

УДК 556.166 (476)

**ВЛИЯНИЕ ГИДРОГРАФИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ
НА ВЕЛИЧИНУ ДОЖДЕВЫХ ПАВОДКОВ РЕК БЕЛАРУСИ**

А.А.Волчек, доктор географических наук

Брестский государственный технический университет

Т.А.Шелест, аспирант

Брестский государственный университет им. А.С.Пушкина

Ключевые слова: *дождевые паводки, максимальный расход, модули стока, коэффициент коррекции, гидрографические факторы*

Введение

Дождевые паводки представляют собой одну из фаз гидрологического режима рек. Они могут формироваться в любое время года, проходят нерегулярно и быстротечно. Их формирование на реках происходит под влиянием большого числа различных факторов, как природных, так и антропогенных, встречающихся в сложных и неповторимых сочетаниях. Поэтому четко выявить роль каждого из них путем анализа гидрометрического материала практически невозможно. Действие отдельных факторов на сток обусловлено совокупностью остальных, т.е. физико-географических и гидрологических особенностей того или иного бассейна. В разных природных условиях одни и те же факторы могут оказывать различное влияние на сток как по величине, так и по направлению.

Факторы паводочного стока можно разделить на две группы: первая – метеорологические, вторая – гидрографические. Размеры паводков определяются, прежде всего, метеорологическими факторами, главную роль среди которых играют стокообразующие осадки и предшествовавшие им метеорологические условия, сформировавшие влагозапасы бассейна. Эти факторы являются зональными, так как величина их определяется географическими координатами бассейна и зависит от природно-климатической зоны.

Другую группу составляют гидрографические факторы. Среди них можно выделить азональные (морфометрические): площадь водосбора, длина реки и др., и интразональные: лесистость, почвенный покров, озерность, заболоченность, густота речной сети. Их величина в общем связана с зональными условиями, но внутри каждой зоны или каждого региона варьируется, характеризуясь некоторой кривой распределения. На больших бассейнах сочетания интразональных факторов почти постоянны, соответствуя типичным для данной зоны, на малых же они могут быть весьма различными.

Интразональные факторы в свою очередь можно разделить на две группы: факторы склонового и руслового стока. К первым относятся залесенность, заболоченность, карст и др., способные повлиять на продолжительность и слой притока воды со склонов в русловую сеть. Среди факторов руслового стока следует, прежде всего, выделить озера, водохранилища и пруды, которые осуществляют трансформацию максимального

расхода за счет регулирующей призмы.

Если метеорологические факторы динамичны во времени, то гидрографические являются более устойчивыми параметрами.

Одной из важнейших характеристик паводков являются максимальные расходы воды расчетной вероятности превышения. В отдельные годы они даже превосходят максимумы половодий и являются наибольшими в году, поэтому расчет их имеет важное значение при проектировании и строительстве мелиоративных систем, водохозяйственных объектов, автомобильных и железных дорог, нефте- и газопроводов, эксплуатации гидротехнических сооружений и решении ряда других практических задач.

Наиболее достоверно максимальный расход воды определяется по имеющемуся ряду наблюденных значений стока с использованием методов вероятностно-статистического анализа. Однако зачастую приходится сталкиваться либо с короткими рядами наблюдений, продолжительность которых не обеспечивает получения результата с требуемой точностью, либо с отсутствием гидрологических наблюдений на реках. Так, на территории Беларуси насчитывается более 20 тыс. рек и ручьев общей протяженностью около 90,6 тыс. км, сток которых может быть использован для тех или иных водохозяйственных целей. Количество же гидрологических постов на этих реках составляет 123. Поэтому основные трудности в расчетах максимального дождевого стока заключены в недостаточности наблюдений на малых водосборах, что ограничивает возможности расчетных методов, опирающихся на географические закономерности гидрологических процессов и использующих соответствующий арсенал технических приемов.

Теоретические формулы для определения максимальных расходов воды дождевых паводков при отсутствии материалов гидрометрических наблюдений многочисленны и разнообразны как по теоретическим принципам, положенным в их основу, так и по характеру используемых данных. При этом требуется достаточно подробная характеристика водосбора и без специальных изысканий не обойтись. Кроме того, рекомендуемые в Пособии к СНиП [1] методы расчета максимальных паводочных расходов предусматривают наличие рек-аналогов с продолжительными рядами наблюдений, что затрудняет расчеты. В то же время в ряде случаев (оценочные расчеты, предпроектная проработка вариантов и т.п.) не требуется большая точность.

Кроме того, существующие нормативы по определению максимальных расходов воды дождевых паводков (особенно с малых водосборов) при отсутствии наблюдений не всегда обеспечивают точность их определения и часто размеры водосборных и водопроводящих сооружений, мощность насосных станций польдерных систем назначается с большим запасом, что приводит к снижению их экономической целесообразности.

