05.23.16 Гидравлика и инженерная гидрология

Оригинальная статья
УДК 502/504: 551.585
DOI: 10.26897/1997-6011-2021-1-87-99

РЕТРОСПЕКТИВНАЯ ОЦЕНКА НЕЗАРЕГУЛИРОВАННЫХ БОКОВЫХ ПРИТОЧНОСТЕЙ КУЙБЫШЕВСКОГО (НЫНЕ ЖИГУЛЁВСКАЯ ГЭС) ГИДРОУЗЛА БАССЕЙНА Р. ВОЛГИ

ИСМАЙЫЛОВ ГАБИЛ ХУДУШ ОГЛЫ✉, *д-р техн. наук, профессор*
gabil-1937@mail.ru

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

ИСМАЙЫЛОВА ИРИНА ГАБИЛОВНА, *заведующий лабораторией*
gabil-1937@mail.ru

Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Москва, Тимирязевская, 49. Россия

Приведены результаты анализа и оценки изменений годовых и сезонных характеристик гидрометеорологических процессов частного водосбора Куйбышевского гидроузла р. Волги. Для анализа пространственно-временной динамики изменчивости годовых и сезонных характеристик гидрометеорологических процессов рассматриваемой территории бассейна р. Волги нами были использованы более 100 летние данные наблюдений годовых и сезонных колебаний боковой приточности, суммарные атмосферные осадки и температурные режимы воздуха. Получены уравнения связи годовых и сезонных изменений гидрометеорологических характеристик во времени. Установлено, что многолетним колебания гидрометеорологических процессов (боковой приточности, суммарных атмосферных осадков и температуры воздуха) свойственны тенденции (тренды). Анализ этих тенденций показал, что нестандартная климатическая ситуация, начиная с 70-х годов прошлого столетия, весьма существенным образом сказалась на распределении годовых и особенно на сезонных (меженных и зимних) характеристиках гидрометеорологических процессов. Установлено, что в колебаниях суммарных атмосферных осадков обнаруживаются нестандартные однонаправленные изменения. Если зимним суммарным атмосферным осадкам характерна за рассматриваемый 100 летний период непрерывно убывающая тенденция, то летне-осеннему периоду – возрастающая тенденция. Это приводит к тому, что многолетние колебания суммарных атмосферных осадков за период межени формируются как стационарный процесс. В тоже время для суммарных атмосферных осадков весеннего половодья и приточности к Куйбышевскому гидроузлу характерен непрерывно возрастающий тренд.

Ключевые слова: *боковая приточность, тренд, атмосферные осадки, температура воздуха, речной сток, гидроузел, однородность, статистические параметры, нестационарность, многолетние колебания*

Формат цитирования: *Исмайылов Г.Х., Муращенкова Н.В., Исмайылова И.Г. Ретроспективная оценка незарегулированных боковых приточностей Куйбышевского (ныне Жигулёвская ГЭС) гидроузла бассейна р. Волги // Природообустройство. – 2021. – № 1. – С. 87-99. DOI: 10.26897/1997-6011-2021-1-87-99.*

© Исмайылов Г.Х., Муращенкова Н.В., Исмайылова И.Г., 2021

Original article

RETROSPECTIVE ASSESSMENT OF UNREGULATED LATERAL INFLOWS OF THE KUIBYSHEVSKY (NOW ZHIGULYOVSKAYA HYDROPOWER PLANT) HYDRAULIC UNIT OF THE VOLGA RIVER BASIN

ISMAIYLOV GABIL KHUDUSHEVICH✉, *doctor of technical sciences, professor*
gabil-1937@mail.ru

MURASCHENKOVA NATALYA VLADIMIROVNA, *candidate of technical sciences, associate professor*
splain75@mail.ru

ISMAIYLOVA IRINA GABILOVNA, *head of the laboratory*
gabil-1937@mail.ru

Russian state agrarian university – MAA named after C.A. Timiryazev; 127434, Moscow, Timiryazevskaya, 49, Russia

The results of the analysis and assessment of changes in annual and seasonal characteristics of hydrometeorological processes in a private catchment area of the Kuibyshev hydroelectric complex of the Volga river are presented. To analyze the temporal dynamics of the variability of the annual and seasonal characteristics of the hydrometeorological processes in the considered territory of the river basin we used more than 100 years of observations of annual and seasonal fluctuations of lateral inflow, total atmospheric precipitation and air temperature regimes on the Volgariver. Relationship equations for annual and seasonal changes in hydrometeorological characteristics in time are obtained. It was found that long-term fluctuations of hydrometeorological processes (lateral inflow, total atmospheric precipitation and air temperature) are characterized by tendencies (trends). The analysis of these trends showed that the non-standard climatic situation, starting from the 70s of the last century, had a very significant impact on the distribution of annual and especially on the seasonal (low-water and winter) characteristics of hydrometeorological processes. It has been established that non-standard unidirectional changes are found in the fluctuations in the total atmospheric precipitation. If the winter total precipitation is characterized over the 100-year period in question by a continuously decreasing trend, the summer-autumn period is an increasing trend. This leads to the fact that long-term fluctuations in total precipitation during the period of low water are formed as a stationary process. At the same time, the total precipitation of the spring flood and inflowing to the Kuibyshev hydroelectric unit is characterized by a constantly increasing trend.

Keywords: *lateral inflow, trend, precipitation, air temperature, river flow, hydroelectric complex, homogeneity, statistical parameters, non-stationarity, long-term fluctuations*

Format of citation: *Ismaiylov G.H., Murashchenkova N.V., Ismaiylova I.G. Retrospective assessment of unregulated lateral inflows of the Kuibyshevsky (now Zhigulyovskaya hydropower plant) hydraulic unit of the Volga river basin // Prirodoobustrojstvo – 2021. – № 1. – C. 87-99. DOI: 10.26897/1997-6011-2021-1-87-99.*

Введение. В начале XXI в. значительно возрос интерес к водным проблемам в нашей стране и за рубежом. Это объясняется как увеличивающимися требованиями относительно воды со стороны различных отраслей развивающейся экономики, так и возрастающим беспокойством об охране источников пресной воды – одного из важнейших элементов окружающей человека природной среды. Большое значение приобретают намеченные изменения в климатической системе Земли. Сегодня на повестку дня ставится задача определения того, насколько велики эти изменения и как они отразятся на изменении экологии водных и околоводных систем и в целом на состоянии окружающей среды.

