

Гидравлика и инженерная гидрология

Оригинальная статья

УДК 556.16

DOI: 10.26897/1997-6011-2023-3-92-96



ОЦЕНКА НОРМАТИВНЫХ РАСЧЕТНЫХ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СТОКА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ РАЗЛИЧНЫХ ЗАКОНОВ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ

Редников Сергей Николаевич, д-р техн. наук., доцент

Scopus Author ID57170810400; ORCID0000-0003-3435-7166; SPIN-код: 6267-1900, Author ID: 119444; srednikov@mail.ru

Наумова Анна Анатольевна ✉, *заведующий лабораторией*

127434 WoS ResearcherID: HSG-1851-2023, Scopus AuthorID: 57339740900; SPIN-код: 9108-7416; AuthorID: 1010469; ORCID: 0000-0002-0373-8655; koshevaya81@mail.ru

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

Аннотация. Водохозяйственные проблемы занимают одно из главенствующих мест в мире. Решение каждой из них определяется гидролого-водохозяйственными исследованиями, выводы которых служат и для определения основных расчетных характеристик, которые применяются для дальнейшего конструктивно-гидротехнического проектирования. Правильное решение гидрологической части проблемы является предпосылкой дальнейшего успеха. Исследовались различия расчетных значений экстремальных величин стока при использовании трехпараметрического гамма-распределения и биномиального распределения Пирсона III типа, которые применяются в практике гидрологических расчетов Российской Федерации. С учетом всех еще малых периодов наблюдений за стоком рек параметры распределения величин стока имеют некоторые погрешности относительно его истинной величины. На ошибки этих параметров влияет выбранный закон распределения. С наибольшей погрешностью, как правило, определяется C_s – коэффициент асимметрии. Проведена оценка статистической погрешности C_s и доказана необходимость коррекции поправок в диапазоне $P = 95-99\%$, которые следует предусмотреть при следующей актуализации нормативных документов, так как погрешность в некоторых случаях достигает 47%.

Ключевые слова: речной сток, данные наблюдений, гидрологические ряды, законы распределения, статистические параметры, квантили, вероятность превышения, коэффициент асимметрии

Формат цитирования: Редников С.Н., Наумова А.А. Оценка нормативных расчетных экстремальных характеристик стока при использовании различных законов распределения // Природообустройство. 2023. № 3. С. 92-96. DOI: 10.26897/1997-6011-2023-3-92-96.

© Редников С.Н., Наумова А.А., 2023

Original article

ASSESSMENT OF NORMATIVE DESIGN EXTREME CHARACTERISTICS OF RUNOFF USING DIFFERENT DISTRIBUTION LAWS

Rednikov Sergey Nikolaevich, *doctor of technical science, associate professor*

Scopus Author ID57170810400; ORCID0000-0003-3435-7166; SPIN-код: 6267-1900, Author ID: 119444; srednikov@mail.ru

Naumova Anna Anatoljevna ✉, head of the laboratory

WoS ResearcherID: HSG-1851-2023, Scopus AuthorID: 57339740900; SPIN-код: 9108-7416; AuthorID: 1010469; ORCID: 0000-0002-0373-8655; koshevaya81@mail.ru

Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy named after C.A. Timiryazev; 127434, Moscow, Timiryazevskaya, 49, Russia

Annotation. Water management problems are among the prior problems in the world. The solution of each of them is determined by hydrological and water management studies, the conclusions of which also serve to determine the main design characteristics that are used for further structural and hydraulic engineering design. The correct solution of the hydrological part of the problem is a prerequisite for further success. The differences between the calculated values of the extreme values of the runoff using the three-parameter gamma distribution and the Pearson type III binomial distribution, which are used in the practice of hydrological calculations of the Russian Federation, were investigated in the work. Considering the still small periods of observations of river flow, the parameters of the distribution of flow values have some errors relative to its true value. The errors of these parameters are affected by the chosen distribution law. As a rule, the asymmetry coefficient is determined with the greatest error. In this paper, an assessment of the statistical error was carried out and the need for correction of corrections in the range $P = 95\% - 99\%$ was proved, which should be provided for at the next update of regulatory documents, since the error in some cases reaches 47%.

