equations of the average annual value (norm) of inflow over time and, based on the obtained dependencies, extrapolations of the inflow rate for the first half of the 21st century are carried out and, secondly, using three-parameter gamma distribution of S.N. Kritsky and M.F. Menkel and with known predictive norms obtained in the corresponding samples and ratios $C_s = 2C_v$, ensembles of predictive probability curves for the Volga River tributary in the formation zone near the city of Volgograd are constructed.

Keywords: dynamic-stochastic concept, predictive functions of availability, inflow of river water, dry years, forecasting, functional equations, trends

Format of citation: Ismajylova I.G., Ismajylov G.Kh., Murashchenkova N.V., Perminov A.V. Substantiation of the development of hydrological processes using the dynamic-stochastic approach // Prirodoobustrojstvo. – 2022. – No. 5. – S. 74-82. DOI: 10.26897/1997-6011-2022-5-74-82.

Введение. Эффективность функционирования современных водохозяйственных систем (ВХС), включающих в себя каскад водохранилищ, во многом определяется развитием гидрологических процессов в речных бассейнах. Это объясняется тем, что в многоводные годы решаются задачи рационального использования избыточного стока воды, которые могут быть приняты участниками ВХС, а в маловодные годы решаются задачи обеспечения гарантированного уровня водопотребления, жизненно важных функций рассматриваемой ВХС. Прогноз межгодовой и сезонной изменчивости притока речных вод с заданной обеспеченностью позволяет эффективно варьировать режимы

работы ВХС в зависимости от ожидаемой водности и тем самым повысить эффективность его функционирования в целом за многолетний период. Выявленные закономерности в сезонном и многолетнем колебании речного стока создают хорошие предпосылки для вероятностного предвидения предстоящего его режима по водности. Зная наперед степень повышения стока, мы располагаем информацией, необходимой, чтобы разрабатывать рациональные режимы функционирования современных сложных ВХС страны. Служба предсказаний предстоящей водности реки дает возможность правильно построить режимы функционирования ВХС, принять заблаговременно меры против угрожающих

наводнений и т.п. Так, предвидя объем половодий, можно построить эффективный план наполнения водохранилищ в весенний период, позволяющий избежать чрезмерных холостых сбросов в многоводные годы и не допустить риска ненаполнения водохранилищ в маловодные годы. Аналогично заблаговременное предсказание водности реки в меженном периоде создаст возможность составить рациональный план сработки водохранилища в рассматриваемом периоде. Этим и определяется актуальность вероятностного прогноза водности речного стока при развитии гидрологических процессов.

Материалы и методы исследований. Результаты исследований в XX веке [1-5] в области гидрологии со всей очевидностью показывают, что преобладающим направлением в развитии гидрологических процессов является стохастическая концепция. Вместе с тем, анализ развития гидрологических процессов в речных бассейнах свидетельствует о том, что немаловажная роль принадлежит генетическим концепциям – наличию детерминированной составляющей в развитии гидрологических процессов [3, 4, 7].

В гидрологии в 30-е гг. прошлого века интенсивно развивались эмпирические методы и, хотя весьма приближенно, отвечали требованиям практики. Эмпирические построения, даже самые простые, оценивались тогда специалистами как значительные достижения и быстро внедрялись в практику. После 1930 г. в исследовании стока получили широкое применение методы математической статистики [1, 5, 8-11]. Большую роль в развитии гидрологических процессов играли генетический подход к построению эмпирических формул и обобщение теоретических исследований.

Необходимо отметить, что основным методом познания развития гидрологических процессов является физический анализ гидрологических явлений, который позволяет глубже проникнуть во внутреннюю структуру и установить их закономерности. В связи с этим, в настоящее время для изучения развития гидрологических процессов доминирует динамико-стохастическая концепция для оценки (прогноза) межгодовой и сезонной изменчивости в многолетнем колебании речного стока [4, 5, 12].

В рамках динамико-стохастической концепции изменение любой гидрологической характеристики речного стока в различных створах по длине реки является случайным процессом, непрерывно изменяющимся во времени [2, 5, 11]. При этом, случайные колебания речного стока сочетаются с детерминированным изменением. Детерминированные изменения в режиме речного стока проявляются по двум

причинам: во-первых, в форме функциональных связей водности рек с координатой времени, которые проявляются в виде монотонно направленных или периодических трендов [3, 7]; во-вторых, в форме зависимостей стока от гидрологической и метеорологической обстановки периода, предшествующего исследуемому периоду [9, 13]. Соответственно, динамико-стохастическая природа колебаний речного стока предопределяет форму его прогнозирования на несколько лет вперед.

