



Научная статья

МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К ОЦЕНКЕ МАКСИМАЛЬНОГО СТОКА РЕДКОЙ ПОВТОРЯЕМОСТИ РАВНИННЫХ РЕК КАЗАХСТАНА В УСЛОВИЯХ СТАТИСТИЧЕСКОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

Марат М. Молдахметов  к.г.н

Международный Таразский инновационный институт имени Ш. Муртаза, Тараз, Казахстан; mmoldahmetov64@mail.ru

Автор корреспонденции: mmoldahmetov64@mail.ru

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

максимальный сток, редкая повторяемость, кривая обеспеченности, статистическая неопределенность, усеченная кривая обеспеченности, распределение Пирсона III, обобщенное экстремальное распределение (GEV), равнинные реки Казахстана

АБСТРАКТ

Оценка максимального стока редкой повторяемости является одной из ключевых задач инженерной гидрологии, поскольку расчетные расходы воды с обеспеченностью 1 %, 0,5 % и менее непосредственно используются при проектировании и эксплуатации гидротехнических сооружений, мостов, водопропускных устройств и систем противопаводковой защиты. В инженерной практике такие характеристики, как правило, определяются на основе параметрических статистических распределений с экстраполяцией эмпирических рядов в область малых вероятностей превышения. Однако при ограниченной длине рядов наблюдений и выраженной асимметрии распределения максимального стока подобная экстраполяция сопровождается значительной статистической неопределенностью и может приводить к методически некорректным и физически трудно интерпретируемым результатам. Методическое преимущество усеченного подхода оценивалось по критериям RMSE в статистически надежной части распределения, устойчивости хвостовой экстраполяции и физической интерпретируемости расчетных расходов. Количественная оценка статистической неопределенности выполнена с использованием доверительных интервалов вероятности превышения при конечной длине ряда наблюдений. В работе рассмотрены методические подходы к оценке максимального годового стока редкой повторяемости равнинных рек Казахстана в условиях статистической неопределенности. Анализ выполнен на основе многолетних рядов максимальных расходов воды по рекам Жайык), Есиль, Тобыл и Илек. Наряду с классическим параметрическим подходом, основанным на распределении Пирсона III, применены усеченная графо-аналитическая методика построения кривых обеспеченности и обобщенное экстремальное распределение (GEV).

Показано, что использование распределения Пирсона III приводит к систематическому занижению расчетных расходов обеспеченности 1 % на 12,5...25 % по сравнению с усеченной кривой обеспеченности. Установлено, что применение GEV с параметризацией методом максимального правдоподобия (MLE) для равнинных рек может приводить к неустойчивому поведению хвостовой части распределения и завышению редких расходов воды, тогда как GEV, параметризованное по L-моментам, обеспечивает более устойчивые оценки, согласующиеся с результатами усеченного подхода.

Полученные результаты показывают, что при длине рядов наблюдений порядка 80...120 лет глубокая статистическая экстраполяция в область обеспеченностей менее 1 % сопровождается высокой неопределенностью, что методически обосновывает

необходимость ограничения экстраполяции при расчетах максимального стока редкой повторяемости.

1. ВВЕДЕНИЕ

Оценка максимального стока редкой повторяемости традиционно занимает центральное место в инженерной гидрологии и водохозяйственном проектировании.

Расчетные расходы воды с обеспеченностью 1 %, 0,5 % и менее используются при определении пропускной способности гидротехнических сооружений, расчетных уровней воды, устойчивости мостовых переходов и надежности систем противопаводковой защиты. Ошибки в оценке таких характеристик могут приводить как к аварийным ситуациям и значительному материальному ущербу, так и к необоснованному удорожанию проектных решений [1].

Методические основы расчета максимального стока в инженерной практике исторически формировались в рамках классической статистической гидрологии и предполагают использование параметрических распределений вероятностей с последующей экстраполяцией эмпирических рядов в область редкой повторяемости [2, 7]. В нормативных и методических документах наибольшее распространение получило распределение Пирсона III, параметры которого определяются по всей совокупности наблюдений без явного ограничения глубины экстраполяции. Такой подход широко применяется в инженерных расчетах, однако его корректность существенно зависит от длины рядов наблюдений и формы распределения максимального стока [8, 9].

В последние десятилетия в зарубежной гидрологической практике для анализа экстремальных паводков активно применяется обобщенное экстремальное распределение (GEV), основанное на положениях теории экстремальных значений и рассматриваемое как универсальная модель для описания годовых максимумов стока. Распределение GEV используется в международных рекомендациях и научных исследованиях при оценке редких паводков и проектных расходов воды. Вместе с тем многочисленные исследования указывают, что результаты применения GEV в значительной степени зависят от метода оценки параметров, длины гидрологических рядов и степени асимметрии распределения экстремальных значений [10, 15].

Для равнинных рек, характеризующихся выраженной межгодовой изменчивостью максимального стока, наличием одиночных экстремальных паводков и ограниченной продолжительностью наблюдений, как классические параметрические распределения, так и распределение GEV при стандартной параметризации методом максимального правдоподобия могут демонстрировать неустойчивое поведение хвостовой части распределения. В условиях длины рядов наблюдений порядка 80...120 лет экстраполяция в область обеспеченностей менее 1 % сопровождается высокой статистической неопределенностью и риском получения физически трудноинтерпретируемых расчетных значений [16].

Особую актуальность данная проблема имеет для равнинных рек Казахстана, гидрологический режим которых формируется преимущественно за счет снегового питания и характеризуется значительной асимметрией распределений максимального стока. Для большинства гидрологических постов продолжительность наблюдений является недостаточной для надежной оценки редких экстремумов исключительно на основе формальных параметрических моделей. В этих условиях неконтролируемая статистическая экстраполяция может приводить как к занижению, так и к завышению расчетных расходов воды редкой повторяемости.

В связи с этим возрастает интерес к методическим подходам, ориентированным на управление статистической неопределенностью хвостовой части распределения. К таким подходам относятся усеченные и графо-аналитические методы построения кривых обеспеченности, позволяющие ограничить область экстраполяции статистически надежной частью эмпирического ряда и контролировать форму распределения в области

По статье:

Получено: 17.01.2026

Пересмотрено: 27.04.2026

Принято: 05.06.2026

Опубликовано: 01.07.2026

Для цитирования:

Молдахметов М.,
Методические подходы к
оценке максимального
стока редкой повторяемости
равнинных рек Казахстана в
условиях статистической
неопределенности//
Гидрометеорология и
экология, 122 (2), 2026, 23-
45.

редкой повторяемости. Применение усечённых кривых обеспеченности позволяет получить устойчивые и физически интерпретируемые оценки максимального стока, сопоставимые с фактическими наблюдениями и инженерными представлениями о формировании экстремальных паводков [17, 18].

Целью настоящей работы является сравнительная оценка и методическое обоснование применения различных подходов к расчету максимального годового стока редкой повторяемости равнинных рек Казахстана в условиях статистической неопределённости, обусловленной ограниченной длиной рядов наблюдений и особенностями хвостовой части распределения экстремальных значений.

В работе выполнено сопоставление классического распределения Пирсона III, распределения GEV с различными методами параметризации и усеченной графо-аналитической методики, что позволило выявить преимущества усечённого подхода как инструмента повышения устойчивости инженерно-гидрологических расчетов.

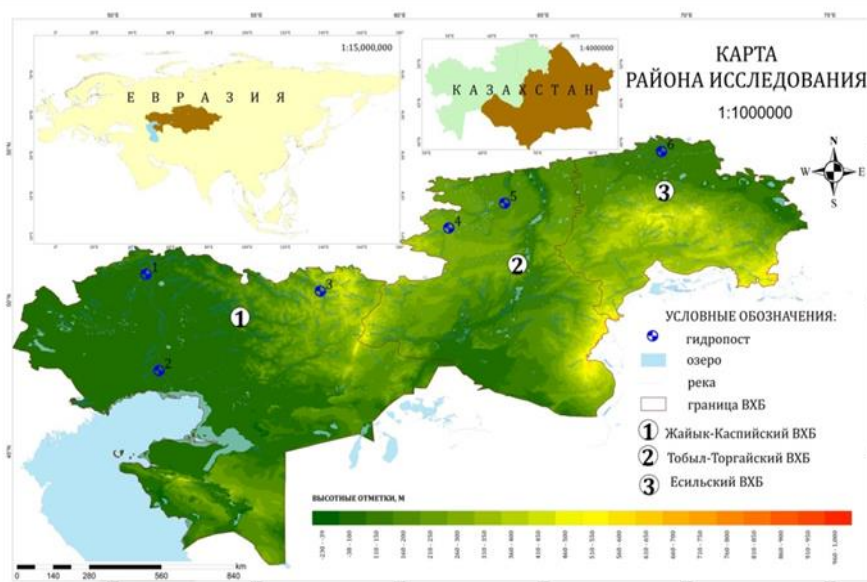
2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

2.1 Объект исследования

Объектом исследования в настоящей работе являются равнинные реки Казахстана, характеризующиеся преимущественно снежным типом питания, выраженной сезонностью стока и значительной межгодовой изменчивостью максимальных расходов воды. Для анализа выбраны реки, представляющие различные водохозяйственные бассейны страны и отличающиеся условиями формирования паводков, однако обладающие общими чертами равнинного гидрологического режима.

В качестве репрезентативных объектов исследования использованы данные по следующим рекам и гидрологическим постам: река Жайык - посты с. Кушум и с. Махамбет; река Есиль - пост г. Петропавловск; река Тобыл - посты с. Гришенка и г. Костанай; река Илек - пост г. Актобе. Выбранные посты располагаются в среднем и нижнем течении рек и характеризуют режим максимального стока крупных равнинных водосборов.

Пространственное расположение исследуемых гидрологических постов в пределах основных равнинных речных бассейнов Казахстана представлено на рисунке 1.



Примечание: Номера гидрологических постов на карте приведены в соответствии с таблицей 1.

Рисунок 1. Карта района исследования

Река Жайык (Урал) является одной из крупнейших рек Казахстана и Восточной Европы. В пределах территории Казахстана она протекает по обширной равнинной местности с незначительными уклонами русла и широкой поймой. Формирование

максимального стока реки Жайык обусловлено сочетанием весеннего снеготаяния и дождевых паводков, что приводит к значительной вариабельности годовых максимальных расходов воды и выраженной асимметрии их распределения. В нижнем течении реки, в районе постов Кушум и Махамбет, нередко наблюдаются одиночные экстремальные паводки, существенно влияющие на форму кривых обеспеченности.