Нестандартная климатическая ситуация, начиная с 70-х гг. прошлого столетия, весьма существенным образом сказалась на годовом и особенно на сезонном стоке рек, и это необходимо принимать во внимание для оценок на перспективу. Заблаговременная оценка изменения климата с позиции рационального использования и охраны природных ресурсов, в том числе водных, может обеспечить разумное и выгодное использование меняющихся характеристик климата. Речной сток относится

к климатически обусловленным возобновляемым водным ресурсам. Поэтому изменения режима речного стока влияют не только на возможность его использования в качестве источников водоснабжения, но и на сохранение (или на нарушение) экологического равновесия водотоков и водоемов.

Современное и будущее хозяйства страны немыслимо без развития крупных водохозяйственных систем и их объединений. В последнее время для решения водных проблем стали активно применяться методы математического моделирования включая информационное и цифровое моделирование.

Современная наука не располагает возможностью детерминированного, тем более календарного предвидения изменения речного стока на ближайшие годы, на десятки лет вперед с момента принятия решения о создании водохозяйственных систем. Вряд ли такое прогнозирование вообще когда-нибудь станет возможным. Поэтому статистический и генетический анализ данных наблюдений за формированием речного стока остается одним из основных способов гидрологического обоснования при разработке вариантов управления водными ресурсами речного стока. В свете работа, где методически последовательно развиваются статистический и генетический анализ и оценка формирования закономерностей незарегулированной боковой приточности к Куйбышевскому гидроузлу, является актуальной и своевременной.

Материалы и методы исследований. Объект исследования – бассейн реки Волги незарегулированной боковой приточности Куйбышевского гидроузла. Куйбышевское водохранилище расположено в центральной части Среднего Поволжья на рубеже лесостепной провинции Приволжской возвышенности и Низменного Заволжья. Вытянутое в меридиональном направлении, оно тянется от лесной ландшафтной зоны на севере до степной на юге, пересекая всю лесостепную зону.

Куйбышевское водохранилище – водоем многоцелевого назначения, который осуществляет сезонное, недельное и суточное регулирование стока р. Волги. В весенний период он наполняется до нормального подпорного уровня, а в остальное время года водные запасы срабатываются Волжским гидроузлом. Для Средней и Нижней Волги является основным регулятором (компенсатором) сезонного водного стока.

Характеристика гидрологического режима Куйбышевского водохранилища за 100-летний (1914-2013 гг.) период его существования приводится по данным систематических гидрологических и метеорологических наблюдений. Общая площадь водосбора водохранилища составляет 23500 км^2. Питание его идет главным образом за счет снеговых вод, в меньшей степени – дождевых и грунтовых.

Главные статьи водного баланса – поверхностный приток и сток через гидросооружения ГЭС. Среднегодовой сток рек, впадающих в водохранилище по его периферии (боковая приточность), составляет 5,4% от общего поверхностного притока. Следовательно, Куйбышевское водохранилище имеет три агрегированных притока, включающих в себя р. Волгу (створ Чебоксарской гидроузел), р. Каму (створ Нижнекамский гидроузел) и суммарный боковой приток бассейна р. Волги на участке Чебоксарского, Нижнекамского и Куйбышевского гидроузлов.

Следует отметить, что если два первых притока достаточно хорошо зарегулированы Верхневолжским и Камским каскадами водохранилищ, то суммарный боковой приток р. Волги на участке Чебоксарского, Нижнекамского и Куйбышевского гидроузлов не зарегулирован. Поэтому если исходить из условий риска, наибольший риск представляет собой незарегулированный боковой приток к Куйбышевскому гидроузлу в отличие от первых двух зарегулированных, хотя они по объему гораздо больше, чем незарегулированный боковой приток.

Для сопряженного анализа соотношения речного стока с климатическими факторами (суммарные температуры воздуха теплового и холодного периода, суммарные атмосферные осадки и др.) использованы более 100-летние временные ряды бассейна Куйбышевского гидроузла (г/у). В качестве годовых и сезонных значений гидрометеорологических наблюдений были использованы данные наблюдений, представленные на портале Мирового центра данных [12, 18] и АО «Институт Гидропроект», в частности:

• Многолетние суммарные температуры теплового, холодного периода и года в целом с 1902 по 2002 гг.

• Многолетние суммарные атмосферные осадки за год и сезон (половодье, лето-осень, зима и межень) за период 1902 по 2002 гг.

• Многолетние среднемесячные, среднегодовые и среднесезонные (половодье, лето-осень, зима, межень) значения боковой

приточности к Куйбышевскому гидроузлу за период 1914/1915-2014/2015 гг.

Гидрометеорологическим процессам, формирующимся в речном бассейне, свойственны стохастические закономерности [1, 8, 9, 13]. Соответственно этому для анализа многолетней динамики годовой и сезонной незарегулированной боковой приточности реки Волги в створе Куйбышевского г/у и определяющих ее климатических факторов использованы основные положения корреляционного и дисперсионного анализа [2, 3, 11, 19]. Для анализа и оценки статистических параметров гидрометеорологических наблюдений используется среднеарифметическое значение (математическое ожидание), характеризующее положение центра, вокруг которого колеблются отдельные значения x_i рассмотренных временных рядов. Среднеквадратическое отклонение (σ_x) характеризует меру рассеяния (отклонения) отдельных значений ряда от среднего арифметического. Коэффициент вариации (C_V) характеризует относительную (в долях от среднего арифметического) меру изменчивости ряда наблюдений. Коэффициент асимметрии (C_s) характеризует «форму» распределения случайных величин x_i относительно среднего арифметического значения. Коэффициент автокорреляции r(1) характеризует статистическую связь между смежными значениями ряда наблюдений x_i и x_{i+1} [4-7, 14-17]. При вычислении статистических характеристик временных рядов гидрометеорологических наблюдений конкретные значения этих характеристик всегда содержат случайные ошибки, связанные с ограниченностью числа членов временного ряда. Поэтому также определены среднеквадратические ошибки статистических параметров временных рядов наблюдений [5, 7, 17].

Для обнаружения нестационарности временных гидрометеорологических рядов (тренда) нами использованы непараметрические методы: метод ранговой корреляции Спирмена и коэффициента корреляции, учитывающего связи между значениями временного ряда ($\boldsymbol{x}_i$) и их порядковыми номерами(**i**) [5, 17]. Для оценки цикличности изменения гидрометеорологических характеристик применены разностные интегральные кривые [6, 7, 17]. Для оценки наличия однородности гидрометеорологических характеристик и определения их расчетных значений по неоднородным данным использованы критерии Фишера (F-критерий) и Стьюдента (t-критерий) [10]. Критерий Фишера оценивает однородность дисперсий двух рассматриваемых рядов, а критерий Стьюдента – однородность средних значений двух временных рядов.

