

менные проблемы стохастической гидрологии”, Москва, 22-25 января, 2001. С. 30-36.

11. Руководство по гидрологической практике (ВМО - № 168), пятое изд., 1997. 843 с.

12. *Martins, E.S. and J.R. Stedinger*. Generalized Maximum Likelihood Pareto-Poisson Flood Risk Analysis for Partial Duration Series, *Water Resources Research* 37(10), 2001. P. 2559-2567.

13. *Осинова Н.В.* О выборе точки усечения в задаче аппроксимации распределения вероятностей максимальных расходов воды // *Водные ресурсы*. 2009. Т.36. №6. С. 668-681.

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНЫХ МАКСИМАЛЬНЫХ ЖИДКИХ ОСАДКОВ И ПРЕДЕЛЬНО ВОЗМОЖНЫХ РАСХОДОВ ПАВОДКОВОГО СТОКА ДЛЯ РЕЧНЫХ БАССЕЙНОВ ЕВРОПЕЙСКОЙ ТЕРРИТОРИИ РОССИИ И ПРИМОРЬЯ¹

Попова Н.О.

Институт водных проблем РАН, г. Москва

Natalia.o.popova@gmail.com

Введение. В практике водохозяйственного проектирования для определения возможных максимальных расходов речного стока, превышающих наибольшие наблюдаемые величины, применяют как вероятностный подход, основанный на экстраполяции кривой обеспеченности, подобранной по имеющимся данным наблюдений за максимальным стоком, так и детерминистический, состоящий в оценке предельно возможных расходов стока, сформировавшегося в результате критического сочетания неблагоприятных метеорологических факторов и состояния речного бассейна. Детерминистический подход, который основан на представлении о существовании физически обусловленного предела максимальных расходов речного стока, дает дополнительную информацию по сравнению с вероятностными методами, особенно при коротких рядах наблюдений, по которым расчетные величины стока малых обеспеченностей оцениваются с большими погрешностями. Предельно возможные расходы дождевого стока определяются в практике гидрологиче-

¹Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект №14-17-00700).

ских расчетов США, Японии и других стран на основе оценок возможной максимальной интенсивности ливневых осадков и, как правило, с использованием простых моделей трансформации экстремальных осадков в речной сток (например, метода единичного гидрографа). Перспективы построения оценок максимально возможного паводкового стока с использованием развитых физико-математических моделей его формирования на примере некоторых речных бассейнов России рассмотрены в работах [1, 2].

В данной работе методика расчета возможных максимальных осадков, разработанная Всемирной метеорологической организацией [3], впервые применена для построения их пространственного распределения в пределах крупных регионов России: ЕТР и Приморья. Предложен метод оценки предельно возможных расходов дождевого стока по рассчитанным величинам возможных максимальных осадков и данным о морфометрии речного бассейна. Показаны возможности предложенного метода для оценки предельно возможного дождевого стока на небольших реках в бассейнах Оки и Уссури.

1. Оценка возможных максимальных жидких осадков. Возможные максимальные осадки (*probable maximum precipitation*, РМР) определяются в [3] как наибольший слой осадков заданной продолжительности и площади распространения, физически возможный в определенных географических условиях и для определенного времени года без учета долгосрочных климатических тенденций.

Распространены два подхода к оценке РМР: гидрометеорологический, основанный на оценке физических обусловленных пределов содержания водяного пара в столбе атмосферы и статистический, опирающийся на имеющиеся данные метеорологических измерений максимальных осадков заданной продолжительности. Для применения гидрометеорологического подхода требуются многолетние ряды данных наблюдений за осадками разной продолжительности, температурой и влажностью воздуха, скоростью и направлением ветра на метеорологических пунктах, располагающихся на исследуемом бассейне и прилегающих к нему территориях. Для большинства речных бассейнов России такие детальные многолетние отсутствуют, поэтому для оценки пространственного распределения РМР в пределах крупных регионов мы использовали менее требовательный к исходным данным статистический подход.

Среди статистических подходов оценки РМР наибольшее распространение получил метод Хершвилда, основанный на так называемом обобщенном частотном уравнении [4]. Максимальные возможные осадки заданной продолжительности рассчитываются по формуле [3]:

$$PMP = \bar{X}_N + K_m \sigma_N, \quad (1)$$

где \bar{X}_N и σ_N – среднее значение и стандартное отклонение максимального в году слоя осадков заданной продолжительности, определенные по ряду наблюдений длиной N лет. Коэффициент K_m определяется из соотношения

$$K_m = \frac{X_M - \bar{X}_{N-1}}{\sigma_{N-1}}, \quad (2)$$

где X_M – максимальное значения слоя осадков заданной продолжительности в ряду из N годовых максимумов, \bar{X}_{N-1} и σ_{N-1} – среднее и стандартное отклонение слоя осадков, определенные по ряду, длиной (N-1), полученном из исходного ряда с исключенным наивысшим значением X_M .