Таким образом, предвидение предстоящего значения речного стока включает в себя как бы две составляющие. Первая из них отражает однозначно детерминированные, регулярно наблюдавшиеся явления. Вторая составляющая выражает распределение вероятностей колебаний стока, рассматриваемых как случайные отклонения от средних величин, которые изменяются во времени. Как инструмент для предвидения будущего режима развития речного стока, выступает описание детерминистической закономерности, выражающейся в форме зависимостей стока от времени. Прежде всего имеются ввиду обнаружение длительной тенденции повышения или понижения водности речных бассейнов и многолетние периодические ее изменения.

Необходимо отметить, что в наблюдаемых рядах годового стока прослеживается определенная цикличность, выражающаяся в наличии группировок многоводных и маловодных лет. Чередование этих группировок на разных реках протекает различным образом. Цикличность процесса речного стока объясняется тем, что при больших обильных атмосферных осадках часть воды аккумулируется в грунте, в понижениях поверхности рельефа, в последующие годы поступая обратно в русло реки. С.Н. Крицкий и М.Ф. Менкель процесс цикличности в колебаниях речного стока интерпретировали как цепи Маркова с корреляционной связью между значениями стока смежных лет [5]. По мере увеличения промежутка между годами связь обычно ослабляет и в конце концов затухает. В качестве эффективного аппарата исследования цикличности выступают разностные интегральные кривые годового стока и спектральные преобразования Фурье от автокорреляционной функции [8, 3].

Если бы такие изменения предвиделись в календарной последовательности, то такая форма предвидения для водохозяйственной практики была бы наилучшей формой прогнозирования развития гидрологических процессов в речном бассейне. Однако, в реальных условиях важную роль играют вероятностные закономерности, выражающие случайные колебания речного стока [1, 4, 9]. Исходя из вышесказанного

определение соотношения между детерминированной и случайной составляющими колебаний речного стока и их изменений во времени зависит от длительности времени. Нас интересуют колебания речного стока, соизмеримые с периодом функционирования водохозяйственных систем, то есть период времени порядка 50-100 лет.

В настоящей работе ставится и решается задача определения вероятностной формы предвидения изменения многолетних колебаний гидрологических характеристик годового и сезонного расхода воды $Q(t)$ или объема воды $W(t)$ речного бассейна за вторую половину XXI в.

Объект исследований – бассейн реки Волги в зоне ее формирования до г. Волгограда. В качестве гидрологической характеристики годового и сезонного объема воды $W(t)$ были использованы два временных гидрологических ряда разной длительности, представленные на портале Мирового центра данных и АО «Института Гидропроект», – в частности, многолетние среднегодовые и средне-сезонные (половодье и межень) притоки воды $W(t)$ бассейна р. Волга в зоне формирования у г. Волгоград за период 1881/1882-2020/2021 гг. ($n = 140$ лет) и 1914/1915-2020/2021 гг. ($n = 107$ лет).

Для оценки (прогноза) развития гидрологических процессов в речном бассейне необходимо построить целый набор функций, важнейшими из которых являются функция математического ожидания (норма речного стока) $m(t) = M[W(t)]$, функция дисперсии $D(t) = D[W(t)]$, функции средне-квадратического отклонения $\sigma(t) = \sqrt{D(t)}$, безусловная функция распределения вероятностей $F(x, t) < P[W(t) < x]$, или функция обеспеченности $P[W(t) > x] = 1 - F(x, t) = 1 - P[W(t) < x]$, автокорреляционная функция $R(t, \tau) = \text{corr}[W(t), W(t + \tau)]$, условная функция распределения вероятностей $F(x, t; y, \tau) = P[W(t) < x / y = W(t + \tau)]$ и т.д.

Процесс многолетнего колебания гидрологической характеристики $W(t)$ может быть представлен в виде аддитивной функции:

$$W(t) = m(t) + u(t), \quad (1)$$

где $m(t)$ – детерминированная функция; $u(t)$ – случайная часть.

Годовой объем притока речных вод W_{i+1} при заданном W_i определяется с помощью регрессионных уравнений [9, 14]:

$$W_{i+1}(W_i) = \overline{W_{i+1}} + r \frac{\sigma_{i+1}}{\sigma_i} \left(W_i - \overline{W_i} \right) + \Phi_{i+1} \sigma_{i+1} \sqrt{1-r^2}, \quad (2)$$

где $W_{i+1}(W_i)$ – объем годового стока W_{i+1} при заданном W_i ; σ_i и σ_{i+1} – среднеквадратические отклонения годовых объемов стока; $\overline{W_i}$ и $\overline{W_{i+1}}$ – безусловные математические ожидания

годовых объемов стока; Φ_{i+1} – относительное отклонение ординаты кривой обеспеченности годовых величин стока от среднего значения (математическое ожидание). Величина Φ_{i+1} определяется по таблице Фостера-Рыбкина в зависимости от условного коэффициента асимметрии [13]; r – коэффициент корреляции между стоком смежных лет.

