

---

---

**ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ  
И РЕЖИМ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ**

---

---

УДК 556.166+16.047(476)

**АНАЛИЗ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОГРАФОВ  
ДОЖДЕВЫХ ПАВОДКОВ РЕК БЕЛАРУСИ**

© 2015 г. В. Ф. Логинов\*, А. А. Волчек\*\*, Т. А. Шелест\*\*\*

*\*Институт природопользования НАН Беларуси  
220114 Беларусь, Минск, ул. Скорины, 10*

*\*\*Брестский государственный технический университет  
224017 Беларусь, Брест, ул. Московская, 267*

*\*\*\*Брестский государственный университет им. А.С. Пушкина  
224016 Беларусь, Брест, бульвар Космонавтов, 21*

*E-mail: volchak@tut.by*

Поступила в редакцию 15.11.2013 г.

Рассмотрены условия формирования паводков на реках Беларуси в различные сезоны года. Проанализированы гидрографы дождевых паводков. Изложена методика построения гидрографов дождевых паводков при отсутствии данных гидрометрических наблюдений, усовершенствованная путем уточнения и упрощения некоторых вычислений и повