

УДК 556.048

СОВМЕСТНЫЙ АНАЛИЗ ДАННЫХ ПО МАКСИМАЛЬНОМУ СТОКУ И ОСАДКАМ В БАССЕЙНЕ РЕКИ АДАГУМ

© 2014 г. М.В. Болгов, Н.В. Осипова

Институт водных проблем Российской академии наук, Москва

Ключевые слова: катастрофический паводок, совместный анализ, р. Адагум, г. Крымск, наводнение, осадки.



М.В. Болгов



Н.В. Осипова

Рассмотрены вопросы применения методики совместного анализа данных для групп метеорологических и гидрологических станций в паводкоопасных регионах на примере катастрофического паводка на р. Адагум в г. Крымске 6–7 июля 2012 г., приведшего к образованию разрушительного наводнения.

Применяемые в инженерной гидрологии статистические методы определения расчетных характеристик паводков (квантилей распределения) предполагают индивидуальную обработку последовательностей наблюдаемых значений стока или осадков. Временные ряды величин максимального стока рек, как правило, короткие и часто содержат так называемые «отскакивающие» точки или выдающиеся явления, в результате чего расчетные параметры могут характеризоваться большой ошибкой. Для учета выдающихся явлений при статистической обработке гидрологических рядов используют формулу С.Н. Крицкого – М.Ф. Менкеля, рекомендуемую действующим Сводом правил по определению расчетных гидрологических характеристик [1].

Для уточнения результатов гидрологических расчетов необходимо применение гипотез, позволяющих увеличивать объем независимой информации и повышающих достоверность результатов. К числу таких гипотез относится идея совместного (комбинированного) анализа данных по нескольким водосборам, расположенным в пределах однородных районов. Идея совместного анализа содержит некоторое противоречие: с одной стороны, данные наблюдений в отдельных пунктах должны быть статистически независимыми, с другой – регион не может быть очень большим, поскольку

Водное хозяйство России № 3, 2014

Водное хозяйство России

условия формирования стока (исследуемой характеристики) должны быть однородными. Данным условиям наилучшим образом соответствует формирование ливневых паводков на малых водосборах. Ливневые осадки, формирующие такие паводки, характеризуются очень большой редукцией по площади. Ядро катастрофического ливня, как это наблюдалось в Крымске, может занимать площадь в несколько сотен квадратных километров. Данное обстоятельство делает возможным применение метода объединения совокупностей к максимальным модулям паводочного стока и слоям ливневых осадков за весь период продолжительности дождя.

Проблемы анализа и прогнозирования быстроразвивающихся паводков в изучаемом регионе были рассмотрены в ряде работ [2, 3]. В данной статье паводок 2012 г. на р. Адагум, а точнее его вероятностная оценка, исследованы на основе одной из версий совместного анализа данных, предполагающей построение и изучение порядковых статистик, а именно – занимающих определенное положение (порядок) в ранжированной совокупности величин. Речь идет о совместном анализе наибольших, то есть занимающих первое место в наблюдаемых рядах, значениях стока или осадков на основе формулы умножения вероятностей.

В гидрологии этот подход известен под названием совместный анализ, который позволяет проверять соответствие получаемых по расчету вероятностей экстремумов стока наблюдаемым (оцениваемым) по группам гидрологически сходных бассейнов [4, 5]. Таким образом, создается представление о возможной систематической ошибке в оценке экстремального стока. Для исследования распределений вероятностей максимальных расходов воды такой подход приемлем, поскольку сами ряды экстремумов стока образуют последовательности независимых случайных величин.

Для оценки типа распределения в диапазонах экстремальных значений гидрологических характеристик рекомендуется применять кривые обеспеченности обеспеченностей [4–6].