Если переходить от годовых объемов стока на модульные коэффициенты стока, тогда уравнение (2) примет вид:

$$K_{i+1}(K_i) = \overline{K_{i+1}} + r \frac{\sigma_{i+1}}{\sigma_i} (K_i - \overline{K_i}) + \Phi_{i+1} C_{V(i+1)} \sqrt{1-r^2}. \quad (3)$$

Поскольку рассматривается корреляция между стоками смежных лет, то есть исследуются связи членов некоторого ряда с членами того же ряда, смещенного на один год, то очевидно, что $\sigma_{i+1} = \sigma_i$, $\overline{K_{i+1}} = \overline{K_i} = 1$. Тогда уравнение (3) примет вид:

$$K_{i+1}(K_i) = 1 + r(K_i - 1) + \Phi_{i+1} C_{V(i+1)} \sqrt{1-r^2}. \quad (4)$$

Вводится гипотеза, согласно которой отклонения $\frac{K_{i+1}(K_i)}{1 + r(K_i - 1)}$ распределены по кривой Пирсона III типа с условным коэффициентом вариации

$$C_{V_{\text{усл}}} = \frac{C_V \sqrt{1-r^2}}{1 + r(K_i - 1)}, \quad (5)$$

где C_V – безусловный коэффициент вариации.

Условный коэффициент асимметрии –

$$C_{s, \text{усл}} = n \cdot C_{V_{\text{усл}}} = \frac{n C_V \sqrt{1-r^2}}{1 + r(K_i - 1)}. \quad (6)$$

При использовании трехпараметрического гамма-распределения С.Н. Крицкого и М.Ф. Менкеля n может приниматься как 1; 1,5; 2; 2,5; 3,0 до 6 [12].

Тогда нетрудно показать, что случайную величину K_{i+1} при известном и коррелятивно с ней связанном значении K_i можно определить с помощью уравнения в виде:

$$K_{i+1} = 1 + r(K_i - 1) + \Phi_{i+1} C_{V(i+1)} \sqrt{1-r^2}. \quad (7)$$

Сравнивая уравнение (7) с уравнением (1), можно заключить, что

$$m(t) = 1 + r(K_i - 1), \quad u(t) = \Phi_{i+1} C_{V(i+1)} \sqrt{1-r^2}. \quad (8)$$

Следовательно, регрессионную модель (7) в первом приближении можно рассматривать как удовлетворительную для прогнозирования многолетних колебаний гидрологической характеристики $W(t)$ в вероятностной форме, которое включает в себя две составляющие. Первая корреляционная – связанная $m(t) = 1 + r(K_i - 1)$; случайная – $u(t) = \Phi_{i+1} C_{V(i+1)} \sqrt{1-r^2}$.

Таким образом, развитие гидрологической характеристики $W(t)$ рассматривается как стохастический процесс и обладает признаками нестационарности. В то же время необходимо ввести некоторую систематизацию процесса многолетнего колебания гидрологической характеристики $W(t)$, чтобы найти соответствующие способы ее анализа и прогноза. Если в основу систематизации положить характер изменения основных статистических параметров, какими являются математическое ожидание $m(t)$ и дисперсия $D(t) = D[W(t)]$, или среднеквадратическое отклонение $\sigma(t) = \sqrt{D(t)}$, то можно различить следующие два простейших типа нестационарных процессов, которые наблюдаются при развитии гидрологических процессов в речном бассейне [1]. Во-первых, математическое ожидание (норма стока) $m(t)$ во времени является переменным (нестационарность первого порядка); во-вторых, математическое ожидание (норма стока) $m(t)$ и дисперсия, или среднеквадратическое отклонение $\sigma(t) = \sqrt{D(t)}$ во времени, являются переменными (нестационарность второго порядка). Очевидно, необходимо прогнозировать как математическое ожидание $m(t)$ и $\sigma(t)$ или $C_v(t) = \sigma(t)/m(t)$. Для прогнозирования $m(t)$ и $C_v(t)$ при наличии временных рядов годовых и сезонных объемов речного стока $W(t)$ можно использовать наиболее широко распространенные методы, критерий наименьших квадратов и его разновидности: в частности, метод наименьших квадратов (МНК), метод скользящего среднего, экспоненциального сглаживания и т.п.

Исходя из вышеизложенного методического подхода, вероятностный прогноз гидрологической характеристики годовых и сезонных объемов притока речных вод $W_p(t)$ в характерных створах речных систем реализуется в такой последовательности:

1. Задан временной ряд, организованный из годовых объемов притока речных вод $W_1, W_2, \dots, W_p, \dots, W_N$, где N – количество расчетных временных отрезков в данном ряду (годы).