Keywords: river flow, observational data, hydrological series, distribution laws, statistical parameters, quantiles, exceedance probability, coefficient of asymmetry

Format of citation: Rednikov S.N., Naumova A.A. Assessment of normative design extreme characteristics of runoff using different distribution laws // Prirodoobustrojstvo. 2023.3. P. 92-96. DOI: 10.26897/1997-6011-2023-3-92-96.

Введение. В действующем нормативном документе по определению основных гидрологических характеристик [1, 2] допускается определять расчетные значения экстремальных расходов воды на основе использования как трехпараметрического гамма-распределения С.Н. Кривого и М.Ф. Менкеля, так и биномиальное распределение Пирсона III типа.

Цель исследований: оценить степень различий расчетных значений экстремальных характеристик стока, полученных с помощью

этих различных законов распределения, применяемых в гидрологических расчетах.

Задачи исследований заключались в том, чтобы определить модульные коэффициенты распределения для экстремальных величин стока на принятые расчетные вероятности их превышения; сравнить численные значения расчетных модульных коэффициентов различных распределений, полученных посредством различных распределений; сравнить полученные различия с точностью измерения характеристик стока.

Материалы и методы исследований. Уравнение плотности вероятностей, принимаемое для рассмотрения, представлена в виде гамма-распределения как функции трех параметров:

$$p(Q, Q_{cp}, \gamma, b) = \left[\frac{\Gamma(\gamma + b)}{\Gamma(\gamma)} \right]^{\frac{\gamma}{b}} (\Gamma(\gamma) | b | Q_{cp}) \left(\frac{Q}{Q_{cp}} \right)^{\frac{\gamma}{b}-1} \exp \left\{ - \left[\frac{Q}{Q_{cp}} \frac{\Gamma(\gamma + b)}{\Gamma(\gamma)} \right]^{\frac{1}{b}} \right\}, \quad (1)$$

где Q_p – среднее значение распределения величины стока реки или какой-либо другой гидрометеорологической характеристики; γ и b – параметры, каждому сочетанию которых соответствуют определенные значения коэффициента вариации C_v и коэффициента асимметрии C_s . Коэффициент вариации C_v выражается следующим трансцендентным уравнением:

$$C_v = \left[\frac{\Gamma(\gamma)\Gamma(\gamma + 2b)}{\Gamma^2(\gamma + b)} - 1 \right]^{0.5} \Gamma(\gamma + b) \quad (2)$$

Коэффициент асимметрии C_s выражается как

$$C_s = \frac{\Gamma^2(\gamma)\Gamma(\gamma + 3b) - 3\Gamma(\gamma)\Gamma(\gamma + 2b) + 2[\Gamma(\gamma)\Gamma(\gamma + 2b)]^{1.5}}{\Gamma^3(\gamma + b)}, \quad (3)$$

где $\Gamma(\gamma), \Gamma(\gamma + b)$ – гамма-функции соответствующих аргументов.

Приведенное распределение получено посредством степенного преобразования общеизвестного гамма-распределения и в частном случае при $b = 1$ совпадает с ним. В гидрологии рассматриваемое распределение характеризуется тремя параметрами: Q_p , C_v и \bar{N}_s .

Достаточным считается ряд наблюдений, если коэффициент вариации N_v и относительная среднеквадратическая ошибка среднего значения не превышают 10% для годового стока. В нормативных документах расчет относительной среднеквадратической ошибки определяется только для среднего значения [1, 3]. Относительная погрешность коэффициента вариации определяется при $C_s / C_v = 2$.

$$\sigma_{C_v} = \frac{C_v}{n + 4C_v^2} \sqrt{\frac{n(1 + C_v^2)}{2}}. \quad (4)$$

В других случаях отношения C_s / C_v погрешность коэффициента вариации определяется по специальным таблицам, которые были получены путем многочисленных статистических испытаний [4].

С учетом относительно малых периодов наблюдений за стоком рек оценка параметров распределения величин стока будет иметь некоторые погрешности относительно его истинной величины. На ошибки этих параметров в первую очередь влияет выбранный закон распределения. С наибольшей погрешностью, как правило, определяется коэффициент асимметрии C_s . В России он оценивается различными способами, причем метод моментов относится к классическому подходу его вычисления (формула 7).

Для гидрологов особое значение имеет кривая распределения Пирсона III типа как первая кривая, внедренная в практику гидрологических расчетов. А. Фостер в 1924 г. впервые опубликовал таблицы распределения Пирсона III типа. Внедрение этой кривой в 1930 г. принадлежит Д.Л. Соколовскому, а в 1938 г. С.И. Рыбкин расширил и уточнил таблицы. Кривые Пирсона до сих пор остаются самыми популярными в мировой практике. К сожалению, у них есть один существенный недостаток: при малых C_s кривые уходят в область отрицательных значений.

В середине 1940 гг. С.Н. Крицкий и М.Ф. Менкель, взяв за основу кривую распределения Пирсона III типа, решили эту задачу, принимая $\bar{N}_s = 2\bar{N}_v$ (двухпараметрическое Г-распределение), и кривая стала совпадать с кривой Пирсона.

Для увеличения точности оценки характеристики стока использовали уравнение

плотности вероятностей кривой биномиального распределения Пирсона III типа, которое можно представить как

$$y = y_0 e^{\frac{x}{d}} \left(1 + \frac{x}{d}\right)^{\frac{a}{d}}, \quad (5)$$

где y – значение ординаты кривой распределения (частоты); y_0 – модальная ордината кривой; e – основание натуральных логарифмов; x – переменные значения рассматриваемой гидрологической характеристики (абсциссы кривой распределения); d – радиус асимметрии.

В случае использования трехпараметрического гамма-распределения модульный коэффициент K_p выбираем из таблиц распределения [5] в зависимости от C_v , C_s , P .

В случае биномиального распределения модульный коэффициент вычисляется следующим образом:

$$K_p = \Phi C_v + 1, \quad (6)$$

где Φ – нормированное отклонение от среднего значения в рамках проинтегрированной таблицы распределения Пирсона III типа [1].

Соответственно основные параметры статистического ряда наблюдения (C_v , C_s) за N лет наблюдений ($i = 1 + N$) можно оценивать по формулам:

$$C_s = \frac{N \sum (K_i - 1)^3}{C_v^3 (N - 1)(N - 2)}; C_v = \sqrt{\frac{\sum (K_i - 1)^2}{N - 1}}, \quad (7)$$

где \sum – знак суммы относительно количества членов ряда (от $i = 1$ до $i = n$); Q_i и Q_p – расходы воды соответственно за каждый i -й год и среднее значение; σ_Q – среднеквадратическое отклонение.

Чаще всего для рядов экстремальных величин расходов воды, максимальных объемов весеннего половодья и других экстремальных гидрометеорологических характеристик коэффициент вариации принимают в пределах $C_v = 0.3 \div 0.8$ при различных соотношениях $C_s / C_v = 0.5 \div 5$. В данном случае расчеты производим при $C_v = 4$ (в большинстве случаев наблюдаемые ряды экстремальных расходов воды обладают несущественным отличием от этой величины) [9]. Для рассматриваемых законов распределения случайных величин принимались следующие соотношения: $\bar{N}_s = 0.5C_v$; $C_s = C_v$; $C_s = 3C_v$; $C_s = 4C_v$; $C_s = 5C_v$.

Результаты и их обсуждение. Для каждого параметра (Q_p , C_v и C_s) имеются разработанные методы оценки их статистических погрешностей, а для максимальных расходов есть методы оценок погрешностей и относительно квантилей распределения малой вероятности превышения [5]. Исследования, проведенные методом

Монте-Карло, говорят о том, что стабилизация численной оценки коэффициента асимметрии начинается только после моделирования 300-го летнего ряда. Однако оценка статистической погрешности третьего параметра (C_s) при обычно имеющихся рядах наблюдений (30-100 лет) соизмерима с самим этим параметром [6, 7], поэтому полностью состоятельными оценками погрешностей квантилей редкой повторяемости (0,01-% и 95-99%) [8, 10] считать не приходится. В исследованиях за меру допустимой погрешности нами взята погрешность измерения расходов воды, которая составляет не менее 10% от измеренного значения [11].

Полученные при проведении расчетов по предложенной методике относительные различия двух сравниваемых значений расчетных

модульных коэффициентов K_p и K_p^* , %, определялись как

$$\xi = \frac{K_p - K_p^*}{K_p} 100\%. \quad (8)$$

Результаты вычислений представлены в таблице.

На основании данных таблицы можно заключить, что точность измерений рассматриваемых характеристик превышает принятую в практике гидрологических расчетов величину 10% при $P = 0,01\%$ и $P = 99\%$.