Река Есиль относится к типичным равнинным рекам северного Казахстана. Ее водный режим определяется преимущественно весенним половодьем, формируемым за счет снеготаяния. Максимальные расходы воды, как правило, приходятся на короткий весенний период и характеризуются высокой межгодовой изменчивостью, зависящей от запасов снежного покрова и метеорологических условий весны. В то же время дождевые паводки в бассейне Есиля играют второстепенную роль, что отражается на сравнительно устойчивой форме эмпирических кривых обеспеченности.

Река Тобыл является крупным левобережным притоком реки Иртыш и характеризуется более сглаженным гидрологическим режимом по сравнению с рекой Жайык. Тем не менее в пределах бассейна Тобыла наблюдаются заметные пространственные различия условий формирования максимального стока. Использование данных по постам с. Гришенка и г. Костанай позволяет оценить влияние морфометрических и климатических факторов на форму распределения максимальных расходов воды в пределах одного речного бассейна.

Река Илек, протекающая в западной части Казахстана, отличается высокой неравномерностью формирования максимального стока. Для нее характерны как годы с умеренными паводками, так и редкие, но крайне интенсивные паводочные события. В результате распределение максимальных расходов воды по реке Илек обладает выраженной асимметрией и тяжелым хвостом, что существенно усложняет применение формальных параметрических методов расчета редких экстремумов.

Таким образом, выбранные объекты исследования охватывают широкий спектр гидрологических условий равнинных рек Казахстана и позволяют комплексно оценить применимость различных методических подходов к расчету максимального стока редкой повторяемости в условиях статистической неопределенности.

2.2 Исходные гидрологические данные

В качестве исходных материалов в работе использованы многолетние ряды максимальных годовых расходов воды, полученные по данным государственной гидрометеорологической сети наблюдений. Для всех выбранных гидрологических постов применялись только официальные, прошедшие первичную и последующую проверку данные наблюдений, что обеспечивает их сопоставимость и корректность при статистическом анализе.

Анализ выполнялся по значениям максимального расхода воды за гидрологический год без исключения экстремальных наблюдений, поскольку редкие паводки представляют собой неотъемлемую часть естественного гидрологического режима и оказывают определяющее влияние на форму распределения максимального стока. Исключение экстремальных значений рассматривалось как методически недопустимое, так как приводит к искажению хвостовой части распределения и снижению информативности рядов при оценке редкой повторяемости.

Длина рядов наблюдений по исследуемым постам составляет от нескольких десятков до более чем ста лет, что является типичным для равнинных рек Казахстана и соответствует условиям, в которых на практике выполняются инженерно-гидрологические расчеты. Характеристика используемых рядов наблюдений приведена в таблице 1.

Таблица 1

Характеристика гидрологических постов и рядов максимального стока

№ п/п	Река - пост	Код поста	Площадь водосбора, км ²	Период наблюдений	Длина ряда, лет
1	Жайык – с. Кушум	19072	190000	1912...2023	103
2	Жайык- с. Махамбет	19801	230000	1932...2023	93
3	Илек – г. Актобе	19195	11000	1938...2023	93
4	Тобыл – с. Грищенко	12002	13100/13400	1938...2023	93
5	Тобыл – г. Костанай	12008	28000/44800	1931...2023	93
6	Есиль - Петропавловск	11410	106000/118000	1901...2023	123

Перед выполнением расчетов была проведена предварительная проверка рядов максимального стока на наличие грубых ошибок, пропусков и явных несоответствий. Существенных искажений, способных повлиять на результаты анализа, выявлено не было.

Используемые ряды наблюдений соответствуют требованиям нормативных документов к минимальной длине гидрологических рядов, применяемых при расчете расчетных характеристик стока.

2.3 Определение эмпирической обеспеченности максимального стока

Для построения эмпирических кривых обеспеченности значения максимальных расходов воды упорядочивались по убыванию, после чего для каждого ранга определялась эмпирическая вероятность превышения. В качестве основной формулы для расчета обеспеченности использовалась классическая ранговая зависимость, основанная на отношении номера члена ряда к длине наблюдений.

$$P = \frac{m}{n+1}, \quad (1)$$

где m - ранг значения в упорядоченном по убыванию ряду, n - длина ряда наблюдений.

Использование ранговых формул обеспечивает наглядную интерпретацию эмпирической обеспеченности и широко применяется как в отечественной, так и в зарубежной практике инженерной гидрологии. При этом следует учитывать, что в области редкой повторяемости (менее 1...2 %) эмпирические вероятности превышения характеризуются высокой неопределенностью, обусловленной конечной длиной рядов наблюдений [19, 20].

Эмпирические значения обеспеченности использовались в качестве основы для сопоставления с расчетными кривыми и для выбора параметров усеченных кривых обеспеченности.

Для обеспечения сопоставимости результатов расчетов по различным методическим подходам все вычисления выполнялись для одинакового набора обеспеченностей: 10, 5, 3, 1 и 0,5 %. Такой выбор обусловлен тем, что указанные обеспеченности наиболее часто применяются в инженерных расчетах и одновременно отражают область повышенной статистической неопределенности.

2.4 Классический параметрический подход

В качестве базового параметрического метода расчета максимального стока в работе использовано распределение Пирсона III, которое традиционно применяется в инженерной практике и закреплено в нормативных и методических документах [21, 22].

Параметры распределения Пирсона III - среднее значение, среднеквадратическое отклонение и коэффициент асимметрии - определялись по всему ряду наблюдений максимального стока. После определения параметров строилась теоретическая кривая обеспеченности и выполнялась экстраполяция в область редкой повторяемости (1 %, 0,5 %).

Следует отметить, что данный подход носит формальный характер и не предусматривает явного ограничения глубины экстраполяции. В условиях ограниченной длины рядов и выраженной асимметрии распределений это может приводить к существенным расхождениям между расчетными и эмпирическими значениями, особенно в хвостовой части распределения.

В настоящей работе распределение Пирсона III использовалось не как эталонный, а как сравнительный метод, позволяющий количественно оценить влияние усеченного подхода на расчетные значения максимального стока.

2.5 Усеченная графо-аналитическая методика построения кривых обеспеченности

В гидрологических рядах наблюдений часто присутствуют значения, относящиеся к различным генетическим условиям формирования стока (например, экстремально маловодные годы и редкие дождевые паводки), что обуславливает неоднородность статистической структуры ряда и ограничивает применимость стандартных параметрических распределений в области крайних значений [17].

Важным аспектом, определяющим применимость стандартных расчётных методов, является физическая неоднородность условий формирования максимального стока равнинных рек. В условиях, когда основная часть годового речного стока формируется в короткий весенний или весенне-летний период при исключительно высокой для континентальных территорий межгодовой изменчивости водности, формирование волны половодья определяется совокупностью различных факторов.

В годы с крайне малоснежными зимами весенний сток формируется преимущественно за счёт снежных запасов, аккумулированных в русле реки и овражно-балочной сети. При более благоприятных зимних условиях в формировании половодья участвует талая вода, стекающая со значительной части водосбора. После многоснежных зим дополнительный вклад в формирование стока вносят депрессии рельефа («степные блюдца»), которые в обычные годы остаются гидрологически пассивными, но при переполнении включаются в стокоформирование.

В результате действующая площадь водосбора, реально участвующая в формировании максимального стока, существенно изменяется по годам. Это приводит к формированию годовых максимумов расходов воды при принципиально различных гидрологических условиях, вследствие чего исходный ряд Q_{max} приобретает выраженную неоднородность. В таких условиях описание всего ряда единым статистическим законом становится методически необоснованным, а применение усеченных распределений оказывается не просто целесообразным, но фактически неизбежным.

Морфология долины реки оказывает существенное влияние на форму распределений максимальных расходов и особенно уровней воды. При узкой пойме распределение может быть описано единым законом, при этом асимметрия уровенного ряда, как правило, остается положительной. В условиях широкой поймы и пологих бортов долины нередко возникает статистическая неоднородность ряда, и различные его фрагменты подчиняются разным законам распределения.

В подобных ситуациях точка усечения приобретает четкий физический смысл и может быть связана, например, с отметкой выхода воды на широкую пойму. Данный подход ранее применялся Р.И. Гальпериным [17], целесообразность его применения озвучена в докладах VII Всероссийского гидрологического съезда.

Экстремальные значения (аномальные паводки, выраженные периоды маловодья и др.) оказывают непропорционально сильное влияние на параметры теоретических распределений. Контролируемое ограничение области их влияния позволяет существенно повысить устойчивость и качество аппроксимации эмпирических рядов [18].

При проектировании инженерных сооружений (дамб, мостов, водопропускных устройств) принципиально важно, чтобы используемая аналитическая модель адекватно описывала именно ту часть распределения, которая определяет расчетные характеристики, соответствующие заданным уровням обеспеченности (например, 5 %, 1 % и 0,3 %).

В нормативных документах, регламентирующих расчет гидрологических характеристик для целей проектирования и строительства (в том числе СНиП 2.01.14-83, СП 33-101-2003 и связанных с ними методических указаниях), допускается применение усеченных или составных кривых обеспеченности в случаях неоднородности рядов наблюдений максимального или минимального стока [17].

В ряде нормативных положений указывается, что при наличии неоднородности гидрологического ряда, обусловленной различными условиями формирования стока, использование единого параметрического распределения по всей совокупности данных может быть методически необоснованным. В таких ситуациях рекомендуется переход к усеченным или составным кривым распределения ежегодных вероятностей превышения [17, 18].

Стандартные указания по определению расчетных гидрологических характеристик предусматривают:

- применение аналитических функций распределения (в частности, распределения Пирсона III, гамма-распределения и др.) при статистической однородности рядов наблюдений;

- при выявлении неоднородности - использование усеченных или составных кривых обеспеченности, а также отдельную обработку отдельных фрагментов ряда.

Фактически это означает, что крайние участки распределения, не соответствующие общей статистической тенденции формирования стока, не должны оказывать непропорционального влияния на параметры расчетной кривой и могут рассматриваться отдельно либо с ограничением их вклада в аппроксимацию.

Основным методическим элементом настоящего исследования является применение усеченной графо-аналитической методики построения кривых обеспеченности максимального стока. Ключевая идея данного подхода заключается в сознательном ограничении статистической экстраполяции областью эмпирических данных, обладающих наибольшей надежностью.

В рамках методики задаются две опорные точки эмпирической кривой обеспеченности: верхняя точка, соответствующая обеспеченности 5 %, и нижняя точка, определяющая границу усечения кривой P2 (как правило, в диапазоне 25...50 %). Значения максимального стока в этих точках принимаются непосредственно по эмпирическим данным.

