

РАСЧЁТ ХАРАКТЕРИСТИК ЛИВНЕВЫХ ПАВОДКОВ ЗАДАННОЙ ВЕРОЯТНОСТИ ПРЕВЫШЕНИЯ НА РЕКАХ ПРЕДКАРПАТЬЯ

Предложен метод расчёта максимальных средних многолетних и 1%-ной вероятности превышения расходов воды дождевых паводков Предкарпатья. Приведены численные значения эмпирических коэффициентов для разработанных формул по двум физико-географическим районам этого региона.

Цель работы – предложить методику расчёта максимальных расходов воды ливневых паводков заданной вероятности превышения для неизученных малых рек Предкарпатского региона.

Актуальность исследования обусловлена громадным ущербом, наносимым паводками, экономике Предкарпатского региона. Полный перечень наиболее сильных дождевых паводков с указанием дат их прохождения за 150-летний период опубликовано в работе [8]. За последние годы грозные силы природы проявили себя на территории Ивано-Франковской (20-22.06.2001 г.), Львовской (28-29.07.2001 г.), Черновицкой области (16-22.07.2002 г.) [8].

Для защиты народнохозяйственных объектов и людей необходимо проведение серьёзных гидротехнических мероприятий. Такое строительство требует от учёных детальной информации о величинах максимальных расходов воды и слоёв стока заданной вероятности превышения.

В раннее опубликованных исследованиях предлагались различные региональные методики определения этих характеристик, предложенные П.Ф.Вишневым [1], П.М.Лютиком [6], а также обобщенный метод расчёта, изложенный в СНиП 2.01.14-83. Большой объём работ по изучению характеристик ливневого стока в Предкарпатье выполнен М.Н.Соседко [9]. Этим исследователем показано влияние особенностей орографического строения на закономерности распределения осадков по территории, установлена связь между параметрами расчётных формул и

факторами подстилающей поверхности. В своих работах М.Н.Соседко доказал необходимость районирования территории Предкарпатья и указал примерные границы областей, исходя из высотного положения речных бассейнов [9]. Однако с момента опубликования этих исследований прошло от 20 до 40 лет. За это время зафиксировано большое количество высоких ливневых паводков, изменивших все ранее полученные характеристики стока. Исходя из этого, возникла необходимость продолжить эту работу и создать новую региональную методику расчёта.

Фактический материал и методы исследования. В качестве исходных данных использована информация о ежегодных максимальных расходах воды ливневых паводков по 37 опорным пунктам, расположенным на территории исследуемого региона. Для каждого из них собраны массивы максимальных расходов воды ливневых паводков за весь имеющийся период наблюдений, в большинстве случаев до 2000г. Однако значительное количество данных имеет пропуски, 45% водпостов были ранее закрыты, поэтому использовать такую информацию без специальной обработки практически невозможно. Для ликвидации пробелов с помощью методики восстановления пропусков в рядах характеристик максимального стока удалось увеличить среднюю продолжительность наблюдений с 40 до 72 -75 лет [4].

Подробная характеристика распределения пунктов наблюдений, их гидрографические параметры приведены в табл. 1. Площади водосборов рек исследуемого региона изменяются от 76,3 км² (р. Славско – с.Славское) до 2950 км² (р. Стрый – г. Жидачев). Длины рек изменяются от 16 до 213 км, уклоны от 3,8 до 30,3‰, а диапазон средних высот находится в пределах 330 – 1200 м.

Располагая удлинёнными рядами максимальных расходов воды дождевых паводков, оказалось возможным построить кривые распределения ежегодных вероятностей превышения по всем пунктам наблюдений. Численные значения ординат эмпирических кривых обеспеченности рассчитывались по формуле:

$$P_m = \frac{m}{n + 1} \cdot 100\% \quad , \quad (1)$$

где m – порядковый номер членов ряда гидрологической характеристики, расположенного в убывающем порядке, n – общее число членов ряда.