Хершфильд [5] по данным измерений слоя 24-часовых осадков для 2 700 станций на территории США определил значение $K_m=15$. Позднее было обнаружено, что K_m уменьшается для гумидных и растет для аридных территорий. Считается, что значение K_m довольно плавно изменяется в пространстве, поэтому для его определения для отдельной станции помимо расчетов непосредственно по этой станции рекомендовано использовать расчеты по соседним [3]. При этом для каждой станции в выбранной окрестности строится зависимость коэффициента K_m от среднегодовалого максимума осадков, проводится верхняя огибающая, используя которую по среднегодовалому максимуму осадков можно получить искомый коэффициент K_m .

В настоящей работе метод Хершфильда применен для оценки возможных максимальных жидких осадков за сутки по многолетним данным измерений максимальных суточных осадков на 473-м станциях ЕТР и 36-и станциях Приморья. Во избежание разнородности рядов наблюдаемых осадков, в работе использовались данные, начиная с 1967 года, когда на сети метеорологических станций СССР в существующие формулы расчета жидких осадков была введена поправка на смачивание осадкомерного сосуда. Данные по

ЕТР использованы из архива [6], а для территории Приморья данные любезно предоставлены сотрудниками ТИГ ДВО РАН и ДВ НИГМИ. Территория Кавказа в работе не рассматривалась, поскольку применение статистической методики ВМО для горной местности может приводить к большим ошибкам [7].

Для определения значений Km для каждой метеостанции были построены зависимости коэффициента Km от среднемноголетнего максимума суточных осадков для ЕТР (рис. 1) и для Приморья (рис. 2).

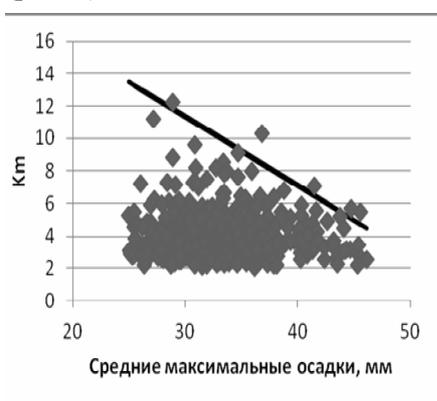


Рис. 1 – Зависимость коэффициента Km от среднемноголетнего максимума суточных осадков для ЕТР и её верхняя огибающая



Рис. 2 – Зависимость коэффициента Km от среднемноголетнего максимума суточных осадков для Приморья и её верхняя огибающая

Поскольку на ЕТР представлены различные разнородные климатические условия, для построения верхней огибающей была проведена генерализация метеостанций по среднемноголетним максимумам, и выделены зоны с шагом 5 мм. Для каждой зоны рассчитаны максимальный Km и среднее среднемноголетнее максимум суточных осадков, по которым построена верхняя огибающая для этой территории (рис. 1) для зон со средними максимальными осадками выше 25 мм.

По полученным зависимостям были рассчитаны значения Km для каждой станции и оценены возможные максимальные жидкие осадки. Расположение станций, значения максимальных суточных осадков, наблюдаемых на них, и рассчитанные максимальные возможные осадки показаны на рис. 3 и рис. 4.

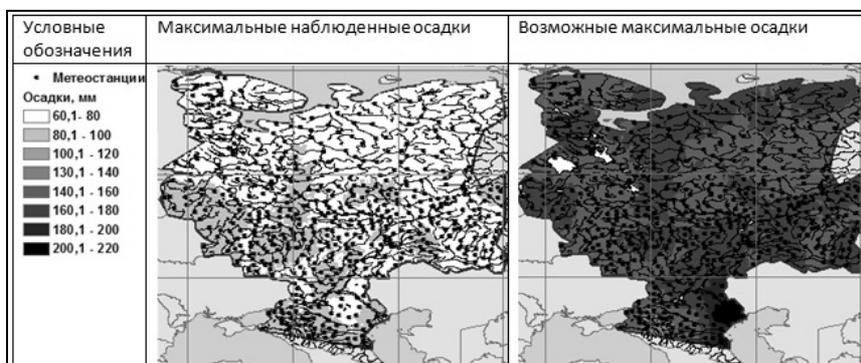


Рис. 3 – Распределение максимальных наблюдаемых и возможных максимальных осадков на ЕТР