Параметры расчетной кривой обеспеченности определяются таким образом, чтобы обеспечить наилучшее согласование с эмпирическими значениями в статистически надежной части распределения. Экстраполяция в область редкой повторяемости (1%, 0,5%) осуществляется без использования всей совокупности данных, что позволяет существенно снизить влияние одиночных экстремальных наблюдений и избежать неустойчивого поведения хвостовой части распределения.

Расчетная зависимость для усеченной кривой обеспеченности имеет вид:

$$Q_P = Q_{P_2} + \sigma [\Phi(P_1, C_S) - \Phi(P_2, C_S)], \quad (2)$$

где параметр σ определяется по двум опорным точкам:

$$\sigma = \frac{Q_{P_1} - Q_{P_2}}{\Phi(P_1, C_S) - \Phi(P_2, C_S)}. \quad (3)$$

Коэффициент асимметрии C_s подбирался по условию минимизации среднеквадратической ошибки согласования между эмпирическими и расчетными значениями в диапазоне обеспеченностей от 2 % до P2.

Выбор нижней границы усечения P2 выполнялся индивидуально для каждого гидрологического поста на основе анализа формы эмпирической кривой обеспеченности и минимизации расхождений между эмпирическими и расчетными значениями.

Для методического обоснования выбора нижней границы усечения P2 для каждого гидрологического поста была выполнена серия расчетов усеченных кривых обеспеченности при фиксированных значениях P2 = 25 %, 30 % и 40 %. В качестве количественного критерия согласования расчетных и эмпирических значений использовалась среднеквадратическая ошибка (RMSE). Результаты сравнительного анализа приведены в таблице 2.

Таблица 2

Сравнение среднеквадратических отклонений усеченных кривых обеспеченности при различных значениях нижней границы усечения P2

Река – пост	RMSE при P2=25 %, м ³ /с	RMSE при P2=30 %, м ³ /с	RMSE при P2=40 %, м ³ /с	Принятое P2, %
Жайык – с. Кушум	351	442	504	25
Жайык – с. Махамбет	630	642	647	25
Илек – г. Актобе	194	181	167	40
Тобыл – с. Гришенка	171	189	183	25
Тобыл – г. Костанай	85,1	73,2	68,9	40
Есиль – г. Петропавловск	105	92,2	90,9	40

Выбор данной функциональной формы обусловлен ее широким применением в инженерной гидрологии и возможностью графо-аналитической интерпретации параметров, что обеспечивает сопоставимость с нормативными методами расчета. Принятые параметры усеченных кривых приведены в таблице 3.

Таблица 3

Параметры усеченных кривых обеспеченности максимального стока

Река – пост	Нижняя граница усечения P2, %	Коэффициент асимметрии C_s	Среднеквадратическая ошибка (RMSE)
Жайык – с. Кушум	25	1,65	351
Жайык- с. Махамбет	25	4,58	616
Илек – г. Актобе	40	4,00	167
Тобыл – с. Гришенка	25	0,00	174
Тобыл – г. Костанай	40	3,98	68,9
Есиль - Петропавловск	40	2,12	89,9

Анализ данных таблицы 3 показывает, что минимальные значения среднеквадратического отклонения достигаются при различных значениях нижней границы усечения P2 в зависимости от реки и гидрологического поста. Это отражает различия в статистической структуре рядов максимального стока и подтверждает некорректность применения единого значения P2 для всех водотоков. Принятые в дальнейшем значения P2 соответствуют минимуму RMSE, что обеспечивает наилучшее согласование расчетных кривых с эмпирическими данными в статистически надежной части распределения.

Значения нижней границы усечения P2 варьируют в диапазоне от 25 до 40 %, что отражает различия в форме эмпирических кривых обеспеченности и степени неоднородности рядов наблюдений. Для рек Жайык (пост с. Кушум) и Тобыл (пост с. Гришенка) оптимальное согласование расчетной и эмпирической кривых достигается при P2 = 25 %, что указывает на относительно устойчивую статистическую структуру рядов в диапазоне средних обеспеченностей. В то же время для постов Жайык - с. Махамбет, Тобыл - г. Костанай и Есиль - г. Петропавловск более корректное описание эмпирических

данных обеспечивается при $P_2 = 40 \%$, что свидетельствует о необходимости ограничения влияния нижней части распределения при аппроксимации.

Коэффициент асимметрии C_s , рассчитанный для усеченной части ряда, соответствующей принятому значению нижней границы усечения P_2 , демонстрирует значительную вариабельность, принимая значения от 0,00 до 4,00. Минимальное значение асимметрии, близкое к нулю, характерно для реки Тобыл в створе с. Гришенка при $P_2 = 25 \%$, что указывает на сравнительно симметричную структуру распределения максимального стока в статистически надежной части ряда и отсутствие выраженного тяжелого хвоста. Следует отметить, что при альтернативных значениях усечения ($P_2=30 \%$, $P_2=40 \%$) для данного поста коэффициент асимметрии возрастает и превышает единицу, что подтверждает чувствительность параметров распределения к глубине усечения.

Напротив, для реки Илек (г. Актобе) и реки Жайык (с. Махамбет) даже при оптимальных значениях P_2 сохраняются высокие значения C_s , отражающие наличие редких, но крайне интенсивных паводков, формирующих тяжелую хвостовую часть распределения.

Значения среднеквадратической ошибки (σ) характеризуют степень согласования расчетных кривых с эмпирическими данными в статистически надежной части распределения. Относительно низкие значения σ для большинства постов свидетельствуют о хорошем качестве аппроксимации и подтверждают корректность выбранных параметров усеченных кривых обеспеченности. Более высокие значения σ для отдельных постов отражают повышенную изменчивость максимального стока и сложность статистического описания хвостовой части распределения.

Таким образом, данные таблицы 3 показывают, что применение усеченных кривых обеспеченности с индивидуальным подбором параметров позволяет адекватно учитывать различия в гидрологическом режиме рек и формирует надежную основу для расчета максимального стока редкой повторяемости.

2.6 Оценка статистической неопределенности

Оценка статистической неопределенности редких паводков при конечной длине рядов наблюдений имеет принципиальное значение для инженерной практики, поскольку нормативные расчеты, как правило, не учитывают диапазон возможных отклонений расчетных характеристик.

Для оценки статистической неопределенности, присущей расчету редких паводков при конечной длине рядов наблюдений, использовался биномиальный подход к оценке доверительных интервалов вероятности превышения. Данный анализ не предназначен для непосредственного расчета расходов воды, однако позволяет наглядно продемонстрировать диапазон возможных значений вероятности превышения для экстремальных наблюдений [23].

Для количественной оценки статистической неопределенности расчетных значений максимального стока редкой повторяемости была выполнена оценка доверительных интервалов вероятности превышения на основе биномиального подхода. Известно, что при конечной длине гидрологических рядов вероятность превышения экстремальных наблюдений определяется с существенной неопределенностью, особенно в области редкой повторяемости. Для оценки диапазона возможных отклонений вероятности превышения использовался биномиальный метод определения доверительных интервалов (метод Clopper–Pearson) при уровне доверия 95 %. Расчеты выполнены для обеспеченностей 1 % и 0,5 %, соответствующих наиболее ответственным инженерным расчетам. Длина рядов наблюдений по исследуемым постам составляет от 93 до 102 лет, что позволяет количественно оценить статистическую неопределенность области редких вероятностей. Результаты расчетов показали, что при длине рядов порядка 93...102 лет доверительные интервалы вероятности превышения в области

обеспеченности 1% варьируют в диапазоне примерно от 0,03 до 5,5 %, а для обеспеченности 0,5 % - от 0,03 до 5,8 % (таблица 4). Это свидетельствует о высокой неопределенности глубокой статистической экстраполяции в область редкой повторяемости. Для перехода от вероятностных интервалов к диапазонам расчетных расходов использовались значения максимального стока обеспеченности 1 % и 0,5 %, полученные по усеченной кривой обеспеченности. В результате были определены доверительные интервалы расчетных расходов воды (таблица 5).

Таблица 4*Доверительные интервалы вероятности превышения (95 %)*

Река – пост	n	Q _{1%}	Интервал P _{1%} , (%)	Q _{0,5%}	Интервал P _{0,5%} , (%)
Жайык – с. Кушум	102	16564	0,03...4,97	19516	0,03...5,34
Жайык – с. Махамбет	93	9396	0,03...5,46	11552	0,03...5,85
Илек – г. Актобе	93	2780	0,03...5,46	3470	0,03...5,85
Тобыл – с. Гришенка	93	2618	0,03...5,46	2930	0,03...5,85
Тобыл – г. Костанай	93	4039	0,03...5,46	4970	0,03...5,85
Есиль – г. Петропавловск	93	5475	0,03...5,46	6400	0,03...5,85

Таблица 5*Доверительные интервалы расчетных расходов обеспеченности 1 %*

Река-пост	Q _{1%} , м ³ /с	Нижний предел Q _{1%}	Верхний предел Q _{1%}
Жайык–Кушум	16564	11334	37974
Жайык–Махамбет	9396	5665	26717
Илек–Актобе	2780	1615	8533
Тобыл–Гришенка	2618	1987	4627
Тобыл–Костанай	4039	2430	11534
Есиль–Петропавловск	5475	3735	12060

Анализ полученных результатов показал, что диапазоны возможных значений расчетных расходов могут существенно превышать номинальные значения. Например, для реки Есиль–Петропавловск при расчетном значении максимального расхода обеспеченности 1%, равном 5475 м³/с, диапазон возможных значений составляет 3735...12060 м³/с. Аналогичные закономерности выявлены и для других исследуемых водотоков. Графическая интерпретация полученных результатов представлена на рисунке 2, где показаны кривые обеспеченности с доверительными интервалами.