2. Используя один из упомянутых методов (например, метод наименьших квадратов) и заданный исходный временной ряд $W_i(t)$ определяется функциональное уравнение среднемноголетней величины годового притока (математическое ожидание) речных вод в заданном створе реки $m(t)$;

3. Используя функциональное уравнение $m(t)$ осуществляется экстраполирование (прогноз) среднемноголетней величины (нормы) годового притока в момент $t + \Delta t$, то есть за благовременности Δt .

4. Определяется коэффициент изменчивости C_v по уравнению (5). Принимается гипотеза о том, что коэффициент изменчивости C_v не меняется во времени (нестационарность первого порядка).

5. Применяя трехпараметрическое гамма-распределение С.Н. Крицкого и М.Ф. Менкеля и найденные значения $m(t + \Delta t)$ и C_v строятся прогнозные кривые обеспеченности $W_p(t)$. При этом $C_s = nC_v$ (n определяется методом подбора).

Результаты и их обсуждение. Очевидно, что современное развитие науки учения вод суши не располагает возможностью календарного предвидения изменения речного стока на ближайшие годы и на десятки лет вперед. Соответственно, динамико-стохастический анализ данных наблюдений за формированием речного стока является одним из основных направлений предвидения будущего режима этого процесса в вероятностной форме.

При анализе временных рядов, организованных из притоков воды $W(t)$ бассейна р. Волги в зоне формирования у г. Волгограда за период 1881/1882-2020/2021 гг. ($n = 140$ лет) и 1914/1915-2020/2021 гг. ($n = 107$ лет), выявлено следующее. Первому базовому (расчетному) периоду свойственны три периода: относительно многоводный 1881/1882-1929/1930 гг.; сравнительно маловодный 1930/1931-1975/1976 гг. и повышенный многоводный 1976/1977-2020/2021 гг. Второму периоду свойственны два периода: относительно маловодный 1914/1915-1975/1976 гг. и сравнительно многоводный 1976/1977-2020/2021 гг.

Статистические параметры годового и сезонного стока р. Волги у г. Волгограда для этих периодов различаются [7]. Гипотеза однородности выборочных дисперсий в этих выборках не отвергается. Проверка однородности средних по критерию Стьюдента выявила обратную картину. Данная оценка показала, что при 1%-ных и менее высоких уровнях значимости материалы наблюдений по стоку р. Волги за сравниваемые периоды не могут причисляться к разряду однородных. Поскольку критерий Стьюдента является более информативным, то в целом сравниваемые ряды как первого базового периода (1881/1882-2020/2021 гг.), так и второго базового периода (1914/1915-2020/2021 гг.) следует считать статистически неоднородными. В результате нами получена N -кратная (в данном случае 7-кратная) выборка гидрологической характеристики $\{W(t): t \in T\}$ в реальных условиях развития гидрологических процессов в бассейне р. Волги в течение n -летнего периода времени (табл. 1). Каждая такая выборка создает предпосылки для оценки не только статистических параметров

кривых обеспеченностей выявленных базовых периодов, но и для прогноза параметров этих кривых на предстоящие периоды и построения самих прогнозных кривых обеспеченности гидрологической характеристики $\{W(t): t \in T\}$.

Используя, имеющиеся в нашем распоряжении 7-кратные выборки (временные ряды) организованных гидрологических характеристик $W(t)$ и метод наименьших квадратов, получили линейные функциональные уравнения выявлен-

ных трендов [7]. С использованием этих функциональных уравнений был осуществлен прогноз изменения среднесуточной нормы притока р. Волга в створе Волгоградского гидроузла на уровне 2030 и 2050 гг. (табл. 1). В таблице 1 приведены статистические параметры годового стока р. Волга в зоне формирования у г. Волгограда для расчетных (базовых) периодов и прогнозы среднесуточных объемов (нормы) рассматриваемых периодов для уровней 2030 и 2050 гг.

Таблица 1

Статистические параметры годового стока р. Волга в зоне формирования у г. Волгограда и прогнозные значения среднесуточного годового объема (нормы) стока, полученные по линейным функциональным уравнениям [7]

Table 1

Statistical parameters of the annual runoff of the Volga River in the zone of formation near the city of Volgograd and forecast values of the average long-term annual volume (norms) of runoff obtained from linear functional equations [7]

№ выборки Sample №	Периоды Periods	Базовый период (период наблюдений) Base period (observation period)			W _{сп.} период прогноза, км ³ /год W _{av.} period of forecasting km ³ /year	
		W _{сп.} , км ³ /год	C _V	C _S = 2C _V	2030 г.	2050 г.
1	1881/1882-2020/2021, n = 140 лет	257	0,17	0,34	269	272
2	1881/1882-1929/1930, n = 49 лет	259	0,17	0,34	281	295
3	1930/1931-1975/1976, n = 46 лет	242	0,16	0,32	266	281
4	1976/1977-2020/2021, n = 45 лет	272	0,14	0,28	250	237
5	1914/1915-2020/2021, n = 107 лет	248	0,18	0,36	272	280
6	1914/1915-1975/1976, n = 62 лет	233	0,19	0,38	218	211
7	1976/1977-2020/2021, n = 45 лет	269	0,14	0,28	257	250

