

## СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ СТОКА РЕКИ МАЛЫЙ ЧЕРЕМШАН

Д.А. Семанов, канд. хим. наук, науч. сотр.

О.Н. Урбанова, ст. науч. сотр.

Институт проблем экологии и недропользования АН РТ  
(Россия, г. Казань)

DOI:10.24411/2500-1000-2019-11408

**Аннотация.** На основе данных по годовым, месячным и суточным расходам воды реки Малый Черемшан построены кривые обеспеченности, сглаживание и экстраполяция которых проведена двумя типами распределения – трехпараметрическим и логнормальным. При достаточности данных оба типа распределения обеспечивают оценки одного порядка с отклонением, не превышающим погрешностей исходных данных. Но логнормальное распределение оказывается предпочтительнее в виду большей простоты способа оценки и лучшей предсказательной способности, особенно на концах кривых, по сравнению с трехпараметрическим гамма-распределением.

**Ключевые слова:** параметры стока, ординаты кривой обеспеченности, трёхпараметрическое гамма-распределение, логнормальное распределение, фактические процентиля.

Использование водных ресурсов рек основано на расчете необходимого количества воды, протекающего по речному руслу через расчетный створ в определенные промежутки времени (минуту, час, сутки, год, многолетний период). Сложность расчета состоит в непрерывной изменчивости речного стока, что исключает возможность его определения путем однократных измерений. Но даже длительные систематические измерения, позволяющие вычислить средние многолетние величины речного стока, в силу различных причин могут быть не достаточными для расчета значений стока редкой (вероятностной) повторяемости.

Определяются вероятностные значения гидрологических характеристик методами математической статистики, базирующимися на теоремах теории вероятности и, в частности, законе больших чисел. Продолжительность ряда наблюдений при этом считается достаточной для расчетов, если средняя квадратичная ошибка расчетного значения статистического ряда не превышает 10% для годового и сезонного стока и 20% для максимального и минимального стока [1, 2].

Основной традиционной формой представления результатов расчетов является кривая обеспеченности, с помощью кото-

рой определяются характерные расходы воды расчетной вероятности. Такой подход закреплен в нормативных документах (СН435-72, СП33-101-2003), где приводятся основные методы определения расчетных гидрологических характеристик, в основе которых лежат гидрометрические данные наблюдений. Однако используемые при построении кривых обеспеченности подходы не всегда позволяют адекватно экстраполировать сами значения обеспеченностей до 1% и свыше 99%, тем более оценивать ошибку в их определении, особенно в настоящее время, когда все чаще отмечаются изменения режима рек, проявляющиеся с различной интенсивностью. Субъективная оценка этих изменений ненадежна и часто усматривает изменения там, где они могут быть результатом случайных сочетаний, так как колебания годового стока не имеют определенных закономерностей и не являются функцией времени.

Анализ многолетнего ряда данных, используемый для расчета обеспеченных гидрологических характеристик, позволяет выбрать ту часть значений, которая лучше всего отражает современный гидрологический режим реки. Такой ранжированный ряд значений за ограниченный период наблюдений рассматривается как выборка

(часть) из более длинного ряда (генеральной совокупности) данных. Таких выборок может быть несколько, но для каждой из них определяют параметры распределения и обеспеченность характеристик с последующим усреднением и определением разброса получившихся значений. Наибольший интерес при этом представляют величины редкой повторяемости (в зонах верхней и нижней квантилях кривой обеспеченности). Учитывая недостаточность наблюдений в этих зонах, ошибки их определения могут достигнуть 100-200% и более. Поэтому в гидрологии широко применяют аналитические функции распределения, которые наилучшим образом отвечают не только случайным выборкам, но и всему процессу колебаний характеристик стока в целом. Авторами был предложен упрощённый, но эффективный подход определения параметров распределения гидрологических характеристик, а также оценки их изменчивости, основанный на принципе случайного исключения некоторой части данных и количества выборок, генерируемых из исходного набора значений [3].