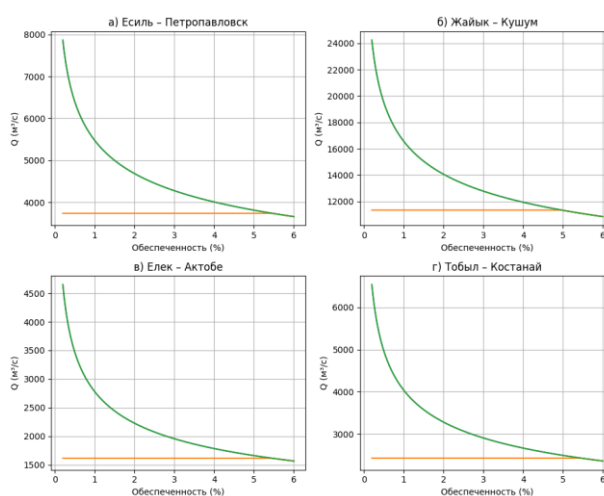


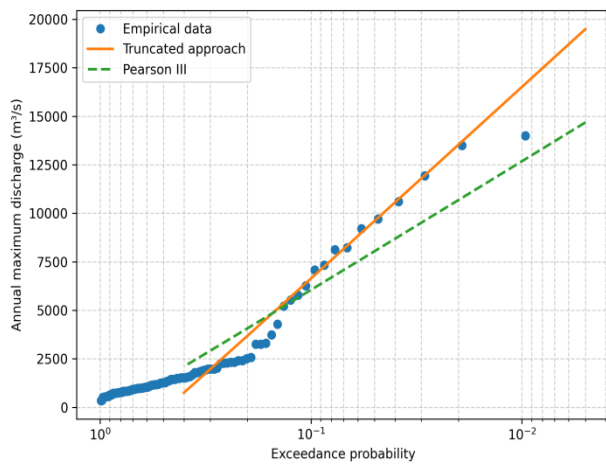
Рисунок 2. Кривые обеспеченности максимального стока с доверительными интервалами: а) р. Есиль–Петропавловск; б) р. Жайык–Кушум; в) р. Елек–Актобе; г) р. Тобыл–Костанай.

Видно, что в области обеспеченностей менее 1 % ширина доверительных интервалов резко возрастает, что подтверждает высокую статистическую неопределенность глубокой экстраполяции. Полученные результаты подтверждают методическую целесообразность ограничения глубины экстраполяции при расчетах максимального стока редкой повторяемости и обосновывают применение усеченных кривых обеспеченности как более устойчивого инструмента инженерно-гидрологических расчетов [24].

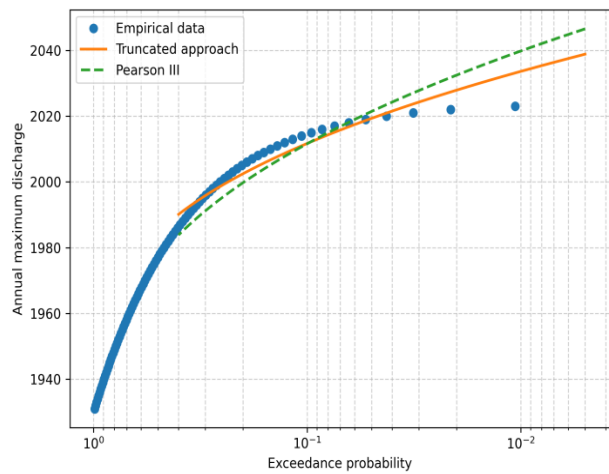
3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

3.1 Эмпирические и усеченные кривые обеспеченности максимального стока

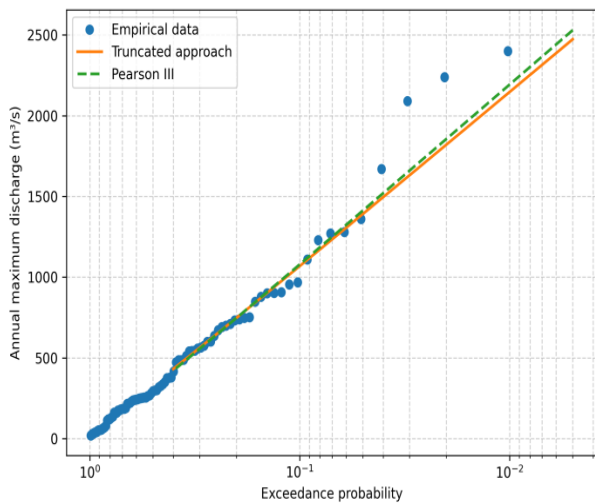
Результаты построения эмпирических и расчетных кривых обеспеченности максимального годового стока для исследуемых гидрологических постов приведены на рисунке 3.



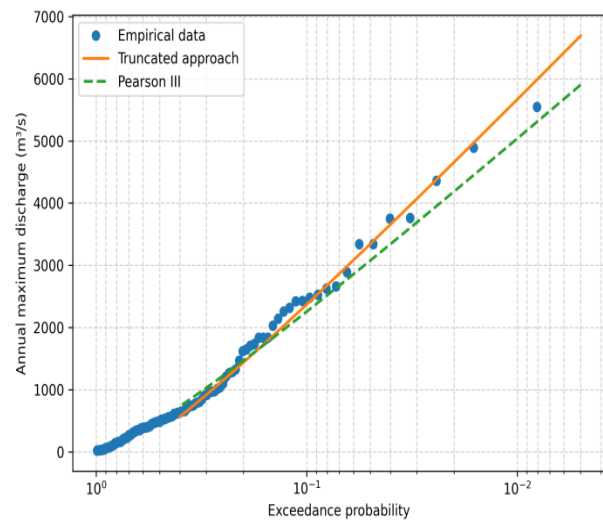
Жайык-Кошим



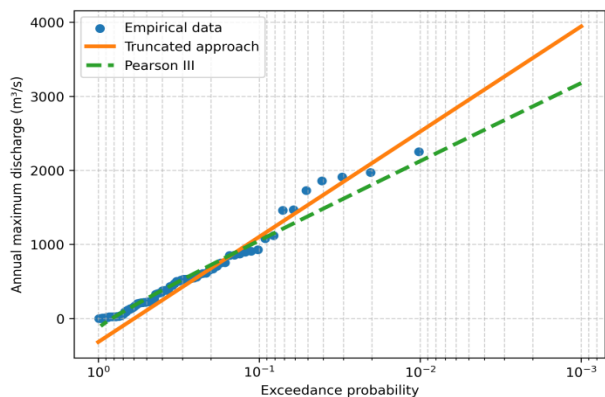
Жайык - Махамбет



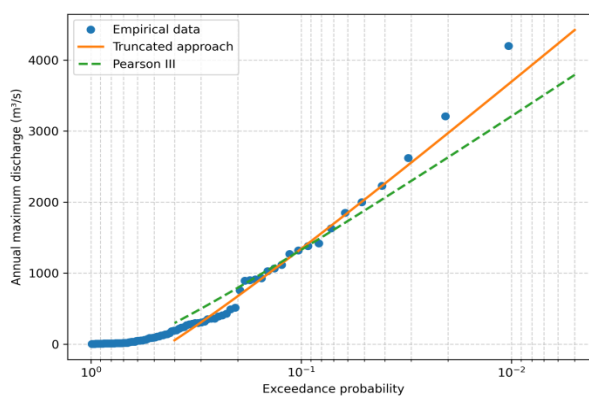
Илек-Актобе



Есиль-Петропавловск



Тобыл – с. Гришенка



Тобыл - Костанай

Рисунок 3. Эмпирические и усеченные кривые обеспеченности максимальных расходов воды (а-е - по гидрологическим постам: Жайык–Кушум, Жайык– Махамбет, Илек-Актобе, Есиль-Петропавловск, Тобыл– Гришенка, Тобыл - Костанай)

На рисунке представлены эмпирические значения максимальных расходов воды, а также расчетные кривые, полученные по усеченной графо-аналитической методике и классическому параметрическому распределению Пирсона III.

Анализ рисунка 3 показывает, что усеченная кривая обеспеченности обеспечивает устойчивое согласование с эмпирическими данными в статистически надежной части распределения, как правило в диапазоне обеспеченностей от 5 до 30...40 %. В этой области расчетные значения практически не отклоняются от эмпирических, что свидетельствует о корректном выборе параметров усеченной кривой и ее адекватности фактическому гидрологическому режиму рек.

При переходе к области редкой повторяемости (обеспеченности 1 % и 0,5 %) усеченная методика демонстрирует плавный и контролируемый характер экстраполяции. В отличие от параметрического подхода, форма кривой в хвостовой части распределения не испытывает резких перегибов и не приводит к скачкообразному изменению расчетных расходов воды. Это имеет принципиальное значение для инженерных расчетов, поскольку обеспечивает физически интерпретируемые и устойчивые значения максимального стока.

Наиболее выраженные преимущества усеченной методики наблюдаются для рек с высокой межгодовой изменчивостью максимального стока и наличием одиночных экстремальных паводков, в частности для реки Илек и нижнего течения реки Жайык. В этих случаях классическая параметрическая аппроксимация оказывается чувствительной к отдельным экстремальным наблюдениям, тогда как усеченная кривая сглаживает их влияние за счет ограничения области экстраполяции.

3.2 Расчетные значения максимального стока редкой повторяемости

Расчетные значения максимального годового стока различной обеспеченности, полученные по усеченной кривой обеспеченности, приведены в таблице 6. Таблица содержит значения расходов воды с обеспеченностями 10 %, 5 %, 3 %, 1 % и 0,5 %, которые традиционно используются в инженерно-гидрологических расчетах.

Таблица 6

Расчетные значения максимального стока редкой повторяемости (усеченная кривая обеспеченности)

Река – пост	Максимальные расходы воды различной обеспеченности, м³/с				
	Q10%	Q5%	Q3%	Q1%	Q0.5%
Жайык – с. Кушум	6509	9592	11828	16564	19516
Жайык- с. Махамбет	3195	4838	6196	9396	11552
Илек – г. Актобе	941	1388	1787	2780	3470
Тобыл – с. Гришенка	1312	1766	2061	2618	2930

Тобыл – г. Костанай	1276	2031	2638	4039	4970
Есиль - Петропавловск	2429	3340	4015	5475	6400

Расчетные значения максимального годового стока различной обеспеченности, приведенные в таблице 6, демонстрируют закономерный и монотонный рост расходов воды при переходе от часто повторяющихся паводков (обеспеченность 10...5 %) к редким экстремальным событиям (обеспеченность 1...0,5 %). Отсутствие резких скачков и немонотонности в ряду расчетных значений соответствует физическим представлениям о формировании экстремального стока в равнинных речных бассейнах, и свидетельствует о корректности применения усеченной кривой обеспеченности и устойчивости полученных оценок.

Наибольшие значения максимального стока редкой повторяемости характерны для реки Жайык, что обусловлено значительной площадью водосбора и спецификой формирования паводков в нижнем течении реки. Для поста с. Кушум расчетный расход обеспеченности 1 % превышает 16 тыс. м³/с, а при обеспеченности 0,5 % достигает порядка 19,5 тыс. м³/с, что отражает наличие редких, но чрезвычайно интенсивных паводков. В створе с. Махамбет значения максимального стока ниже, однако сохраняется выраженная тенденция к резкому увеличению расходов в области редкой повторяемости, что согласуется с высокой асимметрией распределения, выявленной на предыдущем этапе анализа.