Положим, что по нескольким пунктам наблюдений имеются независимые ряды наблюдений численностью каждый n лет и выберем самые высокие в каждом ряду величины. Если для рядов построены кривые обеспеченности, то, пользуясь ими, можно для каждого экстремума найти приписываемую ему теоретическую ежегодную вероятность превышения. Закон распределения этих вероятностей среди множества выборок по n членов определяется на основании правила умножения вероятностей зависимостью

$$P = 1 - (1 - p)^n, \quad (1)$$

где P – вероятность того, что ежегодная вероятность превышения экстремума выборки, состоящей из n членов, превысит величину p . Кривую, отвеча-

ящую этому закону, можно назвать кривой вероятности вероятностей [7]. Сопоставляя с ней значения p , оцененные по экстремумам отдельных рядов, получаем возможность проверить степень соответствия наблюдаемой в природе повторяемости экстремумов теоретическим предположениям.

Если эмпирические точки отклоняются в одну сторону от теоретической кривой, то это указывает на систематическое отклонение принятого закона распределения от истинного. Если точки располагаются выше теоретической кривой распределения, это означает, что обеспеченность наблюдаемого максимума систематически завышается, если ниже – занижается.

Связь между величиной наблюдаемых экстремумов и оценками параметров распределения сказывается на рассеянии вероятностей. Погрешность в оценках теоретической вероятности превышения, вызываемая искажением оценок параметров, наиболее сильно отражается на оценке повторяемости исключительно высоких максимумов, выдающихся во всем ансамбле совместно исследуемых бассейнов. Вероятность их преувеличивается, вследствие чего рассеяние вероятностей экстремумов преуменьшается. Это ограничивает возможности проверять рассматриваемым методом соответствие верхних участков кривых распределения в области малых вероятностей превышения (порядка 1/1000) [7].

Описанный выше критерий использовали для проверки соответствия эмпирических и теоретических кривых обеспеченности для выделенных с помощью методики совместного анализа данных максимальных суточных осадков за годы наблюдений и максимальных расходов в исследуемом районе.

Основные сведения о гидрологических постах и метеорологических пунктах наблюдений приведены в табл. 1, 2.

Таблица 1. Список гидрологических постов

№ п/п	Код поста	Река – пост	F , км ²	N , лет	Q_{cp} , м ³ /с	Q_{max} , м ³ /с
1	83395	р. Псекупс – г. Горячий ключ	765	70	526	944
2	83385	р. Пшиш – г. Хадыженск	710	62	374	1100
3	83460	р. Псекупс – с. Садовое	111	29	200	452
4	83409	р. Афипс – ст-ца Смоленская	317	68	203	454
5	83411	р. Шебш – с. Шабановский	110	33	180	386
6	83415	р. Убинка – ст-ца Северская	201	74	112	265
7	83481	р. Абин – ст-ца Шапсугская	203	13	187	397
8	83437	р. Адегой – ст-ца Шапсугская	125	45	126	329
9	83441	р. Адагум – г. Крымск	328	73	191	1400
10	83456	р. Пшеха – с. Черниговское	641	34	342	858

Таблица 2. Список метеорологических станций

№ п/п	Название станции	N, лет	Максимальные суточные осадки, мм
1	г. Крымск	52	156
2	г. Новороссийск	52	275
3	г. Геленджик	78	311
4	г. Краснодар	62	107,2
5	г. Анапа	57	85,9
6	пос. Горный	51	296,8
7	г. Темрюк	35	83,2
8	г. Славянск на Кубани	35	100,8
9	г. Туапсе	56	179,5
10	пос. Горячий ключ	55	91,9
11	пос. Джугба	72	204,7

По данным о наибольших годовых расходах воды для каждого гидрологического поста в исследуемом районе были построены кривые обеспеченности Крицкого – Менкеля с оцениванием параметров методом моментов. С каждого графика сняты значения расхода 1 % обеспеченности, а для максимального значения в ряду – обеспеченность наибольшего члена ряда.

Для полученных значений по формуле (1) были рассчитаны ординаты кривой обеспеченности обеспеченностей. Данные и результаты расчетов приведены в табл. 3.

Таблица 3. Параметры кривой обеспеченности обеспеченностей для максимальных расходов

№ поста	Код поста	$Q_{1\%}$ расчетный, м ³ /с	$P = m/(n + 1)$	$P(Q_{\max}), \%$	$p = 1 - (1 - P)^{(1/n)}$
1	83395	929	0,091	0,82	0,0019
2	83385	1044	0,182	0,71	0,0039
3	83460	502	0,273	1,92	0,0063
4	83409	409	0,364	0,39	0,0090
5	83411	447	0,455	2,75	0,0120
6	83415	255	0,545	0,75	0,0156
7	83481	516	0,636	3,2	0,0199
8	83437	364	0,727	1,86	0,0256
9	83441	1174	0,818	0,64	0,0334
10	83456	935	0,909	1,64	0,0467

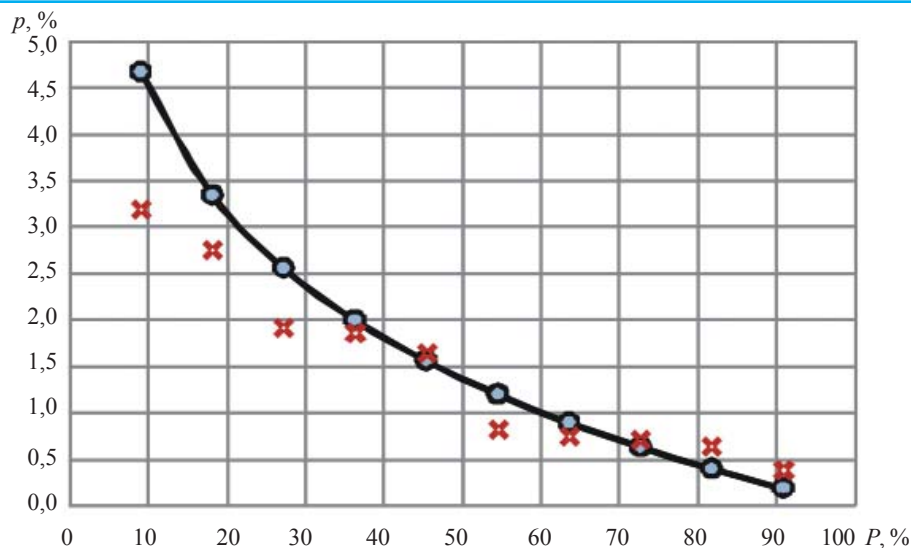


Рис. 1. Кривые вероятности вероятностей превышения: линия – теоретическая кривая; точки – обеспеченности максимальных в ряду расходов.

На рис. 1 приведены совмещенные кривые обеспеченности обеспеченностей крайних членов выборки для максимальных расходов.

Расположение эмпирических точек относительно теоретической кривой показывает, что использование методики совместного анализа в данном случае вполне обосновано, особенно в диапазоне высоких значений.

Для оценки соответствия индивидуальных оценок (табл. 4) и результатов расчетов по методике совместного анализа была проведена оценка расчетного 1 % расхода с помощью кривой редукции максимального модуля дождевых паводков.

Таблица 4. Основные гидрологические характеристики максимального стока р. Адагум – г. Крымск (распределение Крицкого – Менкеля)

Характеристики	Метод моментов		Метод наибольшего правдоподобия		Метод L-моментов	
	$Q_{\max} = 1500,$ м ³ /с	$Q_{\max} = 1350,$ м ³ /с	$Q_{\max} = 1500,$ м ³ /с	$Q_{\max} = 1350,$ м ³ /с	$Q_{\max} = 1500,$ м ³ /с	$Q_{\max} = 1350,$ м ³ /с
Среднее	182	180	182	180	182	180
C_v	1,24	1,19	1,19	1,14	1,21	1,20
C_s/C_v	4,5	4	2,8	2,6	4	4
$Q_{1\%}$	1085	1034	1040	981	1057	1040

По данным о максимальных расходах 1 % обеспеченности с целью уточнения параметра редукции n в формуле (2) построен график зависимости $\lg q_{1\%} = f(\lg(F + 1))$, где $q_{1\%}$ – модуль стока 1 % обеспеченности, определенный по статистическому ряду максимальных расходов воды (рис. 2)

$$q_{200} = q_{1\%} / \left(\frac{200}{F} \right)^n, \quad (2)$$

где q_{200} – модуль максимального мгновенного расхода обеспеченностью 1 %, приведенный к площади 200 км²;

F – площадь водосбора, км²;

n – показатель степени редукции.

Согласно графику (рис. 2), коэффициент редукции $n = -0,505$. Далее была построена обобщенная кривая обеспеченностей модуля максимального стока, приведенного к площади 200 км² (табл. 5, рис. 3).

Как следует из обобщенной кривой обеспеченности (рис. 3), искомый максимальный расход, определяемый по модулю стока 1 % обеспеченности, равен 664 м³/с, что соответствует среднему значению этого параметра для исследуемого района.

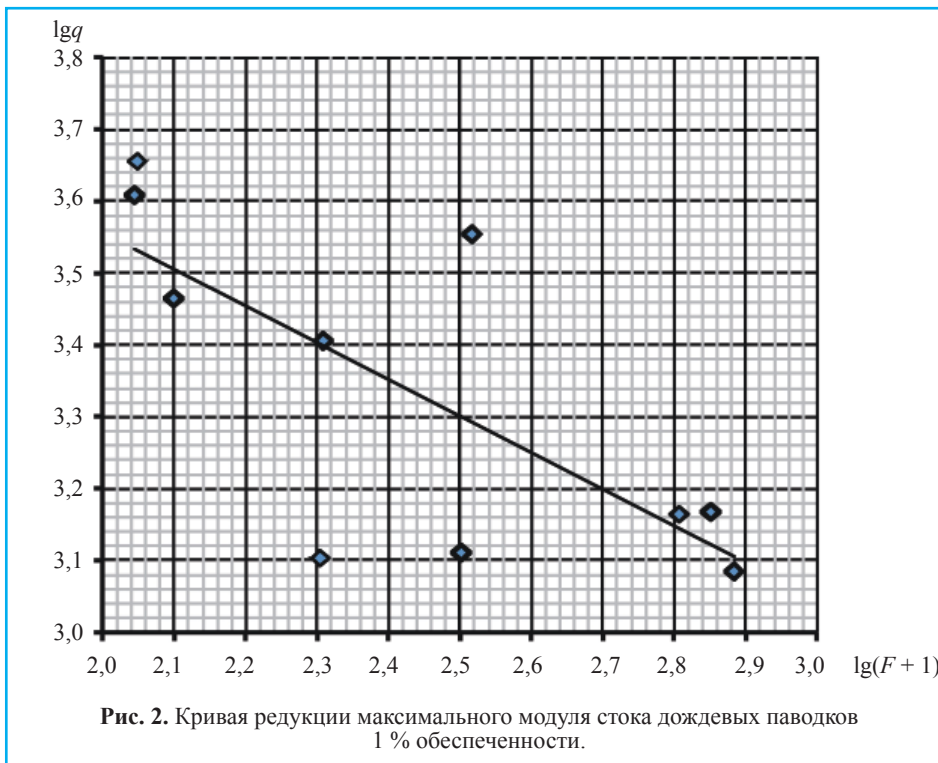


Таблица 5. Параметры кривой $q_{200} = f(p)$

№ п/п	Код поста	Река – пост	F , км ²	Q_{\max} , м ³ /с	$q_{\max} = (10^3 \times Q_{\max})/F$	$q_{200} = q_{\max}/(F/200)^n$	$p = 1 - (1 - P)^{(1/n)}$
1	83395	р. Псекупс – г. Горячий ключ	765	944	1234	2430	0,0019
2	83385	р. Пшиш – г. Хадьженск	710	1100	1549	2938	0,0040
3	83460	р. Псекупс – с. Садовое	111	452	4072	3025	0,0063
4	83409	р. Афипс – ст-ца Смоленская	317	454	1432	1807	0,0090
5	83411	р. Шебш – с. Шабановский	110	386	3509	2595	0,0121
6	83415	р. Убинка – ст-ца Северская	201	265	1318	1322	0,0156
7	83481	р. Абин – ст-ца Шапсугская	203	397	1956	1970	0,0200
8	83437	р. Адегой – ст-ца Шапсугская	125	329	2632	2076	0,0256
9	83441	р. Адагум – г. Крымск	328	1400	4268	5480	0,0335
10	83456	р. Пшеха – с. Черниговское	641	858	1339	2410	0,0467

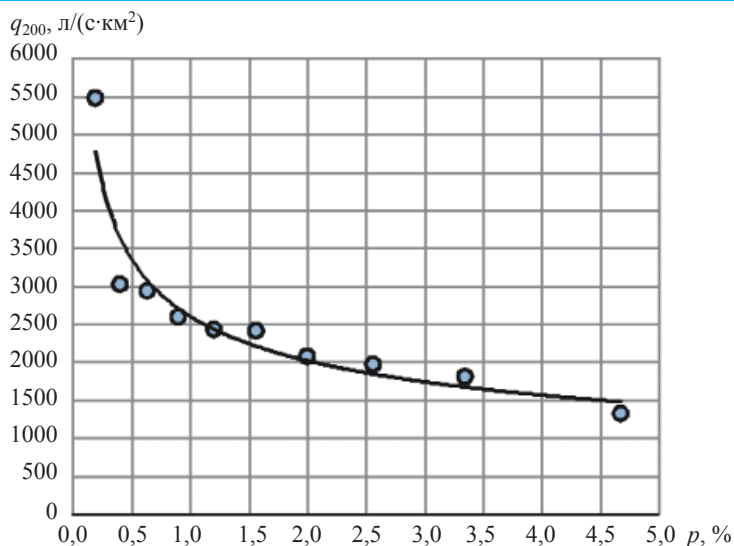


Рис. 3. Обобщенная кривая обеспеченностей модулей максимального стока, приведенных к площади 200 км².

Найдем совместную оценку расчетной характеристики по формуле [8]:

$$Q_{\text{совм}} = (Q_{\text{инд}}\varepsilon_{\text{оср}}^2 + Q_{\text{оср}}\varepsilon_{\text{инд}}^2)/(\varepsilon_{\text{инд}}^2 + \varepsilon_{\text{оср}}^2), \quad (3)$$

где $Q_{\text{инд}}$, $\varepsilon_{\text{инд}}^2$ – индивидуальная оценка характеристики Q , вычисленная по данным наблюдений в данном створе, $\varepsilon_{\text{инд}}^2$ – стандартная ошибка, равная случайной погрешности; $Q_{\text{оср}}$, $\varepsilon_{\text{оср}}^2$ – осредненная характеристика, вычисленная по совместной кривой распределения, и ее стандартная ошибка.

Согласно формуле (3), $Q_{\text{совм}}$ с использованием параметров для группы постов в исследуемом районе равен 740 м³/с.

Применим метод кривых обеспеченности обеспеченностей к рядам суточных максимальных осадков по данным близлежащих метеорологических станций (табл. 6).

На рис. 4 приведены совмещенные эмпирические и теоретические кривые обеспеченности обеспеченностей крайних членов выборки для максимальных суточных осадков.

Положение точек относительно теоретической кривой показывает, что совпадение в целом хуже, чем для максимумов стока, однако для диапазонов экстремальных значений эти кривые близки.

Для оценки соответствия индивидуальных расчетов (табл. 7) и расчетов по методике совместного анализа была произведена оценка расчетных 1 % максимальных суточных осадков.

Таблица 6. Ординаты кривой обеспеченности обеспеченностей для максимальных осадков

№ п/п	Название метеорологической станции	$P = m/(n + 1)$	$p = 1 - (1 - P)^{(1/n)}$	$P_{\text{(осадки макс.)}}$, %
1	г. Крымск	0,083	0,0016	0,66
2	г. Новороссийск	0,167	0,0033	0,89
3	г. Геленджик	0,250	0,0052	0,75
4	г. Краснодар	0,333	0,0073	0,35
5	г. Анапа	0,417	0,0098	1,71
6	пос. Горный	0,500	0,0125	0,72
7	г. Темрюк	0,583	0,0158	1,86
8	г. Славянск на Кубани	0,667	0,0198	1,36
9	г. Туапсе	0,75	0,0249	0,87
10	пос. Горячий ключ	0,833	0,0321	1,57
11	пос. Джугба	0,917	0,0442	0,3

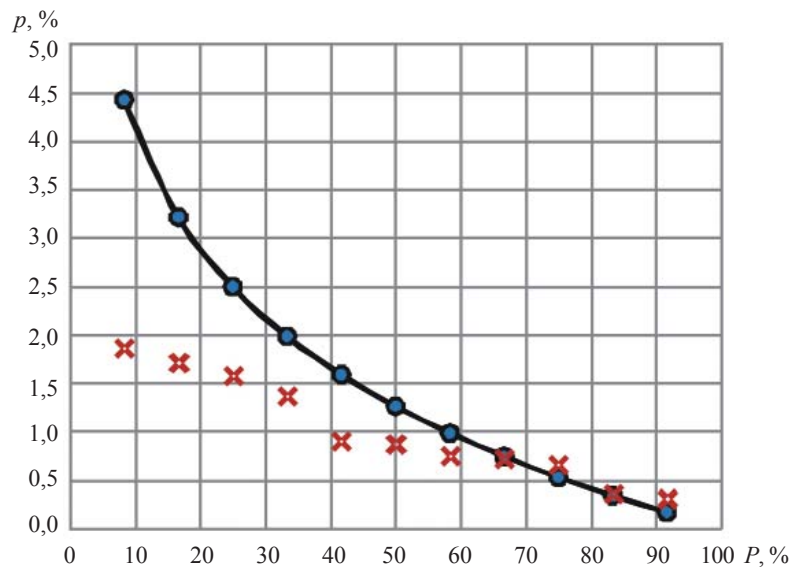


Рис. 4. Кривые вероятности вероятностей превышения: линия – теоретическая кривая; точки – обеспеченности максимальных суточных осадков.

По данным о максимальных суточных осадках на каждой метеостанции определяли обеспеченности по формуле (1). Параметры приведены в табл. 8.

С построенной обобщенной кривой (рис. 5) снимем значение максимального суточного слоя осадков и сравним его с основными расчетными характеристиками, полученными по отдельным метеостанциям (см. табл. 7). Таким образом, максимальный суточный слой осадков ($P = 1\%$), определенный по группе станций, равен 180 мм, что соответствует ранее полученным результатам по отдельным метеостанциям.

Таблица 7. Основные расчетные характеристики максимальных в году суточных осадков по метеостанциям

Метеостанция	Метод L -моментов				GEV -распределение			
	$H_{ср}$, мм	Cv	Cs/Cv	$H_{1\%}$, мм	$H_{ср}$, мм	Cv	Cs/Cv	$H_{1\%}$, мм
Крымск	53	–	–	–	53	0,39	3,3	119
Новороссийск	62	0,6	6	200	62	0,66	4,84	217
Геленджик	56	0,5	6	158	56	0,63	6	185

Таблица 8. Параметры кривой зависимости максимальных суточных осадков от обеспеченности

№ п/п	Метеостанция	$X_{\text{max сут}} \text{ мм}$	$p = 1 - (1 - P)^{(1/n)}, \%$
1	Крымск	311	0,158
2	Новороссийск	296,8	0,331
3	Геленджик	275	0,522
4	Краснодар	204,7	0,734
5	Анапа	179,5	0,975
6	Горный	156	1,252
7	Темрюк	107,2	1,579
8	Славянск на Кубани	100,8	1,978
9	Туапсе	91,9	2,489
10	Горячий ключ	85,9	3,205
11	Джугба	83,2	4,417

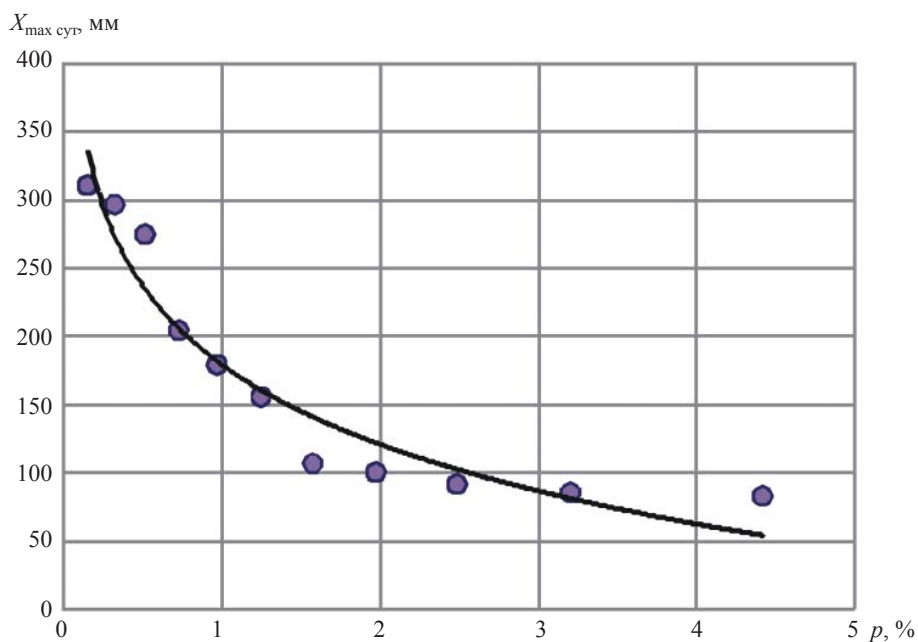


Рис. 5. Обобщенная кривая обеспеченностей максимального суточного слоя осадков по группе метеостанций.

Выводы

Применение методики совместного анализа данных в регионе, где регулярные гидрологические и метеорологические наблюдения недостаточны для оценки экстремальных событий, является весьма эффективным способом уточнения параметров и обоснования их применения при различных инженерных работах, направленных на уменьшение рисков от катастрофических наводнений.

Методы, аналогичные рассматриваемым в отечественной гидрологии, применяются и в мировой гидрологической практике. Так, Руководство по гидрологической практике, шестая редакция которого выпущена Всемирной метеорологической организацией в 2009 г. [8], рекомендует использовать формулу умножения вероятностей при оценке риска проявления гидрологических экстремумов в период эксплуатации проектируемого сооружения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СП 33-101-2003. Свод правил по проектированию и строительству. Определение основных гидрологических характеристик, 2004. 74 с.
2. *Белякова П.А., Борщ С.В., Христофоров А.В., Юмина Н.М.* Прогноз максимального стока рек Черноморского побережья Кавказа // Водное хозяйство России. 2013. № 6. С. 4–17.
3. *Болгов М.В., Коробкина Е.А.* Реконструкция дождевого паводка на реке Адагум на основе математических моделей формирования стока // Водное хозяйство России. 2013. № 3. С. 87–102.
4. *Крицкий С.Н., Менкель М.Ф.* Гидрологические основы управления речным стоком. М.: Наука, 1981. 270 с.
5. Guide to Hydrological Practices. Vol. II. Management of Water Resources and Application of Hydrological Practices: sixth edition / WMO-No. 168. Geneva, 2009.
6. *Сотникова Л.Ф.* Совместный анализ наблюдений за максимальным стоком гидрологических однородных бассейнов различных районов СССР // Проблемы изучения и комплексного использования водных ресурсов. М.: Наука, 1978. С. 45–79.
7. *Крицкий С.Н.* О направлении исследований в области теории использования водных ресурсов // Проблемы изучения и комплексного использования водных ресурсов. М.: Наука, 1978. С. 4–44
8. *Блохинов Е.Г.* Распределение вероятностей величин речного стока. М.: Наука, 1974. 169 с.

Сведения об авторах:

Болгов Михаил Васильевич, д-р техн. наук, заведующий лабораторией поверхностных вод, ФГБУН «Институт водных проблем Российской академии наук», 119333, Москва, ул. Губкина, 3; e-mail: bolgovmv@mail.ru

Осипова Надежда Владимировна, канд. техн. наук, научный сотрудник, лаборатория поверхностных вод, ФГБУН «Институт водных проблем Российской академии наук», 119333, Москва, ул. Губкина, 3; e-mail: osina14@yandex.ru