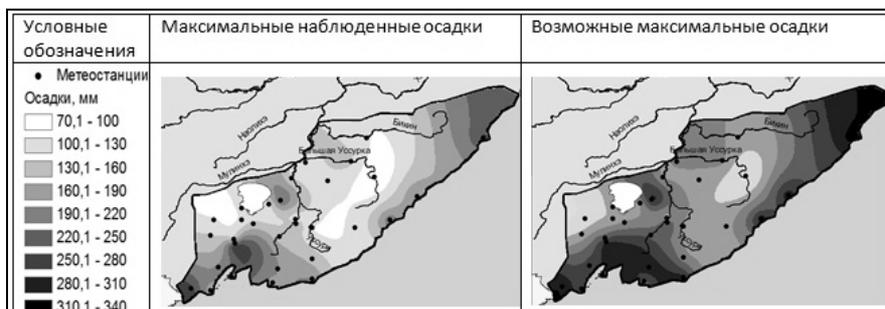


Рис. 4 – Распределение максимальных наблюдаемых и возможных максимальных осадков на территории Приморья

2. Методика и оценка максимально возможного расхода дождевого стока. Предельный возможный максимальный расход дождевого стока (PMF, probable maximum flood) может быть рассчитан по величине возможной максимальной интенсивности осадков, осредненной за время бассейнового добегаания, как

$$Q = m \cdot \eta \cdot k \cdot F + Q_{баз}, \quad (3)$$

где Q ($\text{м}^3/\text{с}$) – максимальный расход воды, m ($\text{м}/\text{с}$) – максимальная точечная интенсивность осадков, осредненная за время τ_b добегаания воды по поверхности водосбора, η – коэффициент стока, учитывающий потери стока, k – коэффициент редукации осадков по площади, F (м^2) – площадь водосбора, ($\text{м}^3/\text{с}$) $Q_{баз}$ – базисный расход воды.

Расчет предельно возможных расходов паводкового стока производился для 12 речных бассейнов, относящихся к бассейну р. Оки, и для 6-ти бассейнов, относящихся к бассейну р. Уссури со временем бассейнового добегания τ_b порядка 1 суток.

Для бассейна р. Оки величина τ_b (час.) определялась по следующему выражению [8]:

$$\tau_b = k \cdot 1000 \cdot L / m \cdot I^{1/3} \cdot Q_{1\%}^{1/4}, \quad (4)$$

где α – коэффициент, зависящий от природной зоны (в диапазоне от 1,1 до 2); L (км) – длина главного водотока, m – коэффициент шероховатости русла (в диапазоне от 7 до 11), I (‰) – уклон выровненного продольного профиля реки.

Для рек бассейна Уссури бассейновое время добегания τ_b (час.) рассчитывалось с помощью следующей формулы [9]:

$$\tau_b = 432 \cdot F^{0.2} / I^{0.33}. \quad (5)$$

Морфометрические характеристики бассейна, входящие в формулы (4) – (5), определялись с помощью цифровой карты рельефа 1 км разрешения.

Оценка редукиции осадков по площади определялась с помощью эмпирических зависимостей [12]. Выявлено, что для рассматриваемых условий (небольшая площадь водосборов, осадки, продолжительностью сутки) коэффициент редукиции осадков по площади изменяется от 0,94 до 0,91 в зависимости от площади водосбора.

Базисный сток, формирующийся за счет подземных запасов вод, не оказывает значительного влияния на расходы предельно возможного паводка (при расчетах не учитывался; потери стока также не учитывались ($\eta=1$)). Таким образом, использованная формула расчета предельно возможных расходов паводкового стока выглядит следующим образом:

$$Q_{PMF} = k \cdot m_{PMF} \cdot F. \quad (6)$$

Оценки предельного максимального стока по формуле (6) является либеральной (оценкой сверху), так как не учитываются потери дождевого стока. Полученные оценки предельно возможных расходов паводкового стока для всех рассмотренных бассейнов приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Предельно возможные расходы для бассейнов
р. Ока и р. Уссури