Для реки Илек (г. Актобе) расчетные значения максимального стока демонстрируют более умеренный абсолютный уровень расходов, однако относительный рост между обеспеченностями 3 %, 1 % и 0,5 % остается значительным. Это указывает на высокую чувствительность оценок редких паводков к форме хвостовой части распределения и подчеркивает необходимость использования методов, ограничивающих неконтролируемую экстраполяцию.

Реки бассейна Тобыла характеризуются более сглаженной динамикой роста расчетных расходов. Для поста с. Гришенка увеличение максимального стока при переходе от обеспеченности 10 % к 0,5 % происходит плавно, что соответствует сравнительно симметричной структуре распределения максимального стока. В то же время для поста г. Костанай отмечается более выраженный рост расходов в области редкой повторяемости, что отражает различия в условиях формирования паводков и статистической структуре рядов наблюдений в пределах одного бассейна.

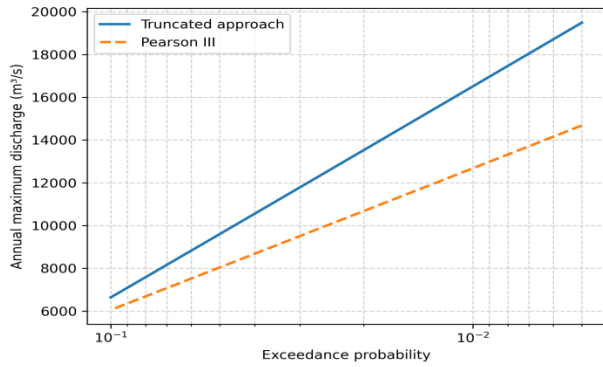
Для реки Есиль (г. Петропавловск) расчетные значения максимального стока редкой повторяемости занимают промежуточное положение между реками Жайык и Тобыл, что соответствует особенностям снегового типа питания и устойчивой сезонной структуре паводков. При этом рост расходов при переходе к обеспеченностям 1 % и 0,5 % остается контролируемым и физически интерпретируемым.

В целом данные таблицы 4 подтверждают, что применение усеченной кривой обеспеченности позволяет получить расчетные значения максимального стока редкой повторяемости, согласующиеся с эмпирическими кривыми (рисунок 2) и отражающие реальные гидрологические различия между реками и постами.

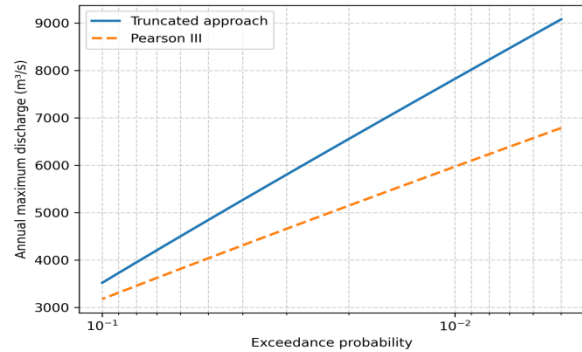
Следует отметить, что полученные значения максимального стока редкой повторяемости находятся в разумных пределах относительно эмпирических максимумов и не выходят за рамки гидрологически обоснованных оценок. Это особенно важно при использовании расчетных расходов для проектирования гидротехнических сооружений, где чрезмерное завышение или занижение расчетных характеристик может привести к серьезным инженерным последствиям. С инженерной точки зрения представленные значения могут быть использованы в качестве расчетных характеристик при проектировании гидротехнических сооружений и систем противопаводковой защиты.

3.3 Сравнение с классическим параметрическим подходом

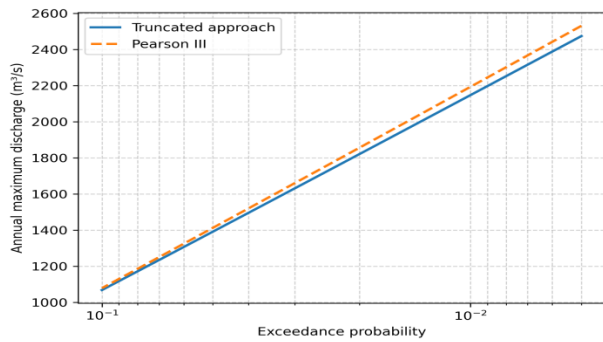
Сравнение расчетных кривых обеспеченности, полученных по усеченной методике и классическому распределению Пирсона III, представлено на рисунке 4. Для наглядности сравнение выполнено в диапазоне обеспеченностей от 10 % до 0,5 %, то есть в области, представляющей наибольший практический интерес для инженерных расчетов.



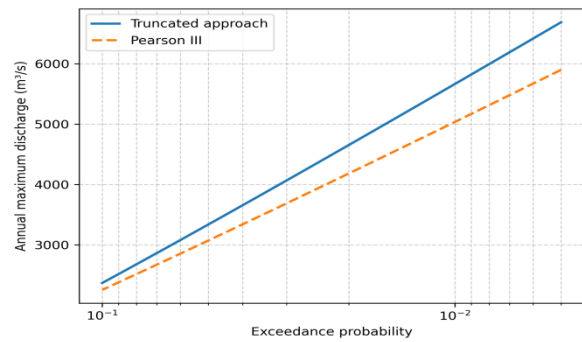
Жайык - Кошим



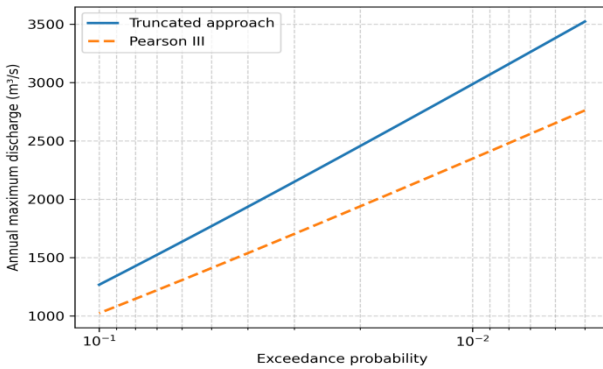
Жайык - Махамбет



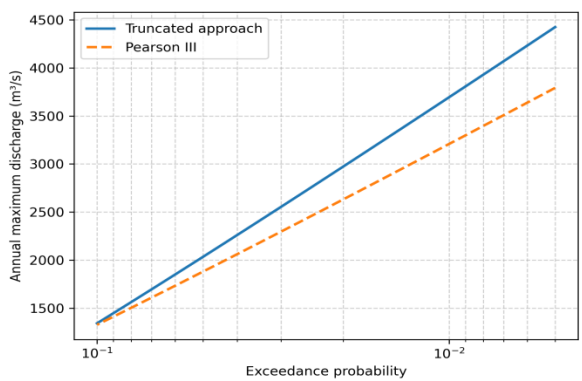
Илек-г. Актобе



Есиль - г. Петропавловск



Тобыл – с. Гришенка



Тобыл - Костанай

Рисунок 4. Сравнение кривых обеспеченности максимального стока, полученных по различным методам расчета (усеченная кривая обеспеченности и классическое распределение Пирсона III; диапазон обеспеченностей 10...0,5%)

Анализ рисунка 4 показывает, что различия между методами не являются существенными в области часто повторяющихся паводков, однако резко возрастают при переходе к редкой повторяемости. В большинстве рассмотренных случаев классическое

распределение Пирсона III либо занижает, либо завышает расчетные значения максимального стока по сравнению с усеченной кривой.

Количественная оценка различий между методами для обеспеченности 1% приведена в таблице 7.

Таблица 7

Сравнение расчетных значений максимального стока по усеченной кривой и классическому распределению Пирсона III

Река – пост	Q 1% (усеченная кривая), м ³ /с	Q 1% (кривая Пирсона III), м ³ /с	Отклонение, %
Жайык – с. Кушум	16564	13168	-20,5
Жайык- с. Махамбет	9396	7041	-25,1
Илек – г. Актобе	2780	2163	-22,2
Тобыл – с. Гришенка	2618	2125	-18,8
Тобыл – г. Костанай	4039	3303	-18,2
Есиль - Петропавловск	5475	4776	-12,8

Отрицательные значения отклонений свидетельствуют о занижении расчетных расходов при использовании классического параметрического подхода.

Данные таблицы 5 показывают, что расчетные значения максимального стока обеспеченности 1 %, полученные по распределению Пирсона III, для всех исследуемых гидрологических постов оказываются ниже соответствующих значений, рассчитанных по усеченной кривой обеспеченности. Величина занижения составляет от 12,8 до 25,1 % и возрастает для рек с выраженной асимметрией распределения максимального стока. Полученные результаты свидетельствуют о том, что формальное использование параметрического распределения Пирсона III без ограничения глубины экстраполяции может приводить к недооценке редких паводков, тогда как усеченная кривая обеспеченности обеспечивает более устойчивые и консервативные оценки, соответствующие инженерным требованиям надежности.

Полученные расхождения не следует рассматривать как недостаток параметрического распределения Пирсона III, а как следствие его формального применения за пределами статистически надежной части эмпирического ряда.

Это обстоятельство указывает на ограниченную применимость традиционного параметрического подхода для оценки хвостовой части распределения максимального стока в условиях высокой асимметрии и конечной длины рядов наблюдений.

В связи с этим представляется целесообразным рассмотреть альтернативные модели описания экстремальных значений, широко применяемые в современной зарубежной гидрологической практике, и сопоставить получаемые по ним оценки с результатами, полученными по усеченной кривой обеспеченности.

3.4 Сравнительный анализ усеченной кривой обеспеченности и распределения GEV

В последние десятилетия в зарубежной гидрологической практике для анализа экстремальных паводков широко применяется обобщенное экстремальное распределение (GEV), рассматриваемое как универсальная модель для описания годовых максимумов стока в рамках теории экстремальных значений. Применение распределения GEV получило широкое распространение при анализе редких паводков и оценке расчетных расходов воды, используемых в инженерных и проектных расчетах. В этой связи представляло интерес сопоставить расчетные значения максимального стока, полученные по усеченной кривой обеспеченности, с оценками редких расходов воды, рассчитанными на основе распределения GEV [22].