Результаты и обсуждение. Для изучения развития гидрологических процессов в частном бассейне Куйбышевского гидроузла прежде всего определены среднемноголетние (норма) значения температуры годового, теплового и холодного периода, суммарных атмосферных осадков и речного стока весеннего, летне-осеннего, зимнего, меженного периода и года в целом (табл. 1).

Анализ таблицы 1 позволяет прийти к следующему заключению: норма среднегодовой температуры воздуха составляет 3°С, теплового и холодного периодов– соответственно 12 и –9°С; норма суммарных атмосферных осадков за межень и год в целом – соответственно 428 мм и 569 мм; норма речного стока меженного, зимнего и года в целом – соответственно 14,6 км^3, 5,1 км^{3}и 42 км^3/год. Наибольшая изменчивость и асимметрия свойственны речному стоку, чего нельзя сказать о суммарных атмосферных осадках и температуре воздуха. Например, изменчивость средней температуры теплового периода составляет 0,08. Согласно коэффициенту автокорреляции, который показывает статистическую связь между смежными значениями ряда наблюдений, можно сделать вывод о том, что существует средняя статистическая связь для годового (0,53), меженного (0,55) и зимнего (0,63) стоков, а статистическая связь среднегодовой температуры воздуха и годовых атмосферных осадков является достаточно слабой.

Анализ показывает, что если распределения годового и сезонного стока хорошо согласуются с трехпараметрическим гамма-распределением С.Н. Крицкого и М.Ф. Менкеля, то распределения средней температуры воздуха и суммарных атмосферных осадков являются случайными, и при оценке вероятностей появления нужно использовать преимущественно нормальное распределение.

Вычисленные ошибки рассматриваемых параметров рядов наблюдений не превышают допустимых значений точности (5-10%), исключение составляет лишь коэффициент асимметрии.

На рисунке 1 приведены графики колебания годового и сезонного объема незарегулированного бокового притока Куйбышевского г/у за многолетний период (1914/1915-2014/2015 гг.).

Таблица 1

Статистические параметры гидрометеорологических характеристик бассейна р. Волги на участке между Чебоксарским, Нижнекамским и Куйбышевским гидроузлами (боковая приточность к Куйбышевскому гидроузлу)

Table 1

Statistical parameters of hydrometeorological characteristics of the Volga River basin on the area between Cheboksarsky, Nizhnekamsky and Kuibyshevsky hydroelectric complexes (lateral inflowing to the Kuibyshevsky hydroelectric complex)

№ п/п	Наименование гидрометеорологических характеристик *Name of hydrometeorological characteristics*	Статистические параметры гидрометеорологических характеристик *Statistical parameters of hydrometeorological characteristics*				
		Среднемноголетнее (норма) $\bar{x}$ *Average multiyear (norm) $\bar{x}$*	**Среднеквадратическое отклонение, σ_x** *Average quadratic deviation, σ_x*	**Коэффициент изменчивости, C_V** *Variation coefficient, C_V*	**Коэффициента симметрии, C_s** *Assymetry coefficient, C_s*	**Коэффициент автокорреляции, r [1]** *Autocorrelation coefficient, r [1]*
1	Годовой сток, млн м^3 за год ***Annualflow, mln m^3 per year***	41964	10171	0,24	0,48	0,53
2	**Сток весеннего половодья млн м^3 за сезон** *Spring flood flow, mln m^3 per season*	27385	7152	0,26	0,52	0,29
3	**Меженный сток, млн м^3 за сезон** *Low water flow, mln m^3 per season*	14579	5119	0,35	0,70	0,55
4	**Летне-осенний сток, млн м^3 за сезон** *Summer-autumn flow, mln m^3 per season*	9546	3611	0,38	0,76	0,40
5	**Сток зимнего периода, млн м^3 за сезон** *Winter season flow, mln m^3 per season*	5061	1981	0,39	0,78	0,63
6	**Годовые суммарные атмосферные осадки, мм** *Annualtotalprecipitation, mm*	569	66,9	0,12	0,24	0,1
7	**Суммарные атмосферные осадки весеннего половодья, мм** *Total precipitation of spring flood, mm*	141	33,3	0,24	0,48	–0,13
8	**Суммарные атмосферные осадки летне-осеннего периода, мм** *Total precipitation of summer-autumn period, mm*	290	48	0,17	0,34	0,01
9	**Суммарные атмосферные осадки зимнего периода, мм** *Total precipitation of winter period, mm*	138	31,5	0,23	0,46	0,17
10	**Суммарные атмосферные осадки за межень, мм** *Total precipitation for low water, mm*	428	58,8	0,14	0,28	0,1
11	**Среднегодовая температура воздуха, °С** *Average annual air temperature, °C*	3,0	1,0	0,33	0,66	0,22
12	**Средняя температура воздуха теплого периода, °С** *Average air temperature of warm period, °C*	12,0	1,0	0,08	0,16	0,01
13	**Среднятемпература воздуха холодного периода, °С** *Average air temperature of cold period, °C*	–9,0	2,0	0,22	0,44	0,26

Аналогичные графики построены и для колебания температуры воздуха теплого и холодного периодов и года в целом, а также для колебания суммарных атмосферных осадков за многолетний период. Анализэтих графиков показывает, что многолетние колебания речного стока и определяющих его климатических факторов относятся к разряду довольно сложных природных процессов. Условия развития их определяются действием многих факторов. Эти процессы содержат в себе как

детерминированную, так и случайную составляющие. Детерминированная составляющая порождается действием мощных геофизических и гелиофизических причин, приводящих к значительным изменениям климатических и погодных условий. В результате в гидрологических процессах проявляются крупные направленные изменения (длительные изменения, связанные с потеплением или похолоданием климата) или весьма существенные периодические колебания (сезонные колебания). Случайная же составляющая формируется действием большого количества разносторонне направленных факторов. Проявление этой составляющей не является беспричинным, а наоборот, закономерно обусловлено. Однако в современных условиях описать в хронологическом порядке, и тем более спрогнозировать результат совместного действия многих разносторонне направленных факторов, практически не представляется возможным. В силу этого кажущиеся беспорядочными флуктуации гидрологических элементов принято называть случайными колебаниями. Вместе с тем рисунки показывают, что речному стоку и определяющим его климатическим факторам свойственны аномальные повышенные и пониженные значения атмосферных осадков и соответственно этому – аномальные маловодные и многоводные годы. В частности, анализ динамики изменения объема бокового притока к Куйбышевскому г/у исследуемого периода (1914-2014 гг.) показал, что процессу формирования стока свойственны следующие годы с маловодными аномалиями:

- за 1937 г. сток составил 21 км^3, отклонение от нормы– 50% (–21 км^3);
- за 1921 г. сток составил 21,5 км^3, отклонение от нормы– 49% (–20,5 км^3);
- за 1924 г. сток составил 22,2 км^3, отклонение от нормы – 47% (–19,8 км^3).