Для того чтобы избежать грубых просчетов и ошибок в указанном отношении, необходимо изучить и правильно оценить гидрологическую роль каждого из важнейших физико-географических факторов, а также влияние хозяйственных мероприятий на сток

рек и режим водных объектов. Объективное понимание значения и роли указанных факторов позволит обоснованно пользоваться ими в различных расчетных построениях.

Целью настоящего исследования является выявление роли гидрографических факторов в формировании дождевых паводков на реках Беларуси и разработка на их основе региональных математических моделей, позволяющих определять максимальные модули стока дождевых паводков на малых реках с использованием гидрографических параметров.

Исходные материалы и методика исследования

В основу исследования положены материалы наблюдений Департамента по гидрометеорологии Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь за максимальными расходами воды дождевых паводков рек Беларуси. При этом рассматривались данные по 116 гидрологическим постам за период инструментальных наблюдений.

В соответствии с [2] при отсутствии гидрометрических наблюдений в расчетном створе параметры распределения и расчетные значения гидрологических характеристик определяют с помощью следующих основных методов: водного баланса, гидрологической аналогии, осреднения в однородном районе, построения карт изолиний, построения региональных зависимостей стоковых характеристик от основных физико-географических факторов водосборов и построение зависимостей между погодичными стоковыми характеристиками и стокоформирующими факторами. В настоящей работе рассматривается построение региональных зависимостей расчетных гидрологических характеристик от основных гидрографических характеристик водосборов рек. Такие зависимости являются наиболее оптимальными, так как строятся непосредственно для интересующей расчетной обеспеченности и не требуют большого объема дополнительной информации (например, многолетних рядов наблюдений за метеорологическими величинами).

Методика построения региональных зависимостей включала следующие этапы.

Выбор пунктов с продолжительными рядами наблюдений за максимальными расходами воды дождевых паводков рек Беларуси.

Оценка однородности и стационарности исходных рядов гидрологических наблюдений с целью выявления рядов с неоднородными и нестационарными данными и приведение этих рядов к естественным условиям. Оценка однородности осуществлялась на основе генетического и статистического анализов исходных данных наблюдений. Генетический анализ проводился с целью выявления физических причин, обуславливающих неоднородность исходных данных наблюдений. Для количественной оценки статистической однородности применялись критерии резко отклоняющихся экстремальных значений в эмпирическом распределении (критерии Смирнова-Граббса и Диксона), критерии однородности выборочных дисперсий (критерий Фишера) и выборочных средних

(критерий Стьюдента).

Приведение выбранных рядов наблюдений к многолетнему периоду с привлечением данных наблюдений рек-аналогов.

Оценка однородности и стационарности параметров временных рядов, приведенных к многолетнему периоду.

Определение параметров распределения и расчетных значений максимальных модулей стока дождевых паводков для рассматриваемых рядов наблюдений.

Построение региональных зависимостей и оценка их эффективности.

Определение расчетных гидрологических характеристик осуществлялось путем применения аналитических функций распределения ежегодных вероятностей превышения – кривых обеспеченностей [1]. Для сглаживания и экстраполяции эмпирических кривых распределения ежегодных вероятностей превышения использовались аналитические кривые трехпараметрического гамма-распределения Крицкого-Менкеля. В результате определялись максимальные расходы воды дождевых паводков 5%-ной обеспеченности, которые были представлены в виде модулей стока и использовались для построения моделей. Выбор данной расчетной обеспеченности обусловлен нормативными документами. Так, инженерные сооружения в основном рассчитываются на 5%-ную вероятность превышения. Кроме того, с использованием соответствующих формул легко перейти к требуемой расчетной обеспеченности.

Методика построения региональных зависимостей (между функцией Y и аргументами X_1, X_2, \dots), используемая в настоящем исследовании, основана на методе множественной линейной регрессии и уравнении вида:

$$Y = B_0 + \sum_{i=1}^n (B_i \cdot X_i)$$

При этом рассматривались два типа структуры уравнений [3]:

- аддитивная структура, представляющая сумму аргументов с соответствующими коэффициентами;

- структура, соответствующая известной в гидрологии редуцированной формуле, основанной на логарифмическом преобразовании функции и аргументов.