Для сглаживания и экстраполяции кривых обеспеченностей, как правило, применяются трехпараметрическое и логнормальное распределение, имеющие предел простираения случайной переменной от нуля и до бесконечности. Сопоставление ординат кривых обеспеченности, экстраполированных по этим типам распределения, и выбор той, которая наиболее точно отражает значения максимальных и мини-

мальных гидрологических характеристик, явилось целью проведенного исследования.

#### Материалы и методы исследования

Для получения параметров статистического распределения гидрологических характеристик р. Малый Черемшан в створе стационарных наблюдений, расположенном у с. Абалдуровка (код поста 77217) использовались годовые, месячные и ежедневные расходы воды. Для сглаживания и экстраполяции кривых распределения ежегодных вероятностей превышения применялись трехпараметрическое и логнормальное распределения широко распространенные в России и рекомендуемые СНиП СП 33-101-2003. Расчёт эмпирической вероятности проводился методом квантилей Г.А. Алексеева, применяемой при обобщениях характеристик гидрологического режима по множеству объектов и в теоретических расчетах [4]. Обработка и анализ исходных данных выполнен с помощью программы, написанной на языке python (версия 2.72).

#### Результаты исследования

На основе данных по средним годовым расходам воды поста Малый Черемшан-Абалдуровка построена кривая обеспеченности, сглаживание и экстраполяция которой проведена как трехпараметрическим, так и логнормальным распределением. Рассчитанные ординаты кривой обеспеченности и значения средних годовых расходов воды р. Малый Черемшан приведены в таблице 1.

Таблица 1. Ординаты кривой обеспеченности и годовые расходы воды

	P 1%	P 50%	P 75%	P 95%	P 99%
Трёхпараметрическое гамма-распределение	2.23	0.68	0.39	0.13	0.05
Логнормальное распределение	3.33	0.60	0.37	0.18	0.11
Фактические процентиля	6.04	0.59	0.32	0.19	0.14

Сопоставление полученных результатов показывает, что при обоих типах распределения наибольшие расхождения в значении ординат существуют на концах кривых в зонах экстремальных значений (P1%, P99%). В средней же части кривой отмечаются наиболее устойчивые параметры. Их устойчивость очень важна в случае пе-

ренесения значений методом аналогии на неизученные реки, что в практике гидрологических расчетов является очень распространенным.

Проведенные расчеты ординат кривой обеспеченности средних годовых расходов воды р. Малый Черемшан показали, что фактически любой из типов распределения

обеспечивает оценки одного порядка с отклонением, не превышающим погрешностей исходных данных. По этой причине подход с нормализацией исходных данных, обеспечивающий более простой способ оценки обеспеченности (логнормальное распределение), оказывается предпочтительнее, т.е. показывает не худшую предсказательную способность по сравнению с трехпараметрическим гамма-распределением [5].

Кривая обеспеченности средних годовых расходов отражает их распределение в

многолетней перспективе. Но с точки зрения использования речных ресурсов необходимо установить закономерности их внутригодового распределения. В данном исследовании расчет внутригодового распределения стока р. Малый Черемшан был сделан путем построения кривой обеспеченности средних месячных расходов воды. Сглаживание и экстраполяция кривой проведена теми же приемами, что и для получения характерных обеспеченных годовых значений расходов (рис. 1).