Для построения базовых и прогнозных кривых обеспеченности наряду с нормой также необходимо из уравнений $C_S = n \cdot C_V$ определить параметр n . При известных значениях коэффициента изменчивости C_V параметр n определен методом подбора, включающим в себя сопоставление эмпирических и теоретических кривых обеспеченности базовых периодов в различных соотношениях C_S и C_V . Коэффициент изменчивости C_V для рассматриваемых базовых периодов определен методом моментов. В результате сопоставления для годового объема притока $W(t)$ р. Волга в зоне формирования у г. Волгограда наилучший результат получен при $C_S = 2C_V$. Кроме того, поскольку на первом этапе рассматривается гипотеза развития гидрологических процессов в бассейне р. Волга как нестационарный процесс первого порядка, полученное соотношение $C_S = 2C_V$ принимается постоянным во времени и используется для построения прогнозных кривых обеспеченностей рассматриваемых периодов.

Таким образом, используя таблицы трехпараметрического гамма распределения С.Н. Крицкого и М.Ф. Менкеля [1, 13] при $C_S = 2C_V$ построили кривые обеспеченностей базового (современный период наблюдения) и прогнозных периодов.

Ординаты этих кривых обеспеченностей приведены в таблице 2, кривые обеспеченности базового периода наблюдения – на рисунке 1, а прогнозные кривые обеспеченности – на рисунках 2 и 3.

Как следует из таблицы 2 и рисунков 1-3, каждый выборочный временной ряд, полученный для годового стока р. Волга у г. Волгограда, отличается от соседнего временного ряда, что свидетельствует об изменении условий при формировании речного стока в этом бассейне за рассматриваемый более столетний период наблюдений.

Все выявленные выборочные временные ряды $\{W(t): t \in T\}$ образуют ансамбль развития гидрологического процесса в бассейне р. Волга за период 1881/1882-2020/2021 гг. и 1914/1915-2020/2021 гг. При принятии гипотезы нестационарности первого порядка нами были получены ансамбли вероятностных прогнозов (прогнозные кривые обеспеченностей) на уровне 2030 и 2050 гг. гидрологической характеристики $\{W(t): t \in T\}$ бассейна р. Волга у г. Волгограда. Как следует из рисунка 1 (базисный период), данные кривых существенно различаются. Расхождение в оценках по ним особенно в зоне больших обеспеченностей достигает 20-30% (32 и 46 км³/год соответственно при обеспеченности $P = 97\%$).

Таблица 2

Объем годового стока р. Волга в зоне формирования у г. Волгограда
при различной обеспеченности, км³/год

Table 2

The volume of annual runoff of the Volga River in the zone of formation
near the city of Volgograd with different availability, km³ / year

№ выборки Sample №	Периоды Periods	Обеспеченности, в%-ах Availability, in%										
		0,1	1,0	5,0	25	50	75	80	85	90	95	97
	Базовый (расчетный) период / Basic (calculated) period											
1												
1.1	1881/1882-2020/2021	415	370	333	285	254	226	220	212	203	190	182
1.2	1881/1882-1929/1930	418	373	336	287	256	228	222	214	205	192	183
1.3	1930/1931-1975/1976	381	342	309	266	240	215	209	202	194	182	175
1.4	1976/1977-2020/2021	407	369	338	296	270	245	240	233	225	213	206
1.5	1914/1915-2020/2021	410	364	326	276	245	217	210	202	193	180	172
1.6	1914/1915-1975/1976	394	348	310	261	230	202	195	188	178	166	158
1.7	1976/1977-2020/2021	402	365	334	293	267	243	237	231	222	211	204
	Прогноз на уровне 2030 г. / Forecast on the level of the 2030 year											
2												
2.1	1881/1882-2020/2021	434	387	349	298	266	237	230	222	213	199	190
2.2	1881/1882-1929/1930	454	405	364	311	278	247	241	232	222	208	199
2.3	1930/1931-1975/1976	419	376	340	293	263	236	230	222	213	201	193
2.4	1976/1977-2020/2021	374	339	311	272	248	226	220	214	207	196	189
2.5	1914/1915-2020/2021	450	399	357	303	269	237	230	222	212	197	188
2.6	1914/1915-1975/1976	369	326	290	244	215	189	183	176	167	155	147
2.7	1976/1977-2020/2021	384	349	319	280	255	232	226	220	212	201	195
	Прогноз на уровне 2050 г. / Forecast on the level of the 2050 year											
3												
3.1	1881/1882-2020/2021	439	392	353	301	269	239	233	225	215	201	193
3.2	1881/1882-1929/1930	476	425	382	327	292	260	253	244	233	218	209
3.3	1930/1931-1975/1976	442	397	359	309	278	249	243	235	225	212	203
3.4	1976/1977-2020/2021	355	322	294	258	235	214	209	203	196	186	179
3.5	1914/1915-2020/2021	463	411	368	312	277	244	237	228	218	203	194
3.6	1914/1915-1975/1976	357	315	281	236	208	183	177	170	162	150	143
3.7	1976/1977-2020/2021	374	339	311	272	248	226	220	214	207	196	189