Прежде всего определялся вид однофакторных зависимостей на основе графиков связи между модулями стока дождевых паводков 5%-ной обеспеченности ($M_{P=5\%}$) и каждым из предполагаемых факторов. Помимо прямолинейной зависимости задавались также несколько видов простых линеаризуемых преобразований факторов: логарифмическое, экспоненциальное, степенное. Выбор функционального преобразования фактора осуществлялся, если коэффициент парной корреляции при этом преобразовании статистически значимо отличался от коэффициента парной корреляции прямолинейной зависимости. Статистически значимое отличие определялось следующим неравенством:

$|R_{fn}| \geq |R_n| + \sigma_R$, где R_{fn} – коэффициент парной корреляции при рассматриваемом функциональном преобразовании фактора; R_{np} – коэффициент парной корреляции при прямолинейной зависимости; σ_R – стандартная погрешность коэффициента корреляции прямолинейной зависимости.

Паводки, как и другие гидрологические явления, обусловлены весьма большим числом факторов, учесть степень влияния каждого из которых практически невозможно, да и в большинстве случаев нецелесообразно. Поэтому рассматривались лишь наиболее значимые факторы:

A – площадь водосбора, км²;

H_{cp} – средняя высота водосбора, м;

L – длина реки от истока до пункта наблюдений, км;

g_A – густота речной сети, км/км²;

J_p – средний уклон реки, ‰;

$A_{заб}$ – заболоченность водосбора, ‰;

$A_{оз}$ – озерность водосбора, ‰;

$A_{лес}$ – лесистость водосбора, ‰.

Помимо гидрографических факторов рассматривались и географические координаты центров тяжести водосборов: φ – широта, км; λ – долгота, км.

Обсуждение результатов

Для выявления роли каждого из рассматриваемых гидрографических факторов в формировании максимальных модулей стока дождевых паводков 5%-ной обеспеченности рек Беларуси проведен корреляционный анализ. Для повышения значимости рассматриваемых факторов корреляционный анализ проведен и для логарифмического преобразования максимальных модулей стока 5 %-ной обеспеченности и гидрографических факторов. Результаты корреляционного анализа представлены в табл. 1.

Анализ корреляционной матрицы зависимости максимальных модулей стока дождевых паводков 5 %-ной обеспеченности рек Беларуси от основных гидрографических факторов (табл. 1) показывает, что статистически значимыми являются: средний уклон реки, длина реки, площадь водосбора, средняя высота водосбора и заболоченность территории.

В результате проведения регрессионного анализа были получены математические модели, позволяющие определять максимальные модули стока дождевых паводков 5 %-ной обеспеченности на реках Беларуси. Получено следующее уравнение аддитивной структуры:

$$M_{P=5\%} = 17 \cdot J_p - 0,03 \cdot L - 0,68 \cdot A_{заб} + 35,5 \quad , \text{ л/(с·км}^2\text{)} \quad (1)$$

Таблица 1. Корреляционная матрица максимальных модулей стока дождевых паводков 5%-ной обеспеченности рек Беларуси ($M_{P=5\%}$) и гидрографическими факторами (числитель), и их логарифмическими преобразованиями (знаменатель)

| Показатели | $M_{P=5\%}$ | A | H_{cp} | L | g_A | J_p | $A_{заб}$ | $A_{оз}$ | $A_{лес}$ | φ | λ |
|--|--------------|------------------------------|----------------------------|------------------------------|----------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| Модуль стока 5 %-ной обеспеченности, $M_{P=5\%}$ | 1,00 1,00 | -0,36 -0,64 | 0,24 0,15 | -0,41 -0,53 | 0,17 0,15 | 0,64 0,72 | -0,30 -0,36 | -0,14 -0,23 | -0,08 -0,15 | 0,15 0,21 | 0,15 0,20 |
| Площадь водосбора, A | | 1,00 1,00 | 0,19 0,19 | 0,79 0,91 | -0,07 -0,08 | -0,31 -0,67 | -0,02 -0,02 | -0,04 0,19 | 0,01 0,19 | -0,14 0,02 | 0,09 0,15 |
| Средняя высота водосбора, H_{cp} | | | 1,00 1,00 | 0,24 0,24 | 0,03 0,02 | 0,44 0,27 | -0,29 -0,29 | -0,07 -0,15 | -0,24 -0,15 | 0,25 0,27 | 0,09 0,11 |
| Длина реки от истока до пункта наблюдений, L | | | | 1,00 1,00 | -0,08 -0,06 | -0,40 -0,60 | -0,13 -0,02 | -0,07 0,02 | 0,03 0,13 | -0,00 -0,02 | 0,26 0,19 |
| Густота речной сети, g_A | | | | | 1,00 1,00 | 0,16 0,16 | -0,14 -0,20 | -0,15 -0,09 | -0,18 -0,17 | 0,16 0,17 | 0,02 0,01 |
| Средний уклон реки J_p | | | | | | 1,00 1,00 | -0,20 -0,24 | -0,13 -0,24 | -0,24 -0,29 | 0,17 0,21 | -0,06 -0,05 |
| Заболоченность водосбора, $A_{заб}$ | | | | | | | 1,00 1,00 | -0,09 -0,11 | -0,14 -0,09 | -0,54 -0,55 | -0,53 -0,57 |
| Озерность водосбора, $A_{оз}$ | | | | | | | | 1,00 1,00 | 0,00 0,10 | 0,24 0,36 | -0,04 0,01 |
| Лесистость водосбора, $A_{лес}$ | | | | | | | | | 1,00 1,00 | -0,04 -0,01 | 0,14 0,11 |
| Широта створа, φ | | | | | | | | | | 1,00 1,00 | 0,35 0,36 |
| Долгота створа, λ | | | | | | | | | | | 1,00 1,00 |