Также наблюдались следующие годы с многоводными аномалиями:

- за 1991 г. сток составил 83,1 км^3, отклонение от нормы – 98% (41,1 км^3);
- за 1990 г. сток составил 79 км^3, отклонение от нормы– 88% (37 км^3);
- за 1926 г. сток составил 57 км^3, отклонение от нормы– 36% (15,3 км^3).

При анализе аномальных лет по водности становится очевидным, что наиболее катастрофические многоводные годы приходятся на конец XX в., а наиболее катастрофические маловодные годы – на 30-е гг. XX в. Очевидно, что гидрографы 1937 и 1921 гг. могут выступать в качестве модели по водности при определении водообеспеченности отраслей экономики прилегающими к Куйбышевскому водохранилищу г/у и возможности для них выполнять функции компенсатора. Гидрографы 1991 и 1990 гг. могут использоваться в качества расчетных для защиты окружающей среды от наводнений и обеспечить необходимые попуски с целью улучшения рыбохозяйственныхи экологическихусловий на участке от нижнего бьефа до устья р. Волги.

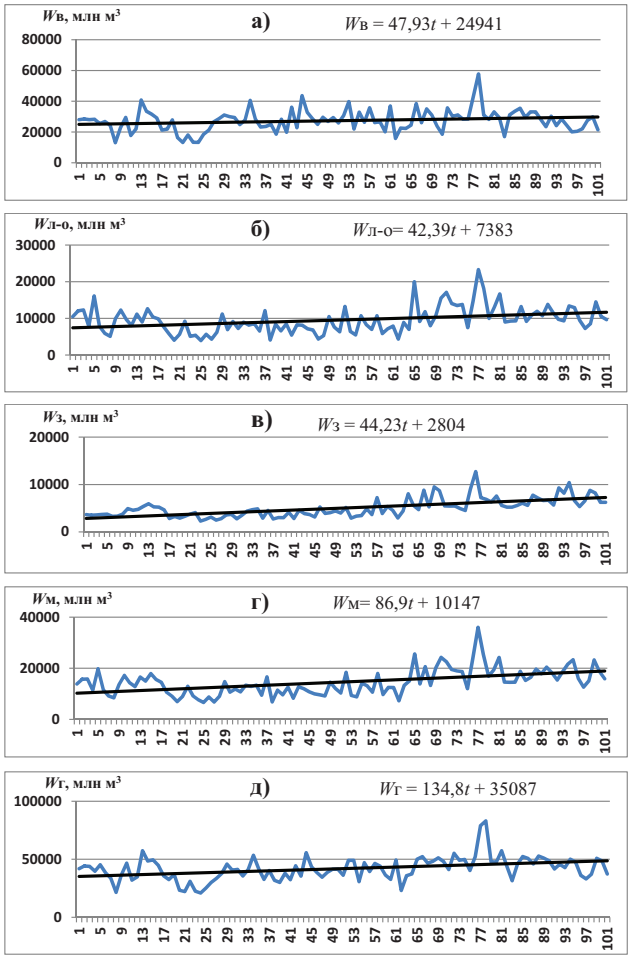


Рис. 1. **Колебания объема незарегулированной боковой приточности к Куйбышевскому гидроузлу за многолетний период 1914/1915-2014/2015 гг. (n = 101 год):**
а – весеннее половодье; б – летне-осенняя межень; в – зимняя межень; г – межень; д – год в целом

Fig. 1. **Fluctuations in the volume of unregulated lateral inflow to the Kuibyshevsky hydroelectric complex for the long period 1914/1915-2014/2015 (n = 101 years):**
a – spring flood; б – summer-autumn low water; в – winter low water; г – low water; д – a year in total

Анализ динамики развития гидрометеорологических характеристик в частном бассейне Куйбышевского г/у со всей очевидностью показывает, что гидрометеорологические процессы являются не только стохастическими – они обладают детерминированной составляющей в виде тренда. При этом с использованием имеющихся столетних данных наблюдений нами были получены следующие уравнения тренда для рассматриваемых гидрометеорологических процессов.

Уравнение тренда бокового притока к Куйбышевскому г/у:

$$\left.\begin{aligned} W_{г}(t) &= 134t + 35087 \\ W_{м}(t) &= 86,9t + 10147 \\ W_{з}(t) &= 44,23t + 2804 \\ W_{л\text{-}о}(t) &= 42,39t + 7383 \\ W_{в}(t) &= 47,93t + 24941 \end{aligned}\right\}. \qquad (1)$$

Уравнение тренда средней температуры воздуха в бассейне Куйбышевского г/у:

$$\left.\begin{aligned} T_{теп.}(t) &= 0,004t + 11,67 \\ T_{хол.}(t) &= 0,019t + 10,47 \\ T_{Г}(t) &= 0,011t + 2,436 \end{aligned}\right\}. \qquad (2)$$

Уравнение тренда суммарных атмосферных осадков, выпадающих на бассейн Куйбышевского г/у:

$$\left.\begin{aligned} P_{г}(t) &= 0,284t + 554 \\ P_{м}(t) &= 0,01t + 428 \\ P_{з}(t) &= -0,198t + 148 \\ P_{л\text{-}о}(t) &= 0,187t + 280 \\ P_{в}(t) &= 0,294t + 126 \end{aligned}\right\}. \qquad (3)$$

Системы уравнений (1)-(3) позволили определить происходящие изменения в структуре гидрометеорологических процессов водосбора Куйбышевского гидроузла за последнее 100-летие. Как следует из таблицы 2, за рассматриваемый 100-летний период незарегулированной боковой приточности Куйбышевского гидроузла относительно нормы изменился следующим образом: за год – 32% (13,4 км^3), межень – 60% (8,7 км^3), лето-осень – 44% (4,2 км^3), зима – 87% (4,4 км^3), весеннее половодье – 18%. Как показывают эти данные, наибольшее изменение приходится на меженный и зимний стоки. В целом годовая незарегулированная боковая приточность Куйбышевского гидроузла за 100-летний период увеличилась на 32%. Это становится ясным, если проводить сопряженный анализ элементов водного и теплового баланса частного водосбора Куйбышевского гидроузла за XX в.