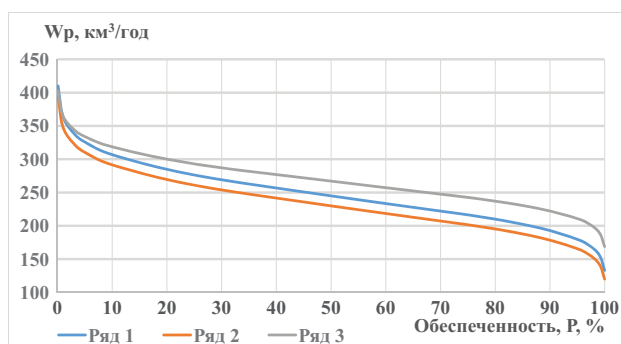


Рис. 1. Кривые обеспеченности ($W = f(P)$) базового периода (1914/1915-2020/2021 гг.):

Ряд 1 – 1914/1915-2020/2021 гг.;
Ряд 2 – 1914/1915-1975/1976 гг.;
Ряд 3 – 1976/1977-2020/2021 гг.

Fig.1. Availability curves ($W = f(P)$) of the base period (1914/1915-2020/2021):

Series 1 – 1914/1915-2020/2021;
Series 2 – 1914/1915-1975/1976;
Series 3 – 1976/1977-2020/2021

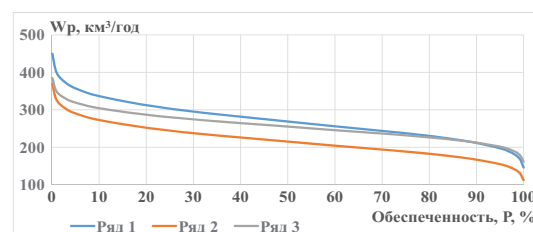


Рис. 2. Прогнозные кривые обеспеченности ($W = f(P)$) на уровне 2030 г. (1914/1915-2020/2021 гг.):

Ряд 1 – 1914/1915-2020/2021 гг.; Ряд 2 – 1914/1915-1975/1976 гг.;
Ряд 3 – 1976/1977-2020/2021 гг.

Fig.2. Forecast availability curves ($W = f(P)$) at the level of 2030 (1914/1915-2020/2021):

Series 1 – 1914/1915-2020/2021;
Series 2 – 1914/1915-1975/1976;
Series 3 – 1976/1977-2020/2021

Таким образом, при анализе данных наблюдений базисных периодов 1881/1882-2020/2021 гг.

и 1914/1915-2020/2021 гг. установлено, что начиная с 1976/1977 г. имели место в среднем не только повышение водности стока р. Волги, но и увеличение ординаты кривой обеспеченности периода 1976/1977-2020/2021 гг. по сравнению с кривой обеспеченности за весь период наблюдения 1914/1915-2020/2021 гг. При этом, период наблюдения 1914/1915-1975/1976 гг. как по среднемуголетним значениям годового стока (нормам), так и по ординатам кривых обеспеченности выступает как маловодный период по водности в бассейне р. Волги (табл. 1, 2). Аналогичной является картина при исследовании данных наблюдений за период 1881/1882-2020/2021 гг. (табл. 1, 2).

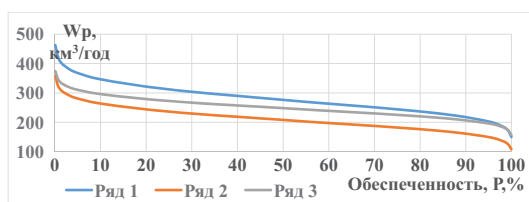


Рис. 3. Прогнозные кривые обеспеченности ($W = f(P)$) на уровне 2050 г. (1914/1915-2020/2021 гг.):

Ряд 1 – 1914/1915-2020/2021 гг.;

Ряд 2 – 1914/1915-1975/1976 гг.;

Ряд 3 – 1976/1977-2020/2021 гг.