Альтернативным путем рассмотрения распределения обладающим не меньшей точностью прогнозирования результатов [12] является использование нейронных сетей. Эксперименты авторов подтверждены в других публикациях [13].

Таблица. Численные значения параметров C_s и ξ при $P = 0,01\%$; $P = 0,1\%$; $P = 95\%$ и $P = 99\%$

Table. Numerical values of the parameters C_s and ξ at $P = 0.01\%$; $P = 0.1\%$; $P = 95\%$ and $P = 99\%$

P = 0,01%					
C_s	0,2	0,4	1,2	1,6	2
ξ	-7,28228	-5,06329	6,6	12,89501	14,61251
P = 0,1%					
C_s	0,2	0,4	1,2	1,6	2
ξ	-4,33673	-2,5974	2,941176	4,510801	4,340071
P = 95%					
C_s	0,2	0,4	1,2	1,6	2
ξ	-1,63043	0	-3,37302	-7,32143	-11,2903
P = 99%					
C_s	0,2	0,4	1,2	1,6	2
ξ	47,65625	21,80851	-12,1429	-19,8077	-25,4967

Выводы

В нормативном документе «Определение основных расчетных гидрологических характеристик» предусмотрены поправки к квантилям максимальных расходов вероятностью превышения в пределах $P = 0,01-1\%$, полученные с учетом данных экспериментальных выборок до 1984 г.

Список использованных источников

- СП 33-101-2003. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. М.: Госстрой России, ФГУП ЦПП, 2004. 77 с.
- Statistical methods in the Atmospheric Sciences / Ed.R. Dmowska, D. Hartman, H.T. Rossby // Inter. Geoph. Series. 2011. Vol. 1. Oxford, OX51GB, UK. 668 p.
- Сикан А.В., Щеглов Д.А. Оценка погрешностей выборочных параметров распределения гидрологических рядов // Четвертые Виноградские чтения. Гидрология от познания к мировоззрению: Сборник докладов Международной научной конференции. Санкт-Петербург, 23-31 октября 2020 г. / Санкт-Петербургский государственный университет.

В наших исследованиях необходимость таких поправок подтверждается. С учетом увеличения рассматриваемой базы данных доказана необходимость коррекции поправок в диапазоне $P = 95-99\%$, что следует предусмотреть при следующей актуализации этих нормативных документов.

References

- SP 33-101-2003. Determination of the main calculated hydrological characteristics. Moscow: Gosstroy Rossii, FSUE CPP. 2004.77 p.
- Statistical methods in the Atmospheric Sciences / Ed.R. Dmowska, D. Hartman, H.T. Rossby // Inter. Geoph. Series. 2011. Vol. 1. Oxford, OX51GB, UK. 668 p.
- Sikan A.V., Shcheglov D.A. Estimation of errors in the selection parameters of the distribution of hydrological series. Hydrology from cognition to worldview: a collection of reports of the international scientific conference. St. Petersburg, October 23-31, 2020 / St. Petersburg State University. SPb.: OOO "Izdatelstvo VVM", 2020. S. 530-535. – EDNSQBBIW

СПб.: ООО «Издательство ВВМ», 2020. С. 530-535. EDNSQBBIW.

4. **Блохинов Е.Г.** Распределение вероятностей величин речного стока. М.: Наука, 1974. 169 с.

5. Пособие по определению расчетных гидрологических характеристик. Л.: Гидрометиздат, 1984. 448 с.

6. **Ильинич В.В.** Анализ нестандартных параметров для оценки асимметрии распределения случайных величин // Вестник Международной общественной академии экологической безопасности и природопользования. 2008. № 3 (10). С. 61-70.

7. **Косевой А.П.** Оценка изменения максимальных суточных осадков за последние десятилетия в Черноземной зоне РФ на примере Курской и Липецкой областей // Актуальные вопросы современной науки: теория, технология, методология и практика: сборник научных статей по материалам X Международной научно-практической конференции, Уфа, 27 декабря 2022 г. Ч. 4. Уфа: Научно-издательский центр «Вестник науки», 2022. С. 240-245. EDN YMWPFN.

8. **Рождественский А.В., Ежов А.В., Сахарюк А.В.** Оценка точности гидрологических расчетов. Л.: Гидрометиздат, 1990. 275 с.

9. **Ильинич В.В.** Оценка асимметрии в рамках трехпараметрического гамма-распределения // Природообустройство. 2010. № 5. С. 71-74.