За 100-летний рассматриваемый период среднемноголетние суммарные атмосферные осадки увеличились на 29 мм (5%), за весеннее половодье – на 30 мм (21%), а за летне-осенний период – на 19 мм (6%). При этом среднемноголетняя температураза рассматриваемый период повысилась на 1,1°С (потепление), особенно в холодный период – 1,9°С, что послужило основанием для увеличения стока зимнего периода. Анализ динамики температуры воздуха показывает, что в бассейне Куйбышевского гидроузла за рассматриваемый период происходят следующие изменения: 1901-1932 гг. – период потепления; 1933-1972 гг. – период постепенного похолодания; 1973-2001 гг. – период интенсивного повышения температуры воздуха. Как отмечает созданная при ООН межправительственная группа экспертов по изменению климата (МГЭИК) в Пятом докладе, за последнее столетие температура воздуха на планете увеличилась на 0,75°С/100 лет. Для России в этот же период наблюдалось еще более заметное потепление, которое составило 1,29°С/100 лет.

Таблица 2

Изменения среднемноголетнего (тренда) годового и сезонного стока для бассейна Куйбышевского водохранилища за многолетний период

Table 2

Changes in the average long-term (trend) annual and seasonal runoff for the basin of the Kuibyshevsky reservoir over a multi-year period

Период *Period*	**$\Delta W_{год}$, км^3** *Year, km^3*	**$\Delta W_{меж}$, км^3** *Low water, km^3*	**$\Delta W_{зима}$, км^3** *Winter, km^3*	**$\Delta W_{л\text{-}о}$, км^3** *Summer-autumn, km^3*	**$\Delta W_{весна}$, км^3** *Spring, km^3*
1914/1915-2014/2015 гг.	13,5	8,7	4,4	4,3	4,8

В многолетнем колебании бокового притока (рис. 2) к Куйбышевскому гидроузлу (ныне Жигулевская ГЭС), с 1914/1915 по 2014/2015 гг. можно выделить два периода: маловодный период с 1914/1915 по 1975/1976 гг. и многоводный период с 1976/1977 по 2014/2015 гг.

Статистические параметры годового незарегулированного бокового притока к Куйбышевскому гидроузлу для выделенных периодов различаются. Математические ожидания (норма) m(t), среднеквадратическое отклонение $\sigma(t)$ и коэффициент изменчивости Cv этих периодов соответственно составляют 38,2 км^3; 8,4 км^3; 0,22 и 48,2 км^3; 9,9 км^3; 0,21. Коэффициент автокорреляции соответственно составляет 0,63 и 0,38.

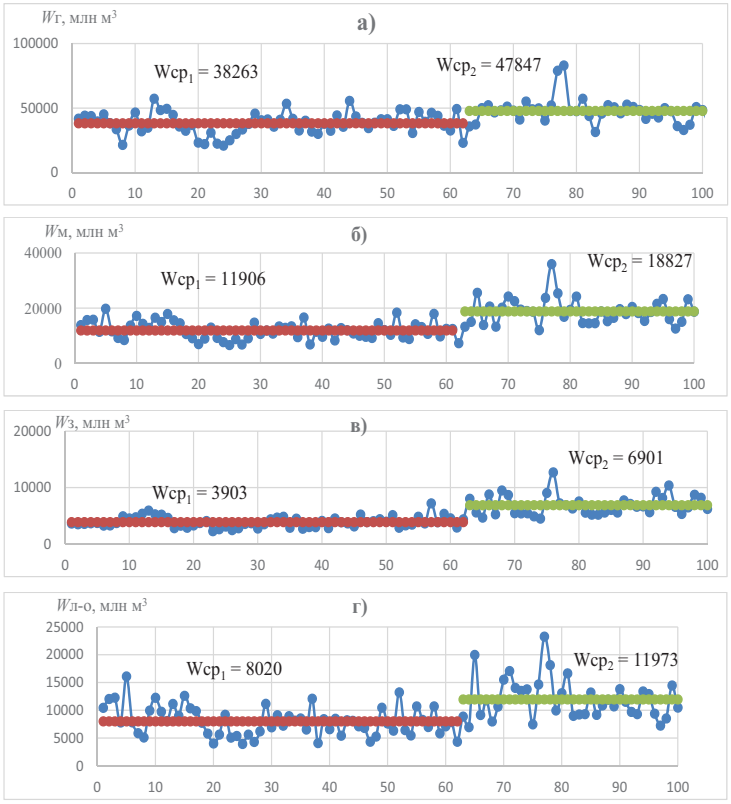


Рис. 2. **Изменения среднего многолетнего значения объема притока к Куйбышевскому гидроузлу за маловодные(1914/1915-1975/1976 гг.) и многоводные (1976/1977-2014/2015 гг.)периоды:**
а – год в целом; б – межень; в – зимняя межень; г – летне-осенняя межень

Fig. 2. **Changes in the average perennial value of the inflow volume to the Kuibyshevsky hydroelectric complex for the periods of low water 1914/1915-1975/1976 and high water 1976/1977-2014/2015:**
a – year in total; б – low water; в – winter low water; г – summer-autumn low water

В таблицах 3, 4 приведены данные годового незарегулированного бокового притока р. Волги в створе Куйбышевского гидроузла (г/у) различной обеспеченности для многоводного и маловодного периодов. Как следует из таблиц, кривые обеспеченности существенно различаются между собой. Расхождение в оценках по ним, особенно в зоне больших обеспеченностей, достигают 40-44%. Полученные кривые могут быть использованы для выполнения вероятностных оценок защиты территории от затопления и наводнения, а также для водообеспечения населения и хозяйственных объектов в зоне влияния Жигулевской ГЭС.

Оценку наличия тренда рассматриваемых параметров (речного стока, атмосферных осадков и температуры воздуха), приведенного на рисунке 1 и описываемого параметрическими уравнениями (1)-(3), можно решать разными методами. Был использован способ коэффициента корреляции, учитывающего связи между значениями временного ряда ($\boldsymbol{x}$) и порядковыми номерами членов ряда ($\boldsymbol{i}$):

$$\hat{r}_{x,i} = \frac{\sum_{i=1}^{n}\left(x_i - \bar{x}\right)\left(i - \bar{i}\right)}{\left[\left(n-1\right)\sigma_x\sigma_i\right]}, \qquad (4)$$

где $\boldsymbol{x}_i$ – значение гидрометеорологической характеристики рассматриваемого временного ряда; $\bar{\boldsymbol{x}}$ – среднемноголетнее значение параметров; $\boldsymbol{i}$ – порядковый номер члена ряда; $\bar{\boldsymbol{i}}$ – среднеарифметическое значение, полученное из порядковых номеров членов ряда; σ_x, σ_i – среднеквадратические отклонения значений временного ряда x_i и их i-х порядковых номеров. При этом необходимо выполнение следующих условий.