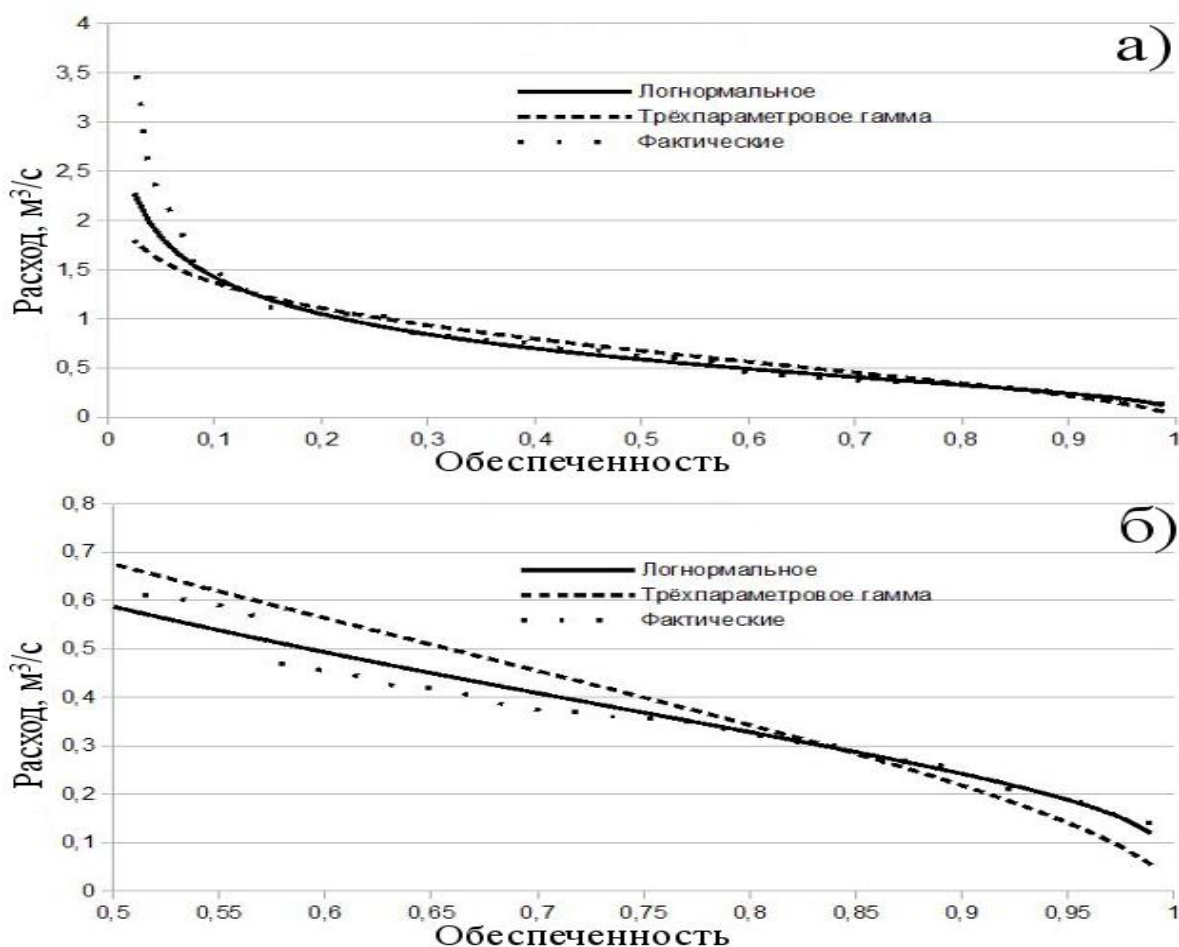


Рис. 1. а) кривая обеспеченности средних месячных расходов воды по посту Малый Черемшан-Абалдуевка; б) фрагмент правой части кривой

Ординаты кривой распределения и средние месячные расходы воды р. Малый Черемшан представлены в таблице 2.