Примечание. Выделены статистически значимые коэффициенты корреляции на 5 %-ном уровне значимости.

Коэффициент множественной корреляции в уравнении $R = 0,70 \pm 0,03$, критерий Фишера $F = 37,4$. Статистические критерии данного уравнения $R \geq R_{кр} = 0,18$, $F > F_{кр} = 1,52$ значительно превышают пороговые значения и свидетельствуют о достоверности полученной модели. Статистическая значимость коэффициентов уравнений определялась на уровне их погрешности 2σ , что соответствует примерно 95%-ному уровню доверительной вероятности.

Уравнение редукционной структуры имеет вид:

$$M_{P=5\%} = \frac{2,57 \cdot J_p^{0,33} \cdot L^{1,2}}{(A + 1)^{0,13} \cdot (A_{заб} + 1)^{0,15}}, \text{ л/(с·км}^2\text{)} \quad (2)$$

где $R = 0,81 \pm 0,02$, $F = 51,5$.

Более эффективным является уравнение (2), поскольку оно имеет больший коэффициент множественной корреляции R .

Средние значения максимальных модулей стока дождевых паводков 5 %-ной обеспеченности на реках Беларуси составляют 30 – 40 л/(с·км²), диапазон же колебаний

находится в пределах от 8 до 120 л/(с·км²).

В связи с разнородностью условий формирования дождевых паводков на территории страны анализ степени влияния рассматриваемых факторов выполнен также и в пределах отдельных крупных речных бассейнов: Западной Двины, Днепра (без Припяти), Припяти и Немана.

Анализ корреляционной матрицы модулей стока дождевых паводков 5 %-ной обеспеченности основных рек Беларуси от гидрографических факторов показал, что одни и те же факторы в бассейнах разных рек являются более значимыми или не значимыми вовсе. Так, например, заболоченность водосбора является статистически значимым фактором для рек бассейна Днепра (без Припяти). Для бассейнов же Немана, Припяти и Западной Двины этот фактор не значим.

Таким образом, в результате проведения корреляционного анализа были выявлены статистически значимые факторы, влияющие на максимальные модули стока дождевых паводков на разных реках Беларуси, которые использовались для построения регрессионных региональных моделей.

Для рек бассейна Немана получены следующие модели, позволяющие определять максимальные модули стока дождевых паводков 5 %-ной обеспеченности по основным гидрографическим характеристикам:

$$M_{p=5\%} = 20,2 \cdot J_p + 14,7, \text{ л/(с·км}^2\text{)}, R = 0,74 \pm 0,06, F = 31,8 \quad (3)$$

$$M_{p=5\%} = \frac{75,2 \cdot J_p^{0,5}}{(A+1)^{0,11}}, \text{ л/(с·км}^2\text{)}, R = 0,85 \pm 0,03, F = 33,7 \quad (4)$$

Максимальные модули стока дождевых паводков 5 %-ной обеспеченности рек бассейна Западной Двины можно определить с помощью уравнений следующего вида:

$$M_{p=5\%} = 19,8 \cdot J_p^{0,004} \cdot A + 0,82 \cdot H_{cp} + 0,32 \cdot L - 122, \text{ л/(с·км}^2\text{)},$$

$$R = 0,84 \pm 0,05, F = 7,5 \quad (5)$$

$$M_{p=5\%} = \frac{0,02 \cdot L^{0,40} \cdot J_p^{0,25} \cdot H_{cp}^{1,74}}{(A+1)^{0,27} \cdot (A_{лес}+1)^{0,22}}, \text{ л/(с·км}^2\text{)}, R = 0,97 \pm 0,01, F = 34,1 \quad (6)$$

Для рек бассейна Днепра (без Припяти) получены следующие уравнения:

$$M_{p=5\%} = 32,7 \cdot J_p - 1,13 \cdot A_{заб} - 13,2 \cdot A_{оз} + 38,6 \text{ л/(с·км}^2\text{)},$$

$$R = 0,83 \pm 0,04, F = 21,0 \quad (7)$$

$$M_{p=5\%} = \frac{96,6 \cdot J_p^{0,58}}{(A_{заб}+1)^{0,30}}, \text{ л/(с·км}^2\text{)}, R = 0,86 \pm 0,03, F = 43,3 \quad (8)$$