Таблица 3

Оценка объема меженной боковой приточности к Куйбышевскому г/у с различной обеспеченностью для маловодного(1914/1915-1976/1977 гг.) и многоводного (1977/1978-2014/2015 гг.) периодов

Table 3

Assessment of the volume of low water lateral inflow to the Kuibyshevskyhydroelectric complex with different water supply for low-water (1914/1915-1976/1977) and high-water (1977/1978-2014/2015) periods

Обеспеченность, % *Water provision, in %*	**Меженный сток, млн м^3/год** *Low-water flow, mln m^3/year*		**Расхождение в оценках** *Discrepancies in estimates*	
	Маловодный / *Shallow water*	**Многоводный /** *High water*	**км^3/год /** *km^3/year*	%
1	20683	31761	11078	35
3	18703	28877	10174	35
5	17689	27416	9727	35
10	16198	25272	9074	36
25	13908	21895	7987	36
50	11630	18556	6926	37
75	9614	15577	5963	38
80	9185	14951	5766	39
85	8660	14154	5494	39
90	8039	13224	5185	39
95	7205	11953	4748	40
97	6680	11156	4476	40
99	5761	9771	4010	41
99,9	4425	7703	3278	43

Если $r_{x,i} \le 0{,}3$ статистическая связь между двумя рядами признается слабой, $0{,}3 \le r_{x,i} \le 0{,}7$ статистическая связь – средней, то $r_{x,i} \le 0{,}7$ – высокая степень статистической связи. После определения коэффициента корреляции между временным рядом x_i и порядковым номером членов ряда i определяем среднеквадратическое отклонение коэффициента корреляции, которое рассчитывается по формуле:

$$\sigma_{r_{x,i}} = \frac{1 - r_{\tilde{o},i}^{\,2}}{\sqrt{n-1}}. \qquad (5)$$

Далее производим расчет достоверности коэффициента корреляции, который рассчитывается по формуле:

$$К_д = \frac{r}{\sigma_r}. \qquad (6)$$

Если $r_{xi} > 2\sigma_r$ и $К_д \ge 2$, то при 5%-ном уровне значимости критерия ($\alpha = 5\%$) коэффициент корреляции достоверен и линейный тренд рассматриваемых гидрометеорологических параметров статистически значим.

Данные таблицы 5 позволяют сделать вывод о том, что по применяемым критериям статистически значимые тренды обнаруживаются для среднегодовой температуры воздуха и температуры воздуха за холодные периоды, годового и меженного бокового притока, бокового притока – за зимние, весенние и летне-осенние периоды, тогда как для среднегодовых атмосферных осадков, атмосферных осадков за зимние, весенние и летне-осенние периоды, температуры воздуха за теплые периоды рассматриваемой территории наличие трендов не подтверждается.

Интерес представляет оценка однородности (стационарности) и неоднородности (нестационарности) нормы и дисперсии для выделенных двух периодов: маловодный период с 1914/1915 по 1975/1976 гг. и многоводный период с 1976/1977 по 2014/2015 гг. Отметим, что оценка однородности гидрологических характеристик предусматривает использование как генетических, так и статистических методов анализа гидрометеорологической информации, которые отражают по сути одно и тоже гидрологическое явление и поэтому дополняют друг друга.

Для оценки статистической значимости нормы и дисперсии были использованы статистические критерии F-критерий Фишера и t-критерия Стьюдента.

Как следует из таблицы 6, рассматриваемые маловодный период (1914/1915 по 1975/1976 гг.) и многоводный период (1976/1977 по 2014/2015 гг.) по нормам зимнего, меженного периодов и года в целом являются неоднородными (нестационарными).

Таблица 4

Оценка объема зимнейбоковой приточности к Куйбышевскому г/у с различной обеспеченностью для маловодного (1914/1915-1976/1977 гг.) и многоводного (1977/1978-2014/2015 гг.) периодов

Table 4

Assessment of the volume of winter lateral inflow to the Kuibyshevsky hydroelectric complex with different water supply for low-water (1914/1915-1976/1977) and high-water (1977/1978-2014/2015) periods

Обеспеченность, % *Water supply in %*	**Меженный сток, млн м^3/год** *Low water flow, mln m^3/year*		**Расхождение в оценках** *Differences in assessments*	
	Маловодный / *Low water*	**Многоводный /** *High water*	**км^3/год /** *km^3/year*	%
1	6881	11708	4828	41
3	6222	10616	4394	41
5	5885	10059	4175	42
10	5389	9241	3853	42
25	4627	7970	3344	42
50	3869	6706	2837	42
75	3198	5593	2395	43
80	3055	5353	2297	43
85	2881	5057	2176	43
90	2674	4714	2039	43
95	2397	4239	1843	43
97	2222	3944	1722	44
99	1917	3429	1512	44
99,9	1472	2666	1194	45

Таблица 5

Оценка линейного тренда гидрометеорологических характеристик бассейна Куйбышевского гидроузла

Table 5

Assessment of the linear trend of hydro meteorological characteristics of the basin of the Kuibyshevskyhydroelectric complex

№ п/п *it-s*	**Наименование гидрометеорологических характеристик** *Name of hydro meteorological characteristics*	**Наименование оценочных параметров гидрометеорологических характеристик** *Name of assessment parameters of hydro meteorological characteristics*			
		r	σ_r	$2\sigma_r$	$К_д$
1	**Годовой боковой приток** *Annual lateral inflow*	0,54	0,07	0,14	7,58
2	**Боковойпритокзамежень** *Lateral inflow for low water*	0,50	0,08	0,16	6,25
2	**Боковой приток весеннего половодья** *Lateral inflow of spring flood*	0,30	0,09	0,18	3,28
4	**Боковой приток летне-осеннего периода** *Lateral inflow of summer-autumn period*	0,40	0,08	0,17	4,74
5	**Боковойпритокзимнегопериода** *Lateral inflow of winter period*	0,64	0,06	0,12	10,79
6	**Среднегодовая температура воздуха, °С** *Average annual air temperature, °C*	0,24	0,09	0,19	2,53
7	**Средняя температура воздуха холодного периода, °С** *Average air temperature of cold period, °C*	0,28	0,09	0,19	3,02

При исследовании дисперсий зимнего и меженного периодов они оказались неоднородными (нестационарными), а год в целом – однородным (стационарным). Основной причиной нестационарности нормы и дисперсии рассматриваемых периодовявляется рост температуры воздуха и, следовательно, температуры воды в реках и озерах с ростом

городов, достигающей нескольких градусов. Кроме того, на условия формирования различных характеристик речного стока оказывают влияние метеорологические факторы.