Таблица 2. Ординаты кривой обеспеченности и месячные расходы воды

	P 50%	P 75%	P 95%	P 99%	P 1%
Трёхпараметрическое гамма распределение (Фактические проценти)					
Январь	0.58 (0.56)	0.37 (0.34)	0.17 (0.20)	0.09	1.79
Февраль	0.52 (0.50)	0.34 (0.33)	0.17 (0.20)	0.09	1.59
Март	1.60 (0.76)	0.48 (0.42)	0.03 (0.23)	0.00	9.49
Апрель	37.09 (36.50)	26.17 (28.99)	14.72 (13.98)	9.18	96.83
Май	3.08 (2.64)	1.69 (1.69)	0.52 (0.75)	0.19	10.99
Июнь	0.89 (0.69)	0.48 (0.47)	0.15 (0.21)	0.05	3.42
Июль	0.63 (0.54)	0.36 (0.33)	0.12 (0.15)	0.05	2.26
Август	0.68 (0.62)	0.39 (0.36)	0.14 (0.19)	0.05	2.23
Сентябрь	0.61 (0.62)	0.36 (0.32)	0.14 (0.19)	0.06	2.00
Октябрь	1.01 (0.81)	0.56 (0.54)	0.18 (0.32)	0.07	3.25
Ноябрь	0.99 (0.98)	0.62 (0.60)	0.28 (0.31)	0.14	3.16
Декабрь	0.80 (0.66)	0.47 (0.46)	0.18 (0.24)	0.07	2.61
Логнормальное распределение (Фактические проценти)					
Январь	0.55 (0.56)	0.36 (0.34)	0.20 (0.20)	0.14	2.20
Февраль	0.50 (0.50)	0.34 (0.33)	0.19 (0.20)	0.13	1.93
Март	1.07 (0.76)	0.44 (0.42)	0.12 (0.23)	0.05	23.48
Апрель	35.8 (36.50)	25.94 (28.99)	16.31 (13.98)	11.78	108.82
Май	2.81 (2.64)	1.58 (1.69)	0.69 (0.75)	0.39	20.46
Июнь	0.78 (0.69)	0.45 (0.47)	0.21 (0.21)	0.12	5.12
Июль	0.57 (0.54)	0.34 (0.33)	0.16 (0.15)	0.09	3.53
Август	0.61 (0.62)	0.37 (0.36)	0.18 (0.19)	0.11	3.38
Сентябрь	0.57 (0.62)	0.35 (0.32)	0.17 (0.19)	0.10	3.11
Октябрь	0.90 (0.81)	0.52 (0.54)	0.24 (0.32)	0.14	5.87
Ноябрь	0.97 (0.98)	0.58 (0.60)	0.28 (0.31)	0.16	5.76
Декабрь	0.73 (0.66)	0.45 (0.46)	0.23 (0.24)	0.14	3.76

Анализ полученных данных показывает, что р. Малый Черемшан характеризуется выраженным весенним половодьем, которое составляет значительную часть годового стока и характеризуется большой изменчивостью как по срокам наступления и продолжительности, так и по ежегодному объему. Месячный максимум стока весеннего половодья приходится на апрель. Применение логнормального распределения лучше выделяет период весеннего половодья не только по величинам расходов воды, но и по времени их прохождения (март-май с максимумом в апреле), что важно с практической точки зрения. Определить даты начала и окончания весеннего половодья с точностью 1-6 дней в 76-80% рассмотренных случаев возможно методом определения элементов весеннего половодья, предложенным авторами, когда по

гидрографу весеннего стока р. Малый Черемшан более точно установлено наступление основных фаз половодья и значений параметров стока [6].

В гидрологическом режиме р. Малый Черемшан основной период занимает межень, характеризующаяся небольшими по величине расходами воды. В практическом отношении в меженный период года часто необходима детализация распределения расходов по декадам или суткам с учетом продолжительности стояние минимального стока. Определение внутригодового распределения суточного речного стока воды также производится путем построения кривой обеспеченности суточных (ежедневных) расходов воды, которая отражает истинное распределение стока за многолетний период (рис. 2).