Для сглаживания и экстраполяции эмпирических кривых ежегодных вероятностей превышения используются, в большинстве

случаев, различные виды функций трехпараметрического распределения. Каждое из них имеет свои индивидуальные особенности, связанные с границами их применения. В практике гидрологических расчётов широкое распространение получили такие трёхпараметрические распределения как Пирсона III-го типа (биномиальная кривая), Крицкого и Менкеля, а также логарифмически нормальная кривая. Из них наиболее многолетний опыт применения имеет биномиальная функция, поскольку она достаточно точно соответствует наблюдаемым данным [7]. Основным её недостатком является ограниченный нижний предел, поэтому она используется при отношении коэффициентов асимметрии и вариации $C_s/C_v \geq 2$. Более удачная схема распределения для расчётов характеристик стока предложена С.Н.Крицким и М.Ф.Менкелем, поскольку их метод применим при любом отношении C_s/C_v [6, 7].

Основными оценками параметров аналитических кривых распределения являются среднее многолетнее значение величин стока – \bar{Q} , коэффициент вариации C_v и отношение коэффициента асимметрии к коэффициенту вариации C_s/C_v . Их численные значения устанавливаются по рядам наблюдений за рассматриваемой гидрологической характеристикой методами наибольшего правдоподобия и моментов.

Важнейшей характеристикой рядов исследуемых величин является их модульный коэффициент (k), определяемый по формуле:

$$k_i = \frac{Q_i}{\bar{Q}}, \quad (2)$$

Q_i – годовые значения расходов воды; \bar{Q} – среднее арифметическое значение расходов воды.

Коэффициент вариации C_v и коэффициент асимметрии C_s для трехпараметрического гамма-распределения обычно определяется методом наибольшего правдоподобия в зависимости от величин статистик λ_2 и λ_3 . Их численные значения рассчитываются по формулам:

$$\lambda_2 = \left(\sum_{i=1}^n \lg k_i \right) / (n-1), \quad (3)$$

$$\lambda_3 = \left(\sum_{i=1}^n k_i \lg k_i \right) / (n-1), \quad (4)$$

где n – число лет наблюдений за стоком.

Таблица 1

Гидрографические характеристики, периоды наблюдений за стоком на водотоках Предкарпатья

№ п / п	Водосбор	Количество пунктов наблюдений за стоком на водосборе	Диапазон изменения характеристик				Средняя продолжительность наблюдений за стоком, T лет	
			площади водосборов F , км ²	длины рек L , км	уклоны водотоков I , ‰	средние высоты H , м	фактическая	восстановленная
1	р.Днестр – с.Корналовичи	3	384-895	35-99	5,05-16,6	560-620	42	80
2	р.Быстрица (Тысменская) – устье	2	206-250	25-38	11-21	390-520	52	68
3	р.Стрый – г.Жидачев	14	76,3-2950	13,3-213	3,83-27,1	690-900	41	71
4	р.Свича – с.Журавно	5	138-1490	20-119	9,3-26	660-1000	44	72
5	р.Ломница – с.Пукасовцы	5	86,2-1520	16-121	8,0-30,2	580-1200	35	60
6	р.Быстрица – с.Ямница	6	112-2450	17-101	4,6-30,3	330-1080	29	86

Исходя из полученных значений статистик λ_2 и λ_3 , коэффициенты вариации и асимметрии находят по специальным таблицам, номограммам или с помощью вычислительной программы [7].

На основе изложенной методики определения параметров и квантилей разработана вычислительная программа «BORESTOR-3», алгоритм которой состоит в последовательности выполнения следующих действий:

- из базы данных выбирается конкретный многолетний ряд наблюдений и строится его эмпирическое распределение;
- задаётся аналитическая аппроксимация функции распределения по С.Н. Крицкому и М.Ф. Менкелю или Пирсона III типа;
- вычисляются параметры кривых обеспеченностей в нескольких вариантах:

1) для распределения Пирсона – III типа с использованием метода моментов;

- 2) по схеме С.Н.Крицкого и М.Ф.Менкеля с помощью метода моментов и наибольшего правдоподобия;
- осуществляется вычисление характеристик заданной обеспеченности при определенных параметрах и конкретном аналитическом распределении;
 - дополнительно устанавливается аналитическая аппроксимация, для которой среднее значение ряда и коэффициент вариации вычисляются заданным методом, а отношение оценок C_s/C_v подбирается при достижении минимума суммы квадратов отклонений между эмпирическим и аналитическим распределениями;
 - также в алгоритме заложена возможность получения третьего варианта, когда пользователь сам варьирует отношением C_s/C_v при выборе наилучшей аппроксимации, например в области интересующих малых обеспеченностей в 1-5%.