Оценка параметров GEV в классической постановке обычно выполняется методом максимального правдоподобия (MLE). Однако, как показывают многочисленные исследования, при ограниченной длине рядов наблюдений и выраженной асимметрии распределений экстремальных значений данный метод может демонстрировать нестабильное поведение хвостовой части распределения. Это особенно характерно для равнинных рек с редкими, но чрезвычайно интенсивными паводками.

Для иллюстрации указанной проблемы в настоящей работе распределение GEV было применено к ряду максимальных расходов воды реки Жайык в створе с. Кушум, характеризующемуся высокой асимметрией и наличием одиночных экстремальных паводков (1921...2023 гг., n = 103). Расчеты показали, что при использовании стандартной MLE-оценки параметров GEV значения расходов обеспеченности 1 % и 0,5 % принимают физически трудноинтерпретируемые и завышенные величины, превышающие расчеты по усеченной кривой на порядки (таблица 8).

Таблица 8

Сравнение расчетных расходов воды редкой обеспеченности для реки Жайык – с. Кушум

P, %	Усеченная кривая, м ³ /с	GEV (MLE), м ³ /с	GEV (L-mom), м ³ /с
1,0	16564	$5,2 \times 10^{10}$	16200
0,5	19516	$2,9 \times 10^{12}$	23532

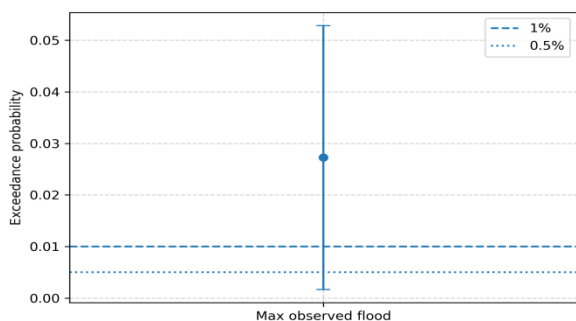
Подобное поведение распределения GEV (MLE) указывает не на экстремальность реального гидрологического режима, а на численную и статистическую неустойчивость параметров распределения в хвостовой части, обусловленную сильной зависимостью MLE-оценок от единичных экстремальных наблюдений. В этом смысле GEV (MLE) не устраняет неопределенность глубокой экстраполяции, а в ряде случаев усиливает ее.

В то же время использование альтернативного подхода к оценке параметров GEV - метода L-моментов - приводит к принципиально иному результату. Расчеты показали, что значения расходов обеспеченности 1 % и 0,5 %, полученные по GEV (L-mom), оказываются близкими к расчетам по усеченной кривой обеспеченности и укладываются в физически обоснованный диапазон, согласующийся с эмпирическими данными и историческими наблюдениями экстремальных паводков.

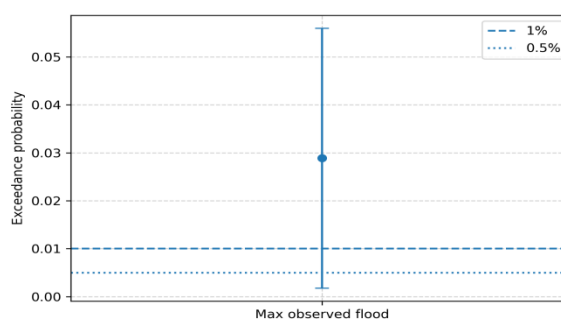
Таким образом, результаты сравнительного анализа показывают, что распределение GEV при стандартной параметризации методом максимального правдоподобия не устраняет проблему неопределенности оценки редких паводков для равнинных рек Казахстана и в ряде случаев приводит к физически трудно интерпретируемым значениям расчетных расходов. В то же время согласованность оценок, полученных по усеченной кривой обеспеченности и распределению GEV, параметризованному по L-моментам, подтверждает корректность усеченного подхода как инструмента управления статистической неопределенностью хвостовой части распределения максимального стока.

3.5 Статистическая неопределенность оценок редкого максимального стока

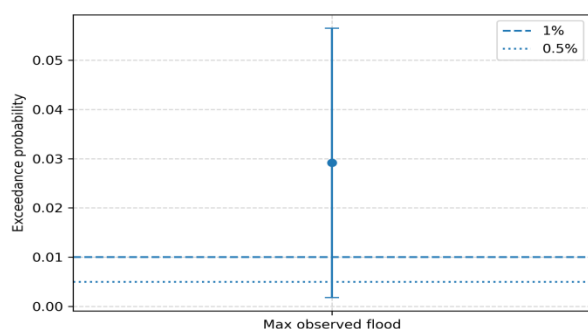
Для иллюстрации статистической неопределенности, присущей оценке редких паводков при конечной длине рядов наблюдений, на рисунке 5 приведены биномиальные доверительные интервалы вероятности превышения максимального годового стока.



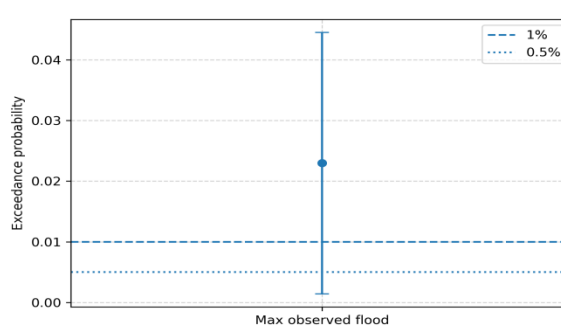
Жайык-Кошим



Илек – г. Актобе



Тобыл – г. Костанай



Есиль – г. Петропавловск

Рисунок 5. Биноминальные доверительные интервалы вероятности превышения максимального наблюдаемого паводка для рек Жайык, Илек, Тобыл и Есиль

Анализ рисунка 5 показывает, что при длине рядов наблюдений порядка 80...120 лет диапазон возможных значений вероятности превышения для экстремальных наблюдений остается достаточно широким. Это означает, что расчетные значения максимального стока с обеспеченностью менее 1 % не могут рассматриваться как строго определенные и обладают значительной статистической неопределенностью.

Данный результат имеет важное методическое и нормативное значение. Он подтверждает, что глубокая статистическая экстраполяция эмпирических рядов в область крайне редкой повторяемости не может быть выполнена без существенных допущений. В этих условиях применение усеченных кривых обеспеченности позволяет учесть объективные ограничения статистической информации и избежать ложной точности расчетных характеристик.

3.6 Инженерный пример применения усеченной методики

Рассмотрим типовую инженерную задачу - определение расчетного максимального расхода воды обеспеченности 1 % при проектировании мостового перехода через равнинную реку. В соответствии с нормативными требованиями расчетный расход используется для определения пропускной способности пролетных строений и расчетных уровней воды.

При использовании классического параметрического распределения Пирсона III расчетный расход может быть существенно искажен вследствие влияния одиночного экстремального паводка, зафиксированного в ряду наблюдений. В результате проектное решение либо оказывается недостаточно надежным (при занижении расчетного расхода), либо приводит к неоправданному увеличению размеров сооружения и росту стоимости строительства (при завышении).

Применение усеченной кривой обеспеченности позволяет получить расчетное значение максимального стока, опирающееся на статистически надежную часть эмпирического ряда и обеспечивающее более устойчивую оценку расхода обеспеченности 1 %. В инженерном смысле это приводит к снижению риска как недоучета, так и переучета паводочной опасности, что полностью соответствует принципам рационального и безопасного проектирования. Для рек с высокой асимметрией распределения ($C_s > 3$) использование усеченной методики позволяет снизить риск занижения расчетного расхода обеспеченности 1 % на 15...25 %.

Таким образом, усеченная методика может быть рекомендована в качестве дополнительного расчетного инструмента при проектировании мостовых переходов, водопропускных сооружений и гидротехнических объектов на равнинных реках Казахстана.

С учетом полученных результатов можно заключить, что применение усеченных кривых обеспеченности позволяет гармонизировать требования нормативных документов с реальными статистическими возможностями гидрологических рядов наблюдений. Методика не подменяет нормативные подходы, а дополняет их, повышая устойчивость и инженерную интерпретируемость расчетов максимального стока редкой повторяемости.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе рассмотрены методические подходы к оценке максимального годового стока редкой повторяемости равнинных рек Казахстана в условиях статистической неопределенности и ограниченной длины рядов наблюдений. Анализ выполнен на основе многолетних данных максимальных расходов воды по рекам Жайык, Есиль, Тобыл и Илек, характеризующихся различными условиями формирования паводков и степенью асимметрии распределения максимального стока.

Показано, что формальное применение классических параметрических распределений, в частности распределения Пирсона III, без учета особенностей эмпирической структуры рядов и статистической неопределенности хвостовой части распределения может приводить к методически неустойчивым оценкам максимального стока редкой повторяемости. Различия между расчетными значениями, полученными по параметрическому и усеченному подходам, существенно возрастают в области обеспеченностей 1 % и 0,5 %, что имеет принципиальное значение для инженерно-гидрологических расчетов.

Установлено, что усеченная графо-аналитическая кривая обеспеченности обеспечивает устойчивое согласование с эмпирическими данными в статистически надежной части распределения и позволяет контролировать характер экстраполяции в область редкой повторяемости. Применение усеченного подхода позволяет избежать резких перегибов расчетных кривых и получить физически интерпретируемые значения максимального стока, сопоставимые с историческими наблюдениями.

Обоснована методическая целесообразность применения усеченных кривых обеспеченности для оценки максимального стока редкой повторяемости при ограниченной длине рядов наблюдений.

Количественно показано влияние статистической неопределенности на оценки обеспеченностей менее 1% для равнинных рек Казахстана.

Продемонстрировано, что формальное применение распределения Пирсона III может приводить к систематическому занижению расчетных расходов редкой повторяемости.

Предложен инженерно интерпретируемый подход, согласующий требования нормативных документов с реальными статистическими возможностями гидрологических рядов.

Дополнительно показано, что применение распределения GEV с оценкой параметров методом максимального правдоподобия не устраняет проблему неопределенности оценки редких паводков для равнинных рек Казахстана и в ряде случаев приводит к физически трудноинтерпретируемым результатам. В то же время согласованность расчетов по усеченной кривой обеспеченности и GEV, параметризованному по L-моментам, подтверждает корректность предложенного подхода как инструмента управления статистической неопределенностью хвостовой части распределения.

Анализ статистической неопределенности показал, что при длине рядов наблюдений порядка 80...120 лет оценки вероятностей превышения менее 1 % характеризуются значительным разбросом и не могут рассматриваться как строго определенные. В этих условиях ограничение глубины статистической экстраполяции является методически оправданным и соответствует принципам надежности инженерных расчетов.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что применение усеченных кривых обеспеченности является эффективным инструментом повышения устойчивости расчетов максимального стока редкой повторяемости для равнинных рек Казахстана. Предлагаемый подход не противоречит действующим нормативным положениям и может рассматриваться как инструмент уточнения и повышения устойчивости расчетов максимального стока в области редкой повторяемости.