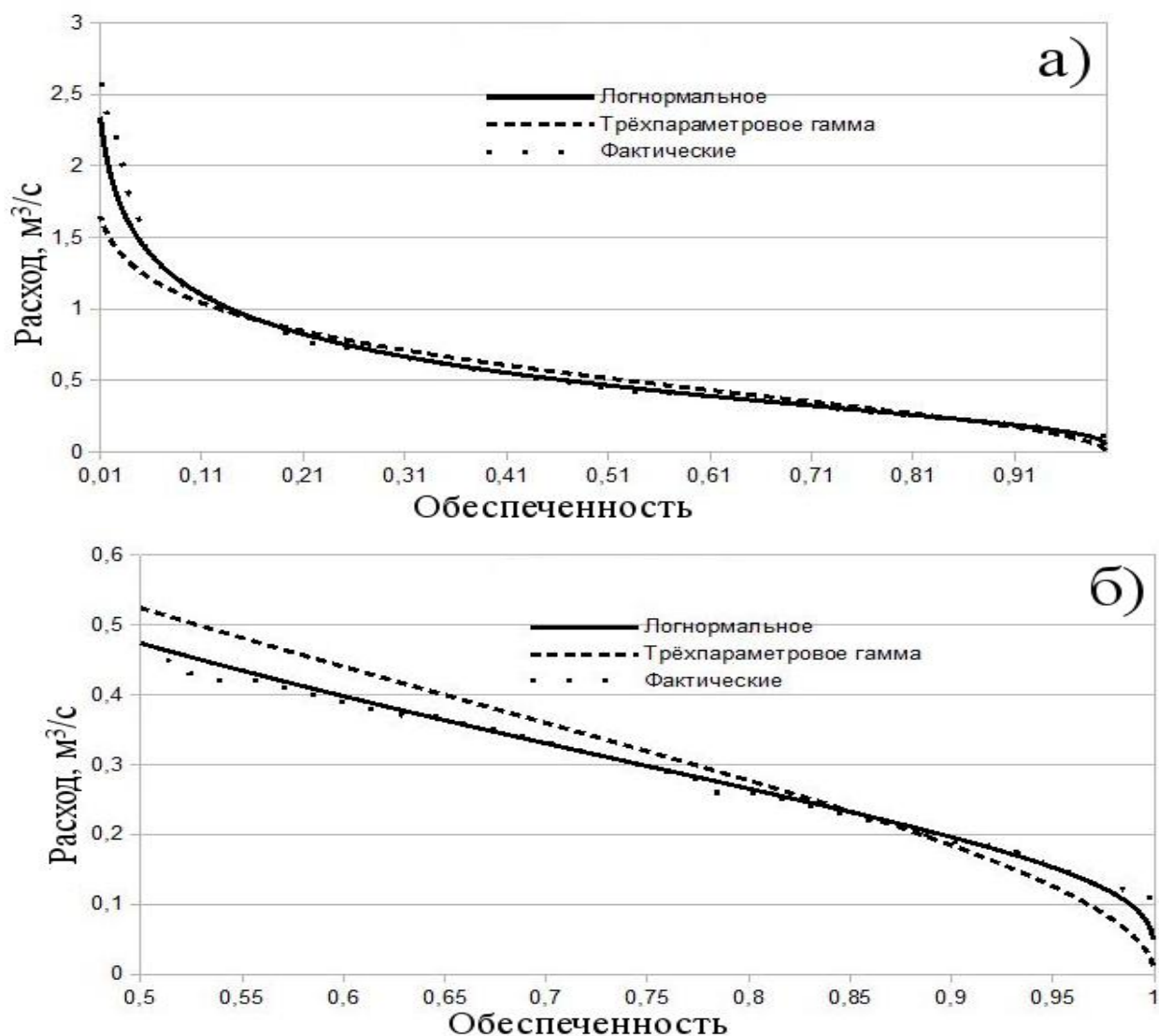


Рис. 2. а) кривая обеспеченности суточных расходов воды по посту Малый Черемшан-Абалдуевка; б) фрагмент правой части кривой

Для аналитического выражения кривой применены те же два типа распределения, результаты которого представлены в таблице 3.

Таблица 3. Ординаты кривой обеспеченности и ежедневные расходы воды

	Р 1%	Р 50%	Р 75%	Р 95%	Р 99%
Трёхпараметрическое гамма-распределение	5.55	1.53	0.45	0.03	0.002
Логнормальное распределение	16.7	0.89	0.38	0.11	0.05
Фактические проценти	97.6	0.69	0.41	0.22	0.12

Кривые обеспеченности ежедневных расходов воды, являясь кривыми обеспеченности фазово-разнородных величин, трудно поддаются обобщению и аналити-

ческому описанию. Ординаты кривых обеспеченностей ежедневных расходов воды, объединенных по месяцам, представлены в таблице 4.