Таким образом, в результате расчетов по программе может быть получено несколько вариантов вычислений. Окончательный вариант аппроксимации выбирался из условий наименьшего расхождения между аналитическим распределением и эмпирическими данными, особенно в области малых обеспеченностей.

В результате расчётов по всем 35 пунктам наблюдений удалось установить 1%-ные ($Q_{1\%}$) и среднегодовые (Q_{cp}) расходы воды ливневых паводков. С их помощью можно произвести расчёты гидрологических характеристик для проектирования гидротехнических сооружений в тех случаях, когда имеются данные наблюдений за стоком воды. В Предкарпатье протекает более 60 рек, относящихся к четвёртому уровню иерархии, свыше 300 водотоков третьего порядка, а число рек более низких порядков исчисляется тысячами [5]. Исходя из этого, статистические параметры различных характеристик стока чаще всего приходится определять при недостаточности данных наблюдений или полном их отсутствии. Решить этот вопрос можно с помощью географо-гидрологического метода сформулированного В.Г.Глушковым, который рассматривает сток воды в комплексе с другими компонентами ландшафта [9]. В соответствии с этим методом должны быть разработаны территориально общие зависимости параметров ливневого стока от обуславливающих его факторов. В ранее опубликованных работах автора на территории Предкарпатья выделено два физико-географических

района, внутри которых имеется устойчивое соотношение между показателями гидрографической сети и ливневых паводков [5]. Первый – Верхне-Днестровский, куда вошли бассейны рек Днестра, Стрия, Быстрицы-Тысменской. Второй – Скибовых Карпат, где находятся водосборы рек Свичи, Ломницы, Быстрицы. По каждому из них должны быть построены зависимости параметров рядов от гидрографических факторов подстилающей поверхности. В качестве основных показателей расходов воды ливневых паводков выбраны две наиболее важные характеристики $Q_{1\%}$ и $Q_{ср}$. Для удобства расчётов и сравнимости результатов значения расходов воды пересчитывались в величины модулей стока – $M_{ср}$ и $M_{1\%}$.

В качестве предполагаемых гидрографических факторов для расчета гидрологических характеристик выбраны следующие:

- F – площадь водосбора ($км^2$);
- H – высота водосбора (м);
- L – длина реки от истока до пункта наблюдений (км);
- I – средний уклон реки (‰);
- f_l – лесистость водосбора (‰);
- γ_F – густота речной сети ($км/км^2$).

Кроме того, дополнительно были включены еще два новых морфометрических показателя:

- K – коэффициент структуры речной сети;
- Φ_B – геоморфологический параметр.

Значения коэффициента K характеризуют степень сложности гидрографической сети и определяются по формуле:

$$K = \log_2 S_I + 1, \quad (5)$$

где S_I – количество притоков первого порядка, определяемое по географической карте [2].

Параметр А.Н.Бефани (Φ_B) является показателем морфометрического строения речного бассейна и вычисляется по выражению:

$$\Phi_B = \frac{\sum_{i=1}^k li}{\sqrt{I}} \quad (6)$$

где $\sum_{i=1}^k li$ – суммарная длина речной сети; I – средний уклон русла реки.

Методика построения региональных зависимостей основана на использовании метода множественной линейной регрессии. Выбор функционального преобразования осуществлялся, если коэффициент парной корреляции статистически значимо отличался от коэффициента парной корреляции прямолинейной зависимости. Статистически значимое отличие определялось следующим неравенством:

$$R_{\phi} > R_{np} + \sigma_R, \quad (7)$$

где: R_{ϕ} – коэффициент парной корреляции при рассматриваемом функциональном преобразовании фактора, R_{np} – коэффициент парной корреляции прямолинейной зависимости, σ_R – стандартная погрешность коэффициента корреляции прямолинейной зависимости [3].

На основе предложенного критерия установлено, что статистически значимое преобразование имеет место только для площади водосбора, которую следует представить в виде ее десятичного логарифма lgF .