Модели для рек бассейна Припяти представлены в виде:

$$M_{p=5\%} = 18,6 \cdot J_p - 68,8 \cdot \gamma_A - 0,74 \cdot A_{заб} - 0,04 \cdot L + 70 \quad \text{л/(с·км}^2\text{)}, \quad (9)$$

$$R = 0,76 \pm 0,05, F = 7,6$$

$$M_{p=5\%} = 44 \cdot J_p^{0,58}, \quad \text{л/(с·км}^2\text{)}, \quad R = 0,73 \pm 0,06, F = 28,7. \quad (10)$$

Для определения модулей стока дождевых паводков 5%-ной обеспеченности на реках бассейна Немана наиболее эффективной является формула (4), для рек бассейна Западной Двины – формула (6), Днепра – (8), Припяти – формула (9). Т.е. редуционные структуры уравнений, полученные в результате логарифмического преобразования функции и аргументов, являются более эффективными (исключение – бассейн Припяти).

Анализ полученных уравнений свидетельствует о том, что к числу основных факторов, определяющих величину модулей стока дождевых паводков, относятся уклоны рек, которые вошли во все полученные модели и являются определяющим фактором для бассейнов всех рек. Действительно, с увеличением крутизны склонов возрастают скорости стекания воды, сокращается продолжительность добегаания и тем самым уменьшаются потери воды на испарение и инфильтрацию, что ведет к увеличению мак-

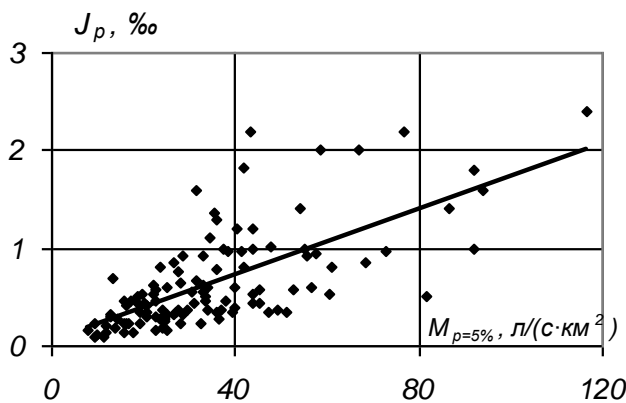


Рис.1. Зависимость модулей стока дождевых паводков 5%-ной обеспеченности рек Беларуси от уклонов рек

симального модуля стока. На малых водосборах, где склоновое добегаание играет значительную роль, этот фактор оказывается особенно существенным. Но на более крупных бассейнах с ростом водосбора и русловой трансформации влияние уклона как фактора склонового добегаания постепенно редуцируется. Так, на малых реках Беларуси с площадями водосборов до 2 тыс. км² коэффициент корреляции модуля стока дождевых паводков с уклонами рек достигает 0,7, в то время как на больших реках – 0,4.

На рис. 1 представлена зависимость максимальных модулей стока дождевых паводков 5%-ной обеспеченности рек Беларуси от уклонов рек. Из рисунка видно, что между $M_{p=5\%}$ и уклонами рек существует прямая тесная зависимость, т.е. с увеличением уклонов рек происходит увеличение величины модулей стока дождевых паводков.

Статистически значимые связи логарифма модулей стока дождевых паводков

5%-ной обеспеченности с логарифмами уклонов рек имеют место как для всей территории Беларуси, так и для отдельных бассейнов. Особенно велика корреляция модулей и логарифмов модулей с уклонами для рек бассейнов Днепра и Немана, меньше всего – для рек бассейна Западной Двины и Припяти. Это связано с тем, что бассейны Немана и Днепра расположены в наиболее возвышенной части Беларуси, а уклоны рек имеют тесную корреляцию со средней высотой водосборов (корреляция между J_p и H_{cp} до 0,68 в бассейне Немана).

Уклоны рек трудно поддаются территориальному обобщению, так как они зависят от размеров рек. Как правило, уклоны рек убывают от истока к устью, поэтому чем длиннее река, тем меньше ее средний уклон. Так, коэффициент корреляции уклонов рек Беларуси с площадью водосбора составляет $r = -0,31$, с длиной реки – $r = -0,40$. В целом изменение уклонов соответствует изменению рельефа.