| № поста | Река – Створ | F, км ² | τ_6 , сутки | РМР- суточ- ные, мм | РМФ, м ³ /с | Q max наблю- денные, м ³ /с |
|---------|--------------------------------------|--------------------|---------------------|---------------------------|---------------------------|---|
| 75591 | р.Лух - пгт Лух | 587 | 1,2 | 175 | 921 | 282 |
| 75430 | р.Малая Истра - д. Киселе- во | 280 | 1,2 | 139 | 339 | 49,7 |
| 75422 | р.Озерна - д. Городище | 364 | 0,6 | 132 | 949 | 76,5 |
| 75409 | р.Лусянка - д. Черники | 170 | 0,7 | 132 | 361 | 109 |
| 75306 | р.Ока - д. Вендерево | 513 | 0,8 | 149 | 985 | 175 |
| 75168 | р.Суда-Борисово-Судское | 2440 | 1,5 | 147 | 2583 | 139 |
| 75239 | р.Кострома-Гнездиково | 800 | 1,3 | 184 | 1256 | 253 |
| 75266 | р.Шача-Приволжск | 601 | 1,3 | 179 | 866 | 161 |
| 75334 | р.Рыбница-Любаново | 709 | 1,4 | 149 | 792 | 79,6 |
| 75348 | р.Нугрь-Болхов | 1010 | 1,3 | 153 | 1234 | 330 |
| 75387 | р.Путынка-Малахово | 153 | 0,9 | 154 | 275 | 19,9 |
| 75561 | р.Серая-Новинки | 293 | 1,1 | 146 | 413 | 73,1 |
| 5132 | р. Павловка - с.Антоновка | 2670 | 0,9 | 195 | 6587 | 680 |
| 5148 | р. Арсеньевка - пос. Виноградовка | 940 | 0,9 | 241 | 2761 | 596 |
| 5160 | р.Муравейка - пос. Гроде- ково | 761 | 0,8 | 241 | 2361 | 261 |
| 5171 | р.Крыловка - с.Крыловка | 1070 | 0,7 | 180 | 2800 | 632 |
| 5262 | р.Дальняя - п.Восток | 780 | 0,6 | 177 | 2462 | 942 |
| 5263 | р.Дальняя - с.Глубинное | 2740 | 0,8 | 177 | 6386 | 1610 |

Как видно из табл.1, полученные оценки предельно возможных расходов для рассмотренных бассейнов превышают максимальные наблюдаемые в среднем в 7 раз.

Автор признателен профессору кафедры гидрологии суши МГУ им. М.В. Ломоносова д.г.н. Н.Л. Фроловой, ведущему научному сотруднику ТИГ ДВО РАН д.г.н. Б.И. Гарцману и старшему научному сотруднику ДВ НИГМИ к.т.н. А.Н. Бугайцу за предоставленную гидрометеорологическую информацию.

Литература

1. Кучмент Л.С., Гельфан А.Н., Демидов В.Н., Мотовилов Ю.Г., Смахтин В.Ю., Назаров Н.А. Применение физико-математических моделей формирования речного стока для оценки степени опасности катастрофических наводнений// Метеорология и гидрология 1994. №4. С. 93-100.
2. Кучмент Л.С., Гельфан А.Н. Оценка опасности и возможных размеров катастрофических наводнений. Природные опасности России. //Гидрометеорологические опасности (под ред. Г. С. Голицына, А. А. Васильева). М.: КРУК. 2001. С. 64-82
3. World Meteorological Organization, 1986. Manual for estimation of probable maximum precipitation. Operational hydrology, Report.1. WMO-No.332, 269
4. Chow V.T. A General Formula for Hydrologic Frequency Analysis, American Geophysical Union. 1951.
5. Hershfield, D.M., 1961: Estimating the probable maximum precipitation. Journal of Hydraulics Division: Proceedings of the American Society of Civil Engineers, 87: 99–106.
6. Булыгина О.Н., Разуваев В.Н., Александрова Т.М. Описание массива данных суточной температуры воздуха и количества осадков на метеорологических станциях России и бывшего СССР (ТТТР), 2008 (<http://meteo.ru/data/162-temperature-precipitation#> доступ-к-данным).
7. Maidment, D.R., Handbook of Hydrology, 1993. New York, McGraw Hill.
8. Ресурсы поверхностных вод СССР. Том 10. Верхне-Волжский район, Гидрометеиздат, 1973. . 493 с
9. Ресурсы поверхностных вод СССР, т. 18 Дальний Восток, выпуск 3, Приморье, Гидрометеиздат, 1972. 477 с
10. Методические рекомендации по расчету максимального дождевого стока и его регулированию. М., Союздорпроект, 1981, 142 с.
11. HMR52: Probable Maximum Storm Computation (Eastern U.S.) User's Manual March, 1984 U.S. Army Corps of Engineers Water Resources Support Center The Hydrologic Engineering Center.
12. Omolayo, A.S., 1993. On the transposition of areal reduction factors for rainfall frequency estimation, Journal of Hydrology 145: 191-205.