Таблица 6

Оценка однородности (неоднородности) незарегулированного бокового притока к Куйбышевскому гидроузлу на р. Волге

Table 6

Assessment of homogeneity (heterogeneity) of unregulated lateral inflow to Kuibyshevsky hydroelectric complex on the Volga River

№ п.п. *it-s*	Гидрологические характеристики *Hydrological characteristics*	Оценка однородности среднего значения *Assessment of homogeneity of average value*			Оценка однородности дисперсий *Assessment of homogeneity of dispersions*		
1		$t_{расч}$ t_{rated}	t_α	Результат *Result*	$F_{расч}$	$F\alpha$	Результат *Result*
2	**Годовой боковой приток** *Annual lateral inflow*	5,1	1,7	**Неоднородный** *Heterogenous*	1,4	1,8	**Однородный** *Homogenous*
3	**Боковой приток за межень** *Lateral inflow for low water*	8,0	1,7	**Неоднородный** *Heterogenous*	2,2	1,8	**Неоднородный** *Heterogenous*
4	**Боковой приток зимнего периода** *Lateral inflow of winter period*	8,7	1,7	**Неоднородный** *Heterogenous*	2,8	1,8	**Неоднородный** *Heterogenous*

Выводы

1. Анализ развития гидрометеорологических процессов в частном бассейне Куйбышевского гидроузла показывает, что нестандартная климатическая ситуация, начиная с 70-х гг. прошлого столетия, весьма существенным образом сказалась на распределении годовых и особенно на сезонных (меженных и зимних) характеристиках этих процессов. Рассматриваемый 100-летний период незарегулированной боковой приточности Куйбышевского гидроузла относительно нормы изменился следующим образом: за год – на 32% (13,4 км^3), межень – 60% (8,7 км^3), лето-осень – 44% (4,2 км^3), зима – 87% (4,4 км^3), весеннее половодье – 18% (4,8 км^3). Среднемноголетние суммарные атмосферные осадки увеличились на 5% (28,4 мм), в весеннее половодье – на 21% (30 мм), в летне-осенний период – на 6% (19 мм), зимняя межень – 14% (20 мм). Среднемноголетняя температура за рассматриваемый период повысилась на 1,1°С (потепление), особенно в холодный период – 1,9°С.

2. Многолетним колебаниям бокового притока Куйбышевского гидроузла свойственны два достаточно длительных периода: относительно маловодный с 1913/1914-1975/1976 гг. и сравнительно многоводный – 1976/1977-2014/2015 гг. Статистические параметры кривых обеспеченности этих периодов резко различаются, что необходимоучитывать при разработке правил управления Куйбышевским гидроузлом.

3. Для многих притоков частных водосборов бассейна реки Волги, особенно для боковых притоках между Чебоксарским, Нижнекамским и Куйбышевским гидроузлами, как показывают наши исследования, с начала 70-х гг. прошлого века наблюдается повышенный сток зимней межени – как правило, за счет уменьшения стока весеннего половодья. Произошло изменение внутригодового распределения стока в связи с повышением температуры воздуха в зимний период. Это явление оказывает определенное влияние на регулирование стока реки Волги Куйбышевским гидроузлом и различного рода водозаборами на всем протяжении, начиная с верхних и нижних бьефов вышеуказанных гидроузлов, для обеспечения водой городов промышленных и сельскохозяйственных предприятий и для других нужд народного хозяйства.

4. В исключительно маловодные годы суммарный боковой сток весеннего периода Куйбышевского гидроузла, как правило, формируется за счет запасов воды в снежном покрове в русловой сети, и, следовательно, большая часть площади водосбора исключается из формирования стока весеннего половодья. В исключительно же многоводные годы бессточные понижения местности переполняются водой, и далее сток весеннего половодья формируется за счет всей действующей площади водосбора Верхней Волги и Камы включая суммарные боковые притоки Куйбышевского гидроузла. В средние по водности годы

действующая площадь водосбора имеет промежуточное значение между двумя крайними рассмотренными случаями.

Таким образом, одни статистические критерии однородности в данном случае применять затруднительно ввиду того, что изменение однородности происходит непрерывно с изменением водности года. В данном случае следует основываться на физическом анализе гидрологической информации и на статистическом анализе эмпирических функций распределения вероятностей ежегодного превышения (кривых обеспеченностей).

Библиографический список

1. Многолетние ряды месячных сумм среднеобластных осадков за холодный период для основной сельскохозяйственной зоны СССР. – Л.: Гидрометеоиздат, 1988. – 288 с.

2. Сайт Всесоюзного научно-исследовательского института гидрометеорологической информации – Мировой центр данных – www.meteo.ru.

3. **Боровиков В.П., Ивченко Г.И.** Прогнозирование в системе STATISTICA в среде «WINDOWS». – М.: Финансы и статистика, 1999. – 382 с.

4. **Казакевич Д.И.** Основы теории случайных функций и ее применение в гидрометеорологии. – Л.: Гидрометеоиздат, 1977. – 320 с.

5. **КартвелишвилиН.А.** Стохастическая гидрология. – Л.: Гидрометеоиздат, 1981. – 168 с.

6. **Музылев С.В., Привальский В.Е., Раткович Д.Я.** Стохастические модели в инженерной гидрологии. – М.: Наука, 1982. – 184 с.

7. **Дж.Бокс Г.** Дженкинс. Анализ временных рядов: прогноз и управление. Вып. 1. – М.: Мир, 1974. – 408 с.

8. **Дружинин В.С., Сикан А.В.** Методы статистической обработки гидрометеорологической информации. – СПб.: Издательство РГГМУ, 2001. – 170 с.

9. **Митропольский А.К.** Техника статистических вычислений. – М. Изд-во «Наука», 1971. – 576 с.

10. **Андерсон Т.** Статистический анализ временных рядов. Перевод с английского – М.: Изд-во Мир, 1976. – 744 с.

11. **Яглом А.М.** Корреляционная теория стационарных случайных функций. – Л.: Гидрометеоиздат, 1981. – 280 с.