Влияние средней высоты водосбора на величину модулей стока дождевых паводков противоречиво. Если в целом по Беларуси, а также отдельно по бассейнам Западной Двины и Немана ее влияние прямое, т.е. с увеличением высоты происходит увеличение модулей стока, на реках бассейна Днепра оно незначимо, а на реках бассейна Припяти картина противоположная. Причем на реках бассейна Немана и Западной Двины существует тесная корреляция высоты водосборов с максимальными модулями стока паводков (0,52 и 0,60 соответственно). Прямое влияние высоты на величину модуля стока дождевых паводков можно объяснить, во-первых, связью с уклонами рек, во-вторых, с увеличением количества осадков на повышенных элементах рельефа.

Влияние средней высоты водосбора на величину модуля стока дождевых паводков на реках водосбора Припяти обратное, что обусловлено специфическими условиями протекания Припяти, в первую очередь равнинностью и близким залеганием грунтовых вод. С другой стороны, чем больше высота местности, тем ниже уровень залегания грунтовых вод. В связи с этим происходит увеличение инфильтрационной способности почвогрунтов (песчаных и супесчаных) на повышенных элементах рельефа и растут потери воды, в результате меньше воды достигает грунтовых вод и попадает в речное русло, что, в конечном итоге, ведет к уменьшению модулей стока дождевых паводков на повышенных элементах рельефа и увеличению – в пониженных.

Значимыми факторами являются длина реки от истока до пункта наблюдений L и площадь водосбора A . Эти факторы целесообразно рассматривать вместе в связи с тем, что они тесно коррелируют между собой ($r = 0,79$), а логарифмы их имеют коэффициент корреляции $r = 0,91$. Роль этих факторов аналогична: с увеличением площади водосбора и длины реки уменьшается (редуцируется) как слой стока за паводок, так и, еще сильнее, максимальный модуль стока. Редукция модуля связана с убыванием среднего по площади количества осадков с ростом бассейна, а также с увеличением времени добегания и продолжительности паводка, т.е. с его распластыванием.

На больших бассейнах уменьшение объема паводочного стока связано также с пойменным задержанием и последующим испарением с суши. Использование длины реки от истока до пункта наблюдений (L) для определения максимальных модулей стока дождевых паводков более оправдано, чем площади водосбора (A), так как размер площади бассейна характеризует продолжительность добега только приблизительно, так как при различной форме бассейна одной и той же площади могут соответствовать весьма значительные пути добега. Действительно, формулы, выраженные через L , несколько точнее формул, связывающих паводочный сток с площадью. Однако использование обоих этих факторов для построения математических моделей определения модулей стока дождевых паводков 5%-ной обеспеченности повышает эффективность полученных уравнений, поэтому нередко оба фактора входят в уравнения.

Заболоченность водосборов рассматривалась как суммарный фактор площади болот и заболоченных земель (необлесенных). Территория Беларуси имеет высокий показатель заболоченности водосборов (до 38%). Наибольшее распространение получили низинные болота, которые в бассейне Припяти составляют 90 % площади всех болот. Значительно заболочен также бассейн р. Березины (20-30 %). На севере Беларуси преобладают верховые болота, в центральной части страны – переходные. Коэффициент корреляции максимальных модулей стока дождевых паводков 5%-ной обеспеченности с заболоченностью водосборов для рек Беларуси составляет $r = -0,20$, хотя для бассейнов отдельных рек они не значимые. Этот фактор вошел лишь в уравнения по определению модулей стока дождевых паводков рек Беларуси в целом и рек бассейна Днепра.

Болота, аккумулируя значительную часть дождевых вод, способствуют снижению пиков дождевых паводков. Причем это влияние зависит как от типа паводка, так и от предшествующей паводку высоты уровня грунтовых вод. Летние паводки, вызванные короткими и интенсивными ливнями, полностью погашаются в болотном микрорельефе вследствие своего малого объема. Максимумы дождевых паводков, вызванных длительными дождями, выпадающими в период низкого стояния грунтовых вод, снижаются под влиянием болот в большей степени. Дождевые паводки, формирующиеся в конце весны или начале лета при высоком стоянии уровня грунтовых вод (после прохождения весеннего половодья) меньше аккумулируются болотами, чем паводки, формирующиеся при пониженном стоянии уровня грунтовых вод. Максимальные расходы воды таких паводков под влиянием болот снижаются несущественно.

Озера, как и болота, снижают величину максимальных модулей стока дождевых паводков благодаря аккумуляции дождевых вод. Для рек Беларуси озерность как фактор является статистически не значимым, в то время как для бассейна Припяти и Днепра корреляция озерности с максимальным модулем стока паводков составляет $-0,57$ и $-0,40$, соответственно.