10. **Карпенко Н.П.** Оценка влияния изменения характеристик экстремальных ливневых дождей на надежность гидротехнических сооружений // Природообустройство. 2021. № 4. С. 99-105. DOI: 10.26897/1997-6011-2021-4-99-105. EDN EISNAA.

11. Assessment of surface moisture in the catchment area on the base of modelling the hydrological properties of soils / V.V. Ilinich, A.G. Bolotov, E.V. Shein, S.V. Makarychev // HIC. 2018. 13th International Conference on Hydroinformatics, Palermo, 1-6 июля 2018 г. Palermo: University Campus of Palermo, 2018. Vol. 3. Pp. 931-935. EDN JOPVZI.

12. **Ашихмин В.Н., Гитман М.Б., Келлер И.Э. и др.** Введение в математическое моделирование: Учебное пособие. М.: Логос, 2016. 440 с. EDN ZUYLQX.

13. Assessment of the Impact of Changes in Storm Rainfall and Landscape Characteristics on the Maximum Flow of Small Rivers / V. Ilinich, A. Perminov, A. Belolybcev, A. Naumova // Springer Water. 2020. Pp. 717-725. DOI: 10.1007/978-981-15-5436-0_55.

Критерии авторства

Редников С.Н., Наумова А.А. выполнили теоретические и прикладные 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 конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 06.03.2023

Одобрена после рецензирования 25.05.2023

Принята к публикации 25.05.2023

4. **Blokhinov E.D.** Distribution of probabilities of river flow values. Moscow: Nauka, 1974. 169 p.

5. A manual for determining the calculated hydrological characteristics. Leningrad: Gidrometizdat, 1984. 448 p.

6. **Ilyinich V.V.** Analysis of non-standard parameters for assessing the asymmetry of the distribution of random variables // Bulletin of the International Public Academy of Environmental Safety and Nature Management. 2008. No 3 (10). S. 61-70.

7. **Koshevoy A.P.** Assessment of changes in maximum daily precipitation over the past decades in the Chernozem zone of the Russian Federation, on the example of the Kursk and Lipetsk regions // Actual issues of modern science: theory, technology, methodology and practice: Collection of scientific articles based on the materials of the X International Scientific and Practical Conference, Ufa, December 27, 2022. Part 4. Ufa: Scientific and Publishing Center "Bulletin of Science", 2022. S. 240-245. – EDN YMWPFN.

8. **Rozhdestvensky A.V., Ezhov A.V., Sakharuyk A.V.** Assessment of the accuracy of hydrological calculations. Leningrad: Gidrometizdat, 1990. 275 p.

9. **Ilyinich V.V.** Estimation of asymmetry within the framework of a three-parameter gamma distribution. 2010. No 5. P. 71-74.

10. **Karpenko N.P.** Assessment of the impact of changes in the characteristics of extreme rainfall showers on the reliability of hydraulic structures. // Environmental Engineering. 2021. No 4. S. 99-105. – DOI: 10.26897/1997-6011-2021-4-99-105. – EDN EISNAA.

11. Assessment of surface moisture in the catchment area on the base of modelling the hydrological properties of soils / V.V. Ilinich, A.G. Bolotov, E.V. Shein, S.V. Makarychev // HIC2018. 13th International Conference on Hydroinformatics, Palermo, 01-06 July, 2018. Vol. 3. Palermo: University Campus of Palermo, 2018. P. 931-935. – EDN JOPVZI.

12. Introduction to mathematical modeling: a textbook / V.N. Ashikhmin, M.B. Gitman, I.E. Keller [and others]. Moscow: Logos, 2016. 440 p. – ISBN978-5-98704-637-1. – EDN ZUYLQX.

13. Assessment of the Impact of Changes in Storm Rainfall and Landscape Characteristics on the Maximum Flow of Small Rivers / V. Ilinich, A. Perminov, A. Belolybcev, A. Naumova // Springer Water. 2020. P. 717-725. – DOI 10.1007/978-981-15-5436-0_55.

Criteria of authorship

Rednikov S.N., Naumova A.A. carried out theoretical and applied studies, on the basis of which they generalized and wrote the manuscript. Rednikov S.N., Naumova A.A. 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 06.03.2023

Approved after peer reviewing 25.05.2023

Accepted for publication 25.05.2023