Результаты исследования могут быть использованы при инженерно-гидрологических расчетах, проектировании гидротехнических сооружений, мостовых переходов и систем противопаводковой защиты, а также при совершенствовании методических рекомендаций по расчету максимального стока в условиях ограниченной статистической информации.

ДОСТУПНОСТЬ ДАННЫХ

Данные, использованные в этом исследовании получены автором из официальных источников РГП «Казгидромет» и научных публикаций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сикан А.В. С Вероятностные распределения в гидрологии. Специальные главы теории и практики гидрологических расчетов: учебник. – СПб.: РГГМУ, 2020. – 286 с.
2. Свод правил по проектированию и строительству. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. СП 33-101-2003. – М.: Госстрой России, 2004. – 74 с.
3. Свод правил по проектированию и строительству. Инженерно-гидрометеорологические изыскания для строительства. СП 11-103-97. – М.: Госстрой России, 2004. – 29 с.
4. МСП 3.04-101-2005. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. – Астана: Комитет по делам строительства и ЖКХ МИИР РК, 2005. – 56 с.
5. Определение расчетных гидрологических характеристик. СНиП 2.01.14-83. – М.: Стройиздат, 1985. – 35 с.
6. Пособие по определению расчетных гидрологических характеристик. – Л.: Гидрометеоиздат, 1984. – 448 с.
7. Методические рекомендации по учету влияния хозяйственной деятельности на сток малых рек при гидрологических расчетах для водохозяйственного проектирования. – Л.: Гидрометеоиздат, 1986. – 168 с.
8. Gumbel E. J. Statistics of Extremes. – New York: Columbia University Press, 1958. – 375 p.
9. Рождественский А.В., Чеботарев А.М. Статистические методы в гидрологии. – Л.: Гидрометеоиздат, 1974. – 424 с.
10. World Meteorological Organization. Guide to Hydrological Practices. – Geneva : World Meteorological Organization, 2012. – 302 p. – (WMO-No. 168).
11. U.S. Army Corps of Engineers (USACE). Engineering and Design: Flood-Flow Frequency Analysis. – Washington, D.C.: U.S. Army Corps of Engineers, 1993. – 68 p. – (Engineer Manual EM 1110-2-1415).
12. England, J.F., Jr.; Cohn, T.A.; Faber, B.A.; Stedinger, J.R.; Thomas, W.O., Jr.; Veilleux, A.G.; Kiang, J.E.; Mason, R.R., Jr. Guidelines for Determining Flood Flow Frequency - Bulletin 17C. U.S. Geological Survey Techniques and Methods 2018, 4–B5, 148 p. <https://doi.org/10.3133/tm4B5> pubs.usgs.gov
13. Bayliss A. C. Catchment descriptors. – Vol. 5 of the Flood Estimation Handbook. – Wallingford : Centre for Ecology & Hydrology, 1999.
14. Review of risk based prioritization/decision making methodologies for dams. US Army Corps of Engineers. 2004, – p. 42.
15. Swain R.E., D.Bowles, D.Ostena. A framework for characterization of extreme floods for dam safety risk assessment. – Proceedings of the 1998 USCOLD Annual Lecture. – Buffalo, New York. August, 1998 – p. 13.
16. Молдахметов М., Махмудова Л., Турсунова А., Григорюк М., Канатұлы А., Жулкайнарова М., Ахметова М. . Природные и антропогенные факторы в формировании стока равнинных рек Казахстана в условиях нестационарности климата// Journal of Geography and Environmental Management. – 2023. – 69(2). <https://doi.org/10.26577/JGEM.2023.v69.i2.09>
17. Гальперин Р.И. Использование усеченных кривых распределения для расчета максимальных уровней воды в реках // Хабаршы вестник, сер. географ. – 1999, – №8-9. – С.109-111.
18. Гальперин Р.И. Ньюансы статистической интерпретации гидрологических рядов// Материалы Международной научно-практической конференции «Проблемы гидрометеорологии и экологии» – Алматы: КазНИИМОСК, 2001. – С.103-105.
19. Чеботарев А.И. Гидрологические расчеты. – Л.: Гидрометеоиздат, 1972. – 368 с.
20. Chow V.T., Maidment D.R., Mays L.W. Applied Hydrology. – New York: McGraw-Hill, 1988. – 572 p.
21. Griffis V.W., Stedinger J.R. Log-Pearson Type3 Distribution and Its Application in Flood Frequency Analysis I: Distribution Characteristics, Journal of Hydrologic Engineering, Vol. 12, No. 5, 2007, pp. 482-292. [doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(2007\)12:5\(482\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(2007)12:5(482))

22. Hosking, J.R.M. L-Moments: Analysis and Estimation of Distributions Using Linear Combinations of Order Statistics. // Journal of the Royal Statistical Society: Series B. - 1990. – Vol. 52(1), - 105–124. <https://doi.org/10.1111/j.2517-6161.1990.tb01775.x>
23. Кобзарь А. И. Прикладная математическая статистика. - М.: Физматлит, 2006. - 816 с.
24. Stedinger J.R., Vogel R.M., Foufoula-Georgiou E. Frequency analysis of extreme events // Handbook of Hydrology / ed. by D. R. Maidment. - New York: McGraw-Hill, 1993. - Sect.18.
25. Anghel, C.G. Revisiting the Use of the Gumbel Distribution: A Comprehensive Statistical Analysis Regarding Modeling Extremes and Rare Events. Mathematics – 2024. - 12, 2466. [Google Scholar] [CrossRef]
26. Anghel, C.-G.; Ianculescu, D. An In-Depth Statistical Analysis of the Pearson Type III Distribution Behavior in Modeling Extreme and Rare Events. Water 2025 17, 1539. [Google Scholar] [CrossRef]
27. Gómez, Y.M.; Gallardo, D.I.; Marchant, C.; Sánchez, L.; Bourguignon, M. An In-Depth Review of the Weibull Model with a Focus on Various Parameterizations // Mathematics. - 2024. – Vol. 12 – Art.56. [Google Scholar] [CrossRef]
28. Bardsley, E. The Weibull Distribution as an Extreme Value Model for Transformed Annual Maxima. J.Hydrol. - 2019, 58,123–131. Available online: <https://www.jstor.org/stable/26912154> (accessed on 9 October 2025).

REFERENCES

1. Sikan, A. V. (2020). *Veroyatnostnye raspredeleniya v gidrologii. Spetsialnye glavy teorii i praktiki gidrologicheskikh raschetov* [Probability distributions in hydrology. Special chapters of theory and practice of hydrological calculations]. Saint Petersburg: RGGMU [in Russian].
2. Svod pravil po proektirovaniyu i stroitelstvu. SP 33-101-2003. (2004). *Opredelenie osnovnykh raschetnykh gidrologicheskikh kharakteristik* [Code of practice for design and construction. Determination of basic design hydrological characteristics]. Moscow: Gosstroj Rossii [in Russian].
3. Svod pravil po proektirovaniyu i stroitelstvu. SP 11-103-97. (2004). *Inzhenerno-gidrometeorologicheskie izyskaniya dlya stroitelstva* [Engineering hydrometeorological surveys for construction]. Moscow: Gosstroj Rossii [in Russian].
4. MSP 3.04-101-2005. (2005). *Opredelenie osnovnykh raschetnykh gidrologicheskikh kharakteristik* [Determination of basic design hydrological characteristics]. Astana: Komitet po delam stroitelstva i ZhKKh MIIR RK [in Russian].
5. SNiP 2.01.14-83. (1985). *Opredelenie raschetnykh gidrologicheskikh kharakteristik* [Determination of design hydrological characteristics]. Moscow: Stroiizdat [in Russian].
6. Posobie po opredeleniyu raschetnykh gidrologicheskikh kharakteristik. (1984). *[Guidelines for determination of design hydrological characteristics]*. Leningrad: Gidrometeoizdat [in Russian].
7. Metodicheskie rekomendatsii po uchetu vliyaniya khozyaistvennoi deyatelnosti na stok malyykh rek pri gidrologicheskikh raschetakh dlya vodokhozyaystvennogo proektirovaniya. (1986). *[Methodological recommendations for accounting the impact of economic activity on small river runoff in hydrological calculations for water management design]*. Leningrad: Gidrometeoizdat [in Russian].
8. Gumbel, E. J. (1958). *Statistics of extremes*. New York, NY: Columbia University Press.
9. Rozhdestvenskii, A. V., & Chebotarev, A. M. (1974). *Statisticheskie metody v gidrologii* [Statistical methods in hydrology]. Leningrad: Gidrometeoizdat [in Russian].
10. World Meteorological Organization. (2012). *Guide to hydrological practices* (WMO-No. 168). Geneva.
11. U.S. Army Corps of Engineers. (1993). *Engineering and design: Flood-flow frequency analysis* (Engineer Manual EM 1110-2-1415). Washington, DC.
12. England, J. F., Jr., Cohn, T. A., Faber, B. A., Stedinger, J. R., Thomas, W. O., Jr., Veilleux, A. G., Kiang, J. E., & Mason, R. R., Jr. (2018). *Guidelines for determining flood flow frequency: Bulletin 17C* (USGS Techniques and Methods, Book 4, Chap. B5). U.S. Geological Survey. <https://doi.org/10.3133/tm4B5>
13. Bayliss, A. C. (1999). *Catchment descriptors* (Flood Estimation Handbook, Vol. 5). Wallingford, UK: Centre for Ecology & Hydrology.
14. U.S. Army Corps of Engineers. (2004). *Review of risk-based prioritization/decision-making methodologies for dams*. Washington, DC.
15. Swain, R. E., Bowles, D., & Ostenaar, D. (1998). *A framework for characterization of extreme floods for dam safety risk assessment*. Proceedings of the USCOLD Annual Lecture, Buffalo, NY.
16. Moldakhmetov, M., Makhmudova, L., Tursunova, A., Grigoruk, M., Kanatuly, A., Zhulqainarova, M., & Akhmetova, M. (2023). Prirodnye i antropogennye faktory v formirovani stoka ravninnykh rek Kazakhstana v usloviyakh nestatsionarnosti klimata [Natural and anthropogenic factors in the formation of runoff of plain rivers of Kazakhstan under climate non-stationarity]. *Journal of Geography and Environmental Management*, 69(2). <https://doi.org/10.26577/JGEM.2023.v69.i2.09> [in Russian].
17. Galperin, R. I. (1999). Ispolzovanie usechennykh krivykh raspredeleniya dlya rascheta maksimumnykh urovnei vody v rekakh [Use of truncated distribution curves for calculating maximum river water levels]. *Khabarshy vestnik. Seriya geograficheskaya*, (8–9), 109–111 [in Russian].
18. Galperin, R. I. (2001). Nyuansy statisticheskoi interpretatsii gidrologicheskikh ryadov [Nuances of statistical interpretation of hydrological series]. In *Proceedings of the International Scientific and Practical Conference "Problems of Hydrometeorology and Ecology"* (pp. 103–105). Almaty: KazNIIMOSK [in Russian].
19. Chebotarev, A. I. (1972). *Gidrologicheskie raschety* [Hydrological calculations]. Leningrad: Gidrometeoizdat [in Russian].
20. Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1988). *Applied hydrology*. New York, NY: McGraw-Hill.