Лес не оказывает существенного влияния на формирование дождевых паводков на реках Беларуси в целом, коэффициент корреляции составляет $-0,08$. При средней лесистости Беларуси $35,5\%$ влияние леса на величину максимальных модулей стока дождевых паводков больше косвенное, так как он влияет на другие факторы. Так, лес в результате рыхлящего действия корней, а также влияния лесной подстилки существенно изменяет водно-физические свойства почвы, а именно: увеличивает их общую скважность и водопроницаемость. Благодаря этому лесные почвы переводят значительную часть поверхностного стока дождевых вод в грунтовый и существенно снижают максимальные расходы воды паводков.

Количественный эффект влияния лесных почв зависит от характера леса и почв, а также степени облесенности водосбора. Кроме того, влияние леса сказывается сильнее на водосборах с тяжелыми глинистыми и суглинистыми почвами, которые широко распространены на севере Беларуси (бассейн Западной Двины), чем на водосборах с легкими песчаными почвами, встречающимися в южной части страны (бассейн Припяти). Это обусловлено тем, что водно-физические свойства тяжелых почв сильнее изменяются под влиянием леса, чем легких песчаных почв, обладающих и без лесного покрова значительной скважностью и водопроницаемостью.

Так, коэффициент корреляции модуля стока дождевых паводков 5%-ной обеспеченности с лесистостью водосбора на реках бассейна Западной Двины составляет $-0,58$ и является статистически значимым фактором. На реках же бассейна Припяти $r = 0,32$ и влияние леса на величину дождевых паводков здесь прямое. Это обусловлено близким залеганием к поверхности грунтовых вод, питающих реки. В таких условиях сток паводков с облесенных водосборов может превышать сток с необлесенных водосборов, что связано с уменьшением размеров склонового и увеличением подземного стока в результате большей инфильтрационной способности лесных почв, уменьшением прямого испарения с поверхности лесных водосборов, а также некоторым увеличением количества осадков над лесом.

Густота речной сети γ_A не является статистически значимым фактором для рек Беларуси. Речная сеть Беларуси довольно равномерная и диапазон колебаний этого параметра не велик.

Широта и долгота центров тяжести водосборов оказались статистически не значимыми факторами, поскольку рассматриваемые факторы, в основном, не являются зональными. Географические координаты оказывают наибольшее влияние на метеорологические факторы, которые являются зональными.

Оценка эффективности полученных уравнений осуществляется на основе всестороннего анализа остатков. Остатки определялись как разности между фактическими (наблюденными) и расчетными значениями, полученными как на зависимой, так и не зависимой от расчетов информации, т.е. рассматривались водосборы, не участво-