Использование методов шаговой процедурой и исключения позволяет выбрать из всех предполагаемых факторов только те, которые имеют наибольшую значимость. Такая оценка выполняется с помощью расчета вклада каждой переменной, которая выражается в процентах к общему описанию разброса точек полученным уравнением. Расчёты показали, что статистически значимыми являются пять факторов: lgF , Φ_B , γ_F , f_L , K .

По каждому из двух районов построены зависимости величин $M_{1\%}$ от пяти показателей в виде:

$$M_{1\%} = a_0 + a_1 lg F + a_2 f_L + a_3 \gamma_F + a_4 K + a_5 \Phi_B, \quad (8)$$

где $a_0, a_1 \dots a_5$ – эмпирические параметры.

Численные значения эмпирических параметров для каждого из трёх районов приведены в табл. 2. Оценка точности предлагаемых зависимостей производилась путём подсчёта коэффициентов корреляции и доверительных интервалов при заданном уровне значимости по методике, изложенной в работе [3].

Результаты регионального моделирования модулей ливневого стока в
Предкарпатье

№ п/п	Наименование района	Величины эмпирических коэффициентов						Коэф. корре- ляции уравнения R
		a ₀	a ₁	a ₂	a ₃	a ₄	a ₅	
I	Верхне- Днестровский	3,51	-0,41	0,013	0,16	-0,17	0,003	0,804
II	Скибовых Карпат	11,5	7,81	0	0,21	0,98	0,003	0,828

Результаты оценки точности предлагаемого метода оказались вполне удовлетворительными. Так, для уравнения (8) коэффициенты корреляции составляют для Верхне-Днестровского района – 0,804, для района Скибовых Карпат – 0,828.

Результатом настоящего исследования является построение кривых обеспеченности максимальных расходов воды ливневых паводков по удлинненным рядам для 35 опорных пунктов в Предкарпатском регионе. Определение величин среднегодовых и 1%-ных величин Q_m с использованием кривых обеспеченности Пирсона III типа, а также Крицкого и Менкеля.

Предложен региональный метод расчёта величин $Q_{1\%}$ и Q_{cp} по соответствующим формулам в зависимости от гидрографических характеристик речных бассейнов.

Задачей дальнейших исследований является расширение границ использования этого метода и определение необходимых для его реализации характеристик по всему Карпатскому региону.

* *

Запропоновано метод розрахунку максимальних середніх багаторічних і 1%-ної ймовірності перевищення витрат води дощових паводків. Приведено чисельні значення емпіричних коефіцієнтів для розроблених формул для двох фізико-географічних районів цього регіону.

* *

1. *Вишневецький П.Ф.* Зливи і зливовий стік на Україні. – К.: Наук. думка, 1964. – 288 с.
2. *Гарман И.Н.* Топология речных систем и гидрографические индикационные исследования // Водные ресурсы. – 1973. – №3. – С. 109-124.
3. *Дрейпер Н., Смит Г.* Прикладной регрессионный анализ // Статистика. – М., 1973. – 392 с.
4. *Кіндюк Б.В.* Відновлення рядів максимального зливого стоку методом аналогії на річках Закарпаття // Метеорологія, кліматологія та гідрологія. – 2003. – Вип.47. – С. 243-256.
5. *Кіндюк Б.В.* Исследование характеристик рядов ливневого стока малых рек бассейна верхнего Днестра // Культура народов Причерноморья. Крымский научный центр НАН Украины. – 2003. – Вып.39. – С. 9-13.
6. *Лютик П.М., Михальская Л.Д., Коваленко Л.Н.* Расчеты паводочного стока на реках Украины и Молдавии // Труды УкрНИГМИ. – 1986. – Вып.217. – С. 52-91.
7. Пособие по определению расчётных гидрологических характеристик. – Л.: Гидрометеиздат, 1984. – 448 с.
8. *Ромащенко М., Савчук Д.* Водні стихії. Карпатські повені. Статистика, причини, регулювання / Під ред. *М.І.Ромащенка*. – К.: Аграрна наука, 2002. – 304 с.
9. *Соседко М.Н.* Зависимость характеристик максимальных расходов воды дождевых паводков в бассейне Днестра от ландшафтных условий // Труды УкрНИГМИ. – 1973. – Вып.123. – С. 100-116.