Fig.3. Forecast availability curves ($W = f(P)$) at the level of 2050 (1914/1915-2020/2021):

Series 1 – 1914/1915-2020/2021;

Series 2 – 1914/1915-1975/1976;

Series 3 – 1976/1977-2020/2021

Анализ ансамбля прогнозов показывает, что за первую половину XXI в. в водности р. Волга может наблюдаться пестрая картина, что отражено в таблицах 1, 2 и на рисунке 1. Наряду с относительным увеличением среднесноголетних величин притока р. Волга у г. Волгограда не исключено уменьшение его за первую половину XXI в. Так, по прогнозу (по выборкам 4) (табл. 1) среднесноголетний приток р. Волга у г. Волгограда в первой половине XXI в. составит 250 км³/год на уровне 2030 г. и 237 км³/год на уровне 2050 г. и соответственно может уменьшаться на 22 км³/год (8%) и 35 км³/год (13%) по сравнению с базисным периодом 1976/1977-2020/2021 гг. Если анализировать базовые и прогнозные кривые обеспеченности рассматриваемых периодов, то и здесь также наблюдается пестрая картина. Таким образом, анализ водности р. Волги по полученным выборкам со всей очевидностью показывает, что в рассматриваемом более столетнем периоде наблюдений в бассейне р. Волга наряду с повышенной водностью р. Волга, начиная с конца XX и в начале XXI в., наблюдаются

свойственные ему циклические колебания: чередование многоводных и маловодных лет разной интенсивности. Прогноз по ансамблю показывает, что в первой половине XXI в. приток р. Волга может уменьшиться примерно на 10-15% по сравнению с водностью базового периода 1976/1977-2020/2021 гг. В целом, в связи с наблюдающимся изменением глобального и соответственно регионального климата в северном полушарии Земли [15, 16] ординаты кривых обеспеченности годового стока р. Волга в зоне формирования могут перестраиваться в сторону уменьшения водности в зоне больших обеспеченностей и в сторону увеличения в зоне малых обеспеченностей, что создаст определенные трудности в водопользовании.

Выводы

1. Установлено, что развитие гидрологических процессов в бассейне р. Волги обуславливается динамико-стохастическим характером формирования его стока. Динамический характер формируется в результате воздействия геофизических и гелиофизических причин. Стохастическая же составляющая формируется под воздействием большого количества разносторонне направленных факторов и выражается в форме получения функции распределения гидрологических характеристик и корреляционных связей между исследуемыми величинами. Для отображения динамического характера развития предлагается использовать метод экстраполяции статистических закономерностей, проявившихся в сезонном и многолетнем колебаниях стока р. Волги в прошлом.

2. Вероятностная оценка (прогноз) рассматриваемой характеристики сводится к решению двух задач: 1) определению условий изменения во времени детерминированной составляющей, то есть изменения среднесноголетней (нормы) величины гидрологической характеристики во времени и ее экстраполяции на период прогноза; 2) установлению характера колебаний стохастической составляющей, то есть построению прогнозной кривой обеспеченности гидрологической характеристики. Для решения первой задачи, предлагаются функциональные уравнения, характеризующие зависимость нормы притока р. Волга у г. Волгограда от времени. Далее, на основе полученных зависимостей, осуществлены экстраполяции нормы притока за первую половину XXI в., то есть на уровне 2030 и 2050 гг. Для решения второй задачи, построили ансамбли прогнозных кривых обеспеченностей притока р. Волга в зоне формирования у г. Волгограда.

Библиографический список

1. **Блохинов Е.Г.** Распределение вероятностей величин речного стока. – М.: Наука, 1974. – 169 с.
2. **Естигнеев В.М.** Речной сток и гидрологические расчеты. – М.: Изд-во МГУ, 1990. – 304 с.
3. **Закономерности гидрологических процессов.** / Под редакцией Н.И. Алексеевского. – М.: ГЕОС, 2012. – 736 с.
4. **Крицкий С.Н., Менкель М.Ф.** Гидрологические основы управления речным стоком. – М.: Изд-во Наука, 1981. – 255 с.
5. **Раткович Д.Я., Болгов М.В.** Стохастические модели колебаний составляющих водного баланса речного бассейна. – М.: Наука, 1997. – 262 с.
6. **Христофоров А.В.** Теория случайных процессов в гидрологии. – М.: Изд-во МГУ, 1994. – 139 с.
7. **Исмайлова И.Г.** Анализ и прогноз речных вод в зоне формирования бассейна р. Волги (до г. Волгограда) методом тенденции / Исмайлов Г.Х., Раткович Л.Д. и др. // Природообустройство. – 2022. – № 2. – С. 69-78.
8. **Добровольский С.Г.** Климатические изменения в системе «Гидросфере-Атмосфере». – М.: ГЕОС, 2002. – 232 с.
9. **Прогноз климатической ресурсообеспеченности Восточно-европейской равнины в условиях потепления XXI века** / Кислов А.В., Естигнеев В.М., Малхазова С.М. и др. – М.: Макс Пресс, 2008. – 292 с.
10. **Музылев С.В., Привальский В.Е., Раткович Д.Я.** Стохастические модели в инженерной гидрологии. – М.: Наука, 1982. – 184 с.
11. **Кучмент Л.С. Гельфан, А.Н.** Динамика-стохастические модели формирования речного стока. – М.: Наука, 1993. – 103 с.
12. **Христофоров А.В.** Надежность расчетов речного стока. – М.: Изд-во МГУ, 1993. – 166 с.
13. **Пособие по определению расчетных гидрологических характеристик.** – Л.: Гидрометеиздат, 1984. – 447 с.
14. **Кислов А.В.** Климат в прошлом, настоящем и будущем. – М.: МАИК «Наука / Интерпериодика», 2001. – 351 с.
15. **Прогноз климатической ресурсообеспеченности Восточно-Европейской равнины в условиях потепления XXI века** / А.В. Кислов, В.М. Естигнеев, С.М. Малхазова и др. – М.: Макс Пресс, 2008. – 292 с.
16. **Шикломанов И.А., Георгиевский В.Ю.** Современные и перспективные изменения стока рек России под влиянием климатических факторов // Водные ресурсы суши в условиях изменяющегося климата. – СПб: Наука, 2007. – С. 20-23.