12. **Исмайылов Г.Х., Муращенкова Н.В.** Учение об атмосферы. Опасные природные и техногенные процессы. Методические указания. – М.: Изд-во РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, 2016. – 138 с.

13. **Исмайылов Г.Х., Прошляков И.В., Муращенкова Н.В.** Гидрология в природопользования. Ч. 3. Инженерная гидрология:

References

1. Mnogoletnie ryady mesyachnyh summ sredneoblastnyh osadkov za holodnyj period dlya osnovnoj selskohozyajstvennoj zony SSSR. – L.: Gidrometeoizdat, 1988. – 288 s.

2. Sajt Vsesoyuznogo nauchno-issledovatelskogo instituta gidrometeorologicheskoj informatsii – Mirovoj tsentr dannyh – www.meteo.ru.

3. **Borovikov V.P., Ivchenko G.I.** Prognozirovanie v sisteme STATISTICA v srede "WINDOWS". – M.: Finansy i statistika, 1999. – 382 s.

4. **Kazakevich D.I.** Osnovy teorii sluchajnyh funktsij i ee primenenie v gidrometeorologii. – L.: Gidrometeoizdat, 1977. – 320 s.

5. **Kartvelishvili N.A.** Stohasticheskaya gidrologiya. – L.: Gidrometeoizdat, 1981. – 168 s.

6. **Muzylev S.V., Privalskij V.E., Ratkovich D.Ya.** Stohasticheskie modeli v inzhenernoj gidrologii. – M.: Nauka, 1982. – 184 s.

7. **Dzh. Boks G. Dzhenkins.** Analiz vremennyh ryadov: prognoz i upravlenie. Vyp. 1. – M.: Mir, 1974. – 408 s.

8. **Druzhinin V.S., Sikan A.V.** Metody statisticheskoj obrabotki gidrometeorologicheskoj informacii. – SPb.: Izdatelstvo RGGMU, 2001. – 170 s.

9. **Mitropolskij A.K.** Tekhnika statisticheskih vychislenij. – M. Izd-vo "Nauka", 1971. – 576 s.

10. **Anderson T.** Statisticheskij analiz vremennyh ryadov. Perevod s anglijskogo – M.: Izd-vo Mir, 1976. – 744 s.

11. **Yaglom A.M.** Korrelyatsionnaya teoriya statsionarnyh sluchajnyhfunktsij. – L.: Gidrometeoizdat, 1981. – 280 s.

12. **Ismaiylov G.H., Murashchenkova N.V.** Uchenie ob atmosfery. Opasnyeprirodnye i tekhnogennyeprotsessy. Metodicheskie ukazaniya. – M.: Izd-vo RGAU-MSKHA imeni K.A. Timiryazeva, 2016. – 138 s.

13. **Ismaiylov G.H., Proshlyakov I.V., Murashchenkova N.V.** Gidrologiya v prirodopolzovanii. Chast 3. Inzhenernaya gidrologiya: uchebnik. – M.: Izd-vo RGAU-MSHA imeni K.A. Timiryazeva, 2018. – 218 s.

учебник. – М.: Изд-во РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, 2018. – 218 с.

14. **Овчаров Е.Е., Захаровская Н.Н., Прошляков И.В.** Практикум по инженерной гидрологии и регулированию стока: учебное пособие. – Минск.: Наука, 2008. – 224 с.

15. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. СП 33-101-2003. – М.: Госстрой России, 2004. – 73 с.

16. Пособие по определению расчетных гидрологических характеристик. – Л: Гидрометеоиздат, 1984. – 448 с.

17. **Исмайылов Г.Х., Муращенкова Н.В.** Оценка и прогноз речного стока бассейна р. Волги с учетом возможного изменения климата. Использование и охрана природных ресурсов в России. // ПРИРОДА. – 2018. – № 4. – С. 56-61.

18. **Рождественский А.В.,Чеботарев А.И.** Статистические методы в гидрологии. – Л.: Гидрометеоиздат, 1974. – 424 с.

19. Методические рекомендации по оценке однородности гидрологических характеристик и определению их расчётных значений по неоднородным данным. – СПб.: Изд-во «Нестор-История», 2010. – 182 с.

14. **Ovcharov E.E., Zaharovskaya N.N., Proshlyakov I.V.** Praktikum po inzhenernoj gidrologii i regulirovaniy ustoka: uchebnoe posobie. – Minsk.: Nauka, 2008. – 224 s.

15. Opredelenie osnovnyh raschetnyh gidrologicheskih harakteristik. SP 33-101-2003. – M.: GosstrojRossii, 2004. – 73 s.

16. Posobie po opredeleniyu raschetnyh gidrologicheskih harakteristik. – L: Gidrometeoizdat, 1984. – 448 s.

17. **Ismaiylov G.H., Murashchenkova N.V.** Otsenka i prognoz rechnogo stoka bassejna r. Volgi s uchetom vozmozhnogo izmeneniya klimata. Ispol'zovanie i ohrana prirodnyh resursov v Rossii. // PRIRODA. – 2018. – № 4. – S. 56-61.

18. **Rozhdestvenskij A.V., Chebotarev A.I.** Statisticheskie metody v gidrologii. – L.: Gidrometeoizdat, 1974. – 424 s.

19. Metodicheskiere komendatsii po otsenke odnorodnosti gidrologicheskih harakteristik i opredeleniyu ih raschyotnyh znachenij po neodnorodnym dannym. – SPb.: Izdatelstvo "Nestor-Istoriya", 2010 g. – 182 s.

Критерии авторства

Исмайылов Г.Х., Муращенкова Н.В., Исмайылова И.Г. выполнили теоретические исследования, на основании которых провели обобщение и написали рукопись. Исмайылов Г.Х., Муращенкова Н.В., Исмайылова И.Г. имеют на статью авторское право и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликтов интересов

Статья поступила в редакцию: 17.01.2021 г.

Одобрена после рецензирования 28.01.2021 г.

Принята к публикации 11.02.2021 г.

Criteria of Authorsip

Ismaiylov G.H., Murashchenkova N.V., Ismailova I.G. performed theoretical studies, on the basis of which they conducted a generalization and wrote the manuscript. Ismailov G.H., Murashchenkova N.V., Ismaiylova I.G. have copyright on the article and are responsible for plagiarism.

Conflict of interest

The authors declare that there are no conflicts of interests

The article was submitted to the editorial office 17.01.2021

Approved after reviewing 28.01.2021

Accepted for publication 11.02.2021