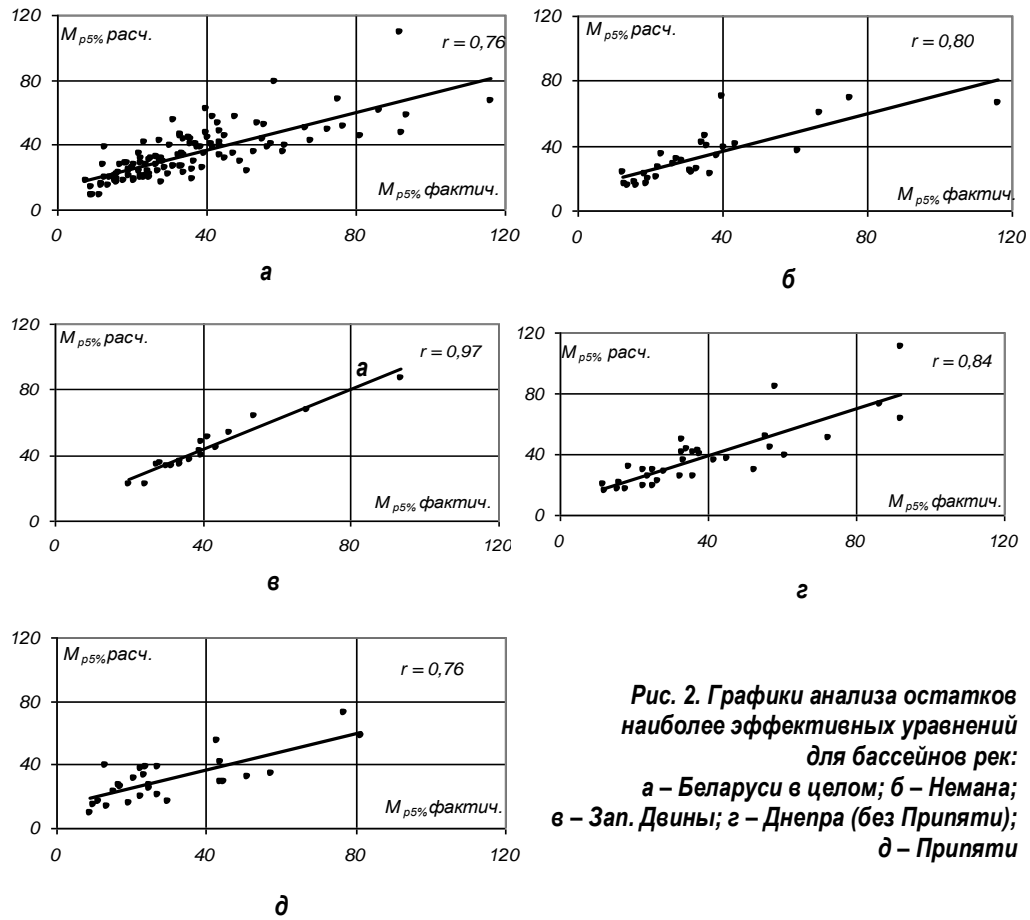


Рис. 2. Графики анализа остатков наиболее эффективных уравнений для бассейнов рек: а – Беларуси в целом; б – Немана; в – Зап. Двины; г – Днепра (без Припяти); д – Припяти

Таблица 2. Коэффициенты перехода максимальных модулей стока дождевых паводков рек Беларуси от 5%-ной к другим обеспеченностям

| Бассейн реки | Обеспеченность, % | | | | |
|------------------|-------------------|---|------|------|------|
| | 1 | 5 | 10 | 20 | 25 |
| Неман | 2,2 | 1 | 0,64 | 0,36 | 0,29 |
| Зап. Двина | 2,0 | 1 | 0,67 | 0,41 | 0,33 |
| Днепр | 2,1 | 1 | 0,65 | 0,37 | 0,30 |
| Припять | 1,9 | 1 | 0,70 | 0,44 | 0,37 |
| Беларусь в целом | 2,1 | 1 | 0,66 | 0,40 | 0,32 |

лей. На рис. 2 приведены сравнительные графики расчетных $M_{p5\% \text{ расч.}}$ и фактических $M_{p5\% \text{ фактич.}}$ величин модулей стока дождевых паводков 5%-ной обеспеченности рек Беларуси.

вавшие в построении моделей.

Проведенный анализ остатков региональных зависимостей показал, что полосы остатков можно практически во всех случаях принять горизонтальными, и это свидетельствует о правильности построенных моде-

Полученные модели можно использовать и для определения максимальных модулей стока дождевых паводков другой расчетной обеспеченности. Коэффициенты перехода от 5%-ной к другим обеспеченностям представлены в табл. 2.

Таким образом, полученные модели позволяют определять модули стока дождевых паводков необходимой расчетной обеспеченности в зависимости от основных гидрографических характеристик водосборов рек Беларуси.

Выводы

1. Комплексный анализ формирования дождевых паводков на реках Беларуси позволил выявить степень влияния различных гидрографических характеристик водосборов на максимальные модули стока.

2. Выявлены статистически значимые факторы, определяющие величину модулей стока дождевых паводков. Результаты анализа послужили основой для разработки моделей определения максимальных модулей стока дождевых паводков 5%-ной обеспеченности на реках Беларуси.

3. Получены коэффициенты перехода от 5%-ной к другим расчетным обеспеченностям.

4. Построенные модели можно рекомендовать для оценки максимальных расходов воды дождевых паводков 5%-ной обеспеченности на реках Беларуси по основным гидрографическим характеристикам при отсутствии гидрологических наблюдений на реках.

5. Для повышения надежности результатов рекомендуется использовать обе модели. При получении близких результатов конечный модуль принимать как средний. При значительных расхождениях требуется дополнительный анализ.

Литература

1. Пособие к строительным нормам и правилам. П1-98 к СНиП 2.01.14-83 Определение расчетных гидрологических характеристик. – Минск: РУП «Минсктиппроект», 2000. – 174 с.
2. СНиП 2.01.14-83. Определение расчетных гидрологических характеристик. – М.: Государственный комитет СССР по делам строительства, 1983. – 97 с.
3. Лобанов, В.А. Региональные модели определения характеристик максимального стока в зависимости от гидрографических факторов / В.А. Лобанов, В.Н. Никитин // Метеорология и гидрология. – 2006. – № 11. – С. 60-69.

Summary

Volchek A. , Shelest T. The influence of hydrographic factors on the size of rainfall floods on the rivers of the Belarus

The article describes the results of the analysis of influence of hydrographic factors on formation of rainfall floods on the rivers of the Belarus for the period of instrumental observations. The regional mathematical models are constructed. If the supervision on the rivers is absence, the received models allow to define the maximal charges of water of rainfall floods of 5% probability with sufficient accuracy for practical calculations. Rates of transition from 5 % probability to other probability are received.

Поступила 8 сентября 2009 г.