Критерии авторства

Исмайлов Г.Х., Исмайлова И.Г., 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 22.07.2022

Одобрена после рецензирования 12.09.2022

Принята к публикации 19.09.2022

References

1. **Blokhinov E.G.** Raspredelenie veroyatnostej velikich rechnogo stoka. – M.: Nauka, 1974. – 169 s.
2. **Estigneev V.M.** Rechnoj stok i gidrologicheskie raschety. – M.: Izd-vo MGU, 1990. – 304 s.
3. **Zakonomernosti gidrologicheskikh protsessov.** / Pod redaktsiej N.I. Alexeevskogo. – M.: GEOS, 2012. – 736 s.
4. **Kritskij S.N., Menkel M.F.** Gidrologicheskie osnovy upravleniya rechnym stokom. – M.: Izd-vo Nauka, 1981. – 255 s.
5. **Ratkovich D.Ya., Bolgov M.V.** Stohasticheskie modeli kolebanij sostavlyayushchih vodnogo balansa rechnogo bassejna. – M.: Nauka, 1997. – 262 s.
6. **Khristoforov A.V.** Teoriya sluchajnyh protsessov v gidrologii. – M.: Izd-vo MGU, 1994. – 139 s.
7. **Ismajlova I.G.** Analizil prognoz rechnyh vod v zone formiorvaniya bassejna r. Volgi (do g. Volgograda) matodom tendentsii / Ismajlov G.Kh., Ratkovich L.D. i dr. // Prirodoobustrojstvo. – 2022. – № 2. – S. 69-78.
8. **Dobrovolsky S.G.** Klimaticheskie izmeneniya v sisteme «Gidrosfere-Atmosfere». – M.: GEOS, 2002. – 232 s.
9. **Prognoz klimaticheskoy resursoobespechenosti Vostochnoevropejskoj ravniny v usloviyah potopleniya XXI veka** / Kislov A.V., Estigneev V.M., Malkhazova S.M. i dr. – M.: Maks Press, 2008. – 292 s.
10. **Muzylev S.V., Privalskij V.E., Ratkovich D.Ya.** Stohasticheskie modeli v inzhenernoj gidrologii. – M.: Nauka, 1982. – 184 s.
11. **Kuchment L.S., Gel'fan A.N.** Dinamika-stohasticheskie modeli formirovaniya rechnogo stoka. – M.: Nauka, 1993. – 103 s.
12. **Khristoforov A.V.** Nadezhnost raschetov rechnogo stoka. – M.: Izd-vo MGU, 1993. – 166 s.
13. **Posobie po opredeleniyu raschetnyh gidrologicheskikh harakteristik.** – L.: Gidrometeoizdat, 1984. – 447 s.
14. **Kislov A.V.** Klimat v proshlom, nastoyashchem i budushchem. – M.: MAIK «Nauka / Interperiodika», 2001. – 351 s.
15. **Forecast of climatic resource availability of the East European Plain in the conditions of flooding of the XXI century** / A.V. Kislov, V.M. Estigneev, S.M. Malkhazova et al. – M.: Max Press, 2008. – 292 p.
16. **Shiklomanov I.A., Georgievsky V.Yu.** Sovremennye i perspektivnye izmeneniya stoka rek Rossii pod vliyaniem klimaticheskikh faktorov / Vodnye resursy sushi v usloviyah izmenyayushchegosya klimata. – SPb: Nauka, 2007. – S. 20-23.

Criteria of authorship

Ismajlova I.G., Ismajlov G.H., Murashchenkova N.V., Perminov A.V. carried out theoretical studies, on the basis of which they generalized and wrote the manuscript. Ismajlov G.H., Ismajlova I.G., 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 22.07.2022

Approved after reviewing 12.09.2022

Accepted for publication 19.09.2022