21. Griffis, V. W., & Stedinger, J. R. (2007). Log-Pearson Type III distribution and its application in flood frequency analysis I: Distribution characteristics. *Journal of Hydrologic Engineering*, 12(5), 482–491. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(2007\)12:5\(482\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(2007)12:5(482))
22. Hosking, J. R. M. (1990). L-moments: Analysis and estimation of distributions using linear combinations of order statistics. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B*, 52(1), 105–124. <https://doi.org/10.1111/j.2517-6161.1990.tb01775.x>
23. Kobzar, A. I. (2006). *Prikladnaya matematicheskaya statistika* [Applied mathematical statistics]. Moscow: Fizmatlit [in Russian].
24. Stedinger, J. R., Vogel, R. M., & Foufoula-Georgiou, E. (1993). Frequency analysis of extreme events. In D. R. Maidment (Ed.), *Handbook of hydrology* (Sect. 18). New York, NY: McGraw-Hill.
25. Anghel, C. G. (2024). Revisiting the use of the Gumbel distribution: A comprehensive statistical analysis regarding modeling extremes and rare events. *Mathematics*, 12, 2466. <https://doi.org/10.3390/math12162466>
26. Anghel, C.-G., & Ianculescu, D. (2025). An in-depth statistical analysis of the Pearson Type III distribution behavior in modeling extreme and rare events. *Water*, 17, 1539. <https://doi.org/10.3390/w17101539>
27. Gómez, Y. M., Gallardo, D. I., Marchant, C., Sánchez, L., & Bourguignon, M. (2024). An in-depth review of the Weibull model with a focus on various parameterizations. *Mathematics*, 12, 56. <https://doi.org/10.3390/math12010056>
28. Bardsley, E. (2019). The Weibull distribution as an extreme value model for transformed annual maxima. *Journal of Hydrology*, 58, 123–131.

ҚАЗАҚСТАННЫҢ ЖАЗЫҚ ӨЗЕНДЕРІНІҢ СИРЕК ҚАЙТАЛАНАТЫН ЕҢ ЖОҒАРЫ АҒЫНДЫСЫН СТАТИСТИКАЛЫҚ БЕЛГІСІЗДІК ЖАҒДАЙЫНДА БАҒАЛАУДЫҢ ӘДІСТЕМЕЛІК ТӘСІЛДЕРІ

Марат М. Молдахметов, г.ғ.к.

Ш. Мұртаза атындағы Халықаралық Тараз университеті, Тараз, Қазақстан; mmoldahmetov64@mail.ru

Автор корреспонденциясы: mmoldahmetov64@mail.ru

ТҮЙІН СӨЗДЕР

Ең жоғары ағынды, сирек қайталанушылық, қамтамасыз етілу қисығы, статистикалық белгісіздік, шектелген қамтамасыз етілу қисығы, Пирсонның III үлестірімі, жалпыланған экстремалды үлестірім (GEV), Қазақстанның жазық өзендері

Мақала жайында:

Алынды: 17.01.2026
Қайта қаралды: 27.04.2026
Қабылданды: 05.06.2026
Жарияланды: 01.07.2026

АБСТРАКТ

Сирек қайталанатын максимал ағындыны бағалау инженерлік гидрологиядағы негізгі міндеттердің бірі, өйткені қамтамасыздығы 1 %, 0,5 % және одан төмен болатын есептік су өтімдері гидротехникалық құрылыстарды, көпірлерді, су өткізгіш құрылғыларды және су тасқынынан қорғау жүйелерін жобалау мен пайдалануда тікелей қолданылады. Инженерлік тәжірибеде мұндай сипаттамаларды есептеу, әдетте, параметрлік статистикалық үлестірімдерді формалды қолдануға және эмпирикалық қатарларды аз ықтималдықтар аймағына экстраполяциялауға негізделеді. Алайда бақылау қатарларының ұзақтығы шектеулі және максимал ағындының таралуы айқын асимметриялы болған жағдайда мұндай экстраполяция елеулі статистикалық белгісіздікпен қатар жүреді және әдістемелік тұрғыдан дұрыс емес әрі физикалық тұрғыдан қиын интерпретацияланатын нәтижелерге әкелуі мүмкін. Қиылған үлестірім әдісінің әдістемелік артықшылығы үлестірімнің статистикалық сенімді бөлігіндегі RMSE критерийлері, үлестірімнің төменгі бөлігін экстраполяциялау тұрақтылығы және есептік өтімдердің физикалық интерпретациялану мүмкіндігі бойынша бағаланды. Статистикалық белгісіздіктің сандық бағасы бақылау қатарларының шектеулі ұзақтығы жағдайында асып кету ықтималдығының сенімділік интервалдарын анықтау арқылы орындалды. Жұмыста статистикалық белгісіздік жағдайында Қазақстанның жазық өзендерінің сирек қайталанатын жылдық ең жоғары ағындысын бағалаудың әдістемелік тәсілдері қарастырылған. Талдау Жайық, Есіл, Тобыл және Елек өзендері бойынша су өтімінің максималды мәндерінің көпжылдық қатарлары негізінде жүргізілді. Пирсонның III-типті үлестіріміне негізделген классикалық

параметрлік тәсілмен қатар, қамтамасыздық қисықтарын тұрғызудың шектелген графо-аналитикалық әдістемесі және жалпыланған экстремалды үлестірім (GEV) қолданылды.

Пирсонның III-типті үлестірімін қолдану шектелген қамтамасыздық қисығымен салыстырғанда қамтамасыздығы 1 % сәйкес есептік су өтімдерін 12,5...25 % аралығында жүйелі түрде төмендететіні анықталды. Сонымен қатар, жазық өзендер үшін GEV үлестірімін максималды ықтималдық әдісімен (MLE) параметрлеу үлестірімнің төменгі бөлігінің тұрақсыздығына және сирек қайталанатын су өтімдерін асыра бағалауға әкелуі мүмкін екені көрсетілді. Ал GEV үлестірімін L-моменттер бойынша параметрлеу шектелген тәсіл нәтижелерімен жақсы үйлесетін неғұрлым тұрақты бағаларды қамтамасыз етеді.

Алынған нәтижелер бақылау қатарларының ұзақтығы шамамен 80...120 жыл болған жағдайда 1 %-дан төмен қамтамасыз етілу аймағына терең статистикалық экстраполяцияның жоғары белгісіздікпен сипатталатынын көрсетеді, бұл сирек қайталанатын максималды ағындыны есептеу кезінде экстраполяцияны шектеудің әдістемелік тұрғыдан дұрыс екенін дәлелдейді.

METHODOLOGICAL APPROACHES FOR ESTIMATING RARE MAXIMUM STREAMFLOW IN LOWLAND RIVERS OF KAZAKHSTAN UNDER STATISTICAL UNCERTAINTY

Marat Moldakhmetov, candidate of geographical sciences

The International Taraz University named after SH.Murtaza, Taraz, Kazakhstan; mmoldahmetov64@mail.ru

Corresponding author: mmoldahmetov64@mail.ru

KEY WORDS

maximum streamflow,
rare events,
frequency curve,
statistical uncertainty,
truncated frequency curve,
Pearson type III distribution,
generalized extreme value
distribution (GEV),
lowland rivers of Kazakhstan

About article:

Received: 17.01.2026

Revised: 27.04.2026

Accepted: 05.06.2026

Published: 01.07.2026

ABSTRACT

The assessment of rare maximum streamflow is one of the key tasks in engineering hydrology, since design discharges with exceedance probabilities of 1 %, 0,5 %, and lower are directly used in the design and operation of hydraulic structures, bridges, culverts, and flood protection systems. In engineering practice, such characteristics are commonly determined using parametric statistical distributions with extrapolation of empirical series into the domain of low exceedance probabilities. However, when observation records are of limited length and the distribution of maximum streamflow exhibits pronounced asymmetry, such extrapolation is associated with substantial statistical uncertainty and may lead to methodologically incorrect and physically difficult-to-interpret results. The methodological advantage of the truncated approach was assessed using RMSE criteria within the statistically reliable portion of the distribution, stability of tail extrapolation, and physical interpretability of calculated discharge values. Quantitative assessment of statistical uncertainty was performed using confidence intervals of exceedance probability under finite observation record length conditions.

This study examines methodological approaches to the assessment of rare annual maximum streamflow of lowland rivers in Kazakhstan under conditions of statistical uncertainty. The analysis is based on long-term records of annual maximum discharges for the Zhaiyk (Ural), Esil, Tobol, and Ilek rivers. Along with the classical parametric approach based on the Pearson type III distribution, a truncated graphical-analytical method for constructing frequency curves and the generalized extreme value (GEV) distribution were applied.

It is shown that the use of the Pearson type III distribution leads to a systematic underestimation of design discharges with 1% exceedance probability by 12.5...25% compared to the truncated frequency curve. It is also established that the application of the GEV distribution parameterized by the maximum likelihood estimation (MLE) method for lowland rivers may result in unstable behavior of the distribution tail and overestimation of rare design discharges, whereas GEV parameterization based on L-moments provides more stable estimates that are consistent with the results obtained using the truncated approach.

The results demonstrate that for observation records with lengths of approximately 80...120 years, deep statistical extrapolation into the domain of exceedance probabilities below 1% is characterized by high uncertainty. This provides a methodological justification for limiting extrapolation when estimating rare maximum streamflow.

Примечание издателя: заявления, мнения и данные во всех публикациях принадлежат только автору (авторам), а не журналу "Гидрометеорология и экология" и/или редактору (редакторам).