Таблица 4. Ординаты кривых обеспеченностей ежедневных расходов р. Малый Черемшан

	P 50%	P 75%	P 95%	P 99%	P 1%
Трёхпараметрическое гамма распределение (Фактические процентиля)					
Январь	0.58 (0.53)	0.37 (0.35)	0.17 (0.23)	0.09 (0.16)	1.79 (2.43)
Февраль	0.52 (0.50)	0.34 (0.33)	0.17 (0.25)	0.09 (0.16)	1.59 (1.67)
Март	1.60 (0.62)	0.48 (0.41)	0.03 (0.24)	0.00 (0.19)	9.49 (91.98)
Апрель	37.09 (15.10)	26.17 (4.66)	14.72 (0.75)	9.18 (0.32)	96.83 (255.8)
Май	3.08 (1.68)	1.69 (0.97)	0.52 (0.42)	0.19 (0.24)	10.99 (26.55)
Июнь	0.89 (0.65)	0.48 (0.40)	0.15 (0.11)	0.05 (0.08)	3.42 (4.73)
Июль	0.63 (0.51)	0.36 (0.30)	0.12 (0.13)	0.05 (0.09)	2.26 (4.78)
Август	0.68 (0.45)	0.39 (0.29)	0.14 (0.16)	0.05 (0.12)	2.23 (2.64)
Сентябрь	0.61 (0.49)	0.36 (0.31)	0.14 (0.17)	0.06 (0.13)	2.00 (5.79)
Октябрь	1.01 (0.67)	0.56 (0.46)	0.18 (0.28)	0.07 (0.23)	3.25 (21.49)
Ноябрь	0.99 (0.88)	0.62 (0.58)	0.28 (0.32)	0.14 (0.23)	3.16 (23.75)
Декабрь	0.80 (0.64)	0.47 (0.43)	0.18 (0.26)	0.07 (0.16)	2.61 (7.43)
Логнормальное распределение (Фактические процентиля)					
Январь	0.55 (0.53)	0.37 (0.35)	0.21 (0.23)	0.14 (0.16)	1.65 (2.43)
Февраль	0.52 (0.50)	0.36 (0.33)	0.21 (0.25)	0.15 (0.16)	1.85 (1.67)
Март	0.81 (0.62)	0.37 (0.41)	0.12 (0.24)	0.05 (0.19)	12.68 (91.98)
Апрель	13.73 (15.10)	4.65 (4.66)	0.98 (0.75)	0.33 (0.32)	575.0 (255.8)
Май	1.79 (1.68)	0.94 (0.97)	0.37 (0.42)	0.20 (0.24)	16.38 (26.55)
Июнь	0.65 (0.65)	0.36 (0.40)	0.15 (0.11)	0.08 (0.08)	5.00 (4.73)
Июль	0.53 (0.51)	0.30 (0.30)	0.13 (0.13)	0.08 (0.09)	3.75 (4.78)
Август	0.52 (0.45)	0.31 (0.29)	0.15 (0.16)	0.09 (0.12)	2.94 (2.64)
Сентябрь	0.47 (0.49)	0.30 (0.31)	0.15 (0.17)	0.10 (0.13)	2.34 (5.79)
Октябрь	0.78 (0.67)	0.44 (0.46)	0.20 (0.28)	0.11 (0.23)	5.32 (21.49)
Ноябрь	0.92 (0.88)	0.55 (0.58)	0.26 (0.32)	0.16 (0.23)	5.51 (23.75)
Декабрь	0.73 (0.64)	0.44 (0.43)	0.22 (0.26)	0.13 (0.16)	3.98 (7.43)

Сопоставление полученных ординат кривых экстраполированных по двум типам распределения показывает, что в пределах обеспеченности 10-90% их расхождение не превышает 15-20%, в то время как крайние расходы отличаются значительно. Отмечено существенное различие не только значений ординат кривых, но и их отличие от фактических процентилей. Различия возникают не только в месяцы с признаками половодья, но отмечаются даже разовые увеличения расходов воды в осенние паводки, наблюдающиеся в октябре и ноябре. Существенно меняются и фактические значения 1% и 5% обеспеченности. Фактическое деление исходных данных на 2 выборки с наличием половодья и без него для весенних месяцев приводит к ошибкам при попытке описания их в виде одной общей функцией распределения. Описание этих месяцев с помощью функций распределения требует разделения данных на дни с половодьем и дни без половодья. В какой-то степени мешает и формальное деление по месяцам.

### Заключение

Гидрометрические данные длительных наблюдений служат основой гидрологических расчетов, позволяющих устанавливать связь между значением гидрологической характеристики и ее повторяемостью. Формой представления такой связи является кривая обеспеченности, с помощью которой определяются характерные обеспеченные расходы воды.

Для получения параметров статистического распределения гидрологических характеристик р. Малый Черемшан использовались годовые, месячные и ежедневные расходы воды. Эти данные представляют собой выборки из генеральной совокупности величин, истинные параметры которой неизвестны. Продолжительность ряда наблюдений (78 лет) авторы посчитали достаточной для установления нормы стока реки, но даже это не дает гарантии, что данный интервал охватывает все возможные максимальные и минимальные значения стока.

Сопоставление ординат кривых обеспеченности годового, месячного и суточного стока реки Малый Черемшан показывают, что оба приема их экстраполяции дают близкие значения ординат при установлении обеспеченных расходов средних и маловодных лет и расхождения между ними находятся в пределах практической точности метода. Наиболее высокое и низкое значение ординат получаются при использовании логнормального распределения, в то время как трёхпараметрическое гамма-распределение дает несколько заниженные

результаты по соответствию натурным данным.

Это подтверждает возможность оценки речного стока малых рек с помощью логнормального распределения, удовлетворительно сглаживающего большинство эмпирических кривых для получения более близких к фактическим обеспеченным максимальным и минимальным расходам воды. Для более надёжной оценки возможных максимальных суточных расходов необходимо разделения данных на дни с половодьем и дни без половодья.

#### Библиографический список

1. СП 33-101-2003. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. – М.: Госстрой России. ФГУП ЦПП. 2004. – 73 с.
2. *Пособие по определению* расчетных гидрологических характеристик. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1984. – 448 с.
3. Горшкова А.Т., Семанов Д.А., Урбанова О.Н. Оценка влияния отсутствия данных на расчет кривых обеспеченности // *Международный журнал гуманитарных и естественных наук*. – 2018. – №3. – С. 47-54.
4. Крицкий С.Н., Менкель М.Ф. *Гидрологические основы речной гидротехники*. Изд. АН СССР. 1950.
5. Семанов Д.А., Горшкова А.Т., Урбанова О.Н. Влияние вида статистического распределения на качество достоверности кривых обеспеченности // *Международный журнал гуманитарных и естественных наук*. – 2018. – №7. – С. 30-35.
6. Семанов Д.А., Урбанова О.Н. Региональный подход к определению элементов весеннего половодья на реке Малый Черемшан // *Международный журнал гуманитарных и естественных наук*. – 2019. – № 5-2. – С. 9-14.

### STATISTICAL EVALUATION OF PARAMETERS OF THE RIVER RIVER SMALL CHEREMSHAN

**D.A. Semanov**, *Candidate of Chemical Sciences*

**O.N. Urbanova**, *Senior Researcher*

**Research Institute for Problems of Ecology and Mineral Wealth Use (Russia, Kazan)**

**Abstract.** *On the basis of data on annual, monthly and daily water consumption of the Malyi Cheremshan river, curves of security, smoothing and extrapolation of which are carried out by two types of distribution – three-parameter and lognormal. If the data are sufficient, both types of distribution provide estimates of the same order with a deviation not exceeding the errors of the original data. But the lognormal distribution is preferable in view of the greater simplicity of the method of estimation and the better predictive ability, especially at the ends of the curves, compared with the three-parameter gamma distribution.*

**Keywords:** *parameters of runoff, ordinates of the curve of the securities, three-parameter gamma distribution, lognormal distribution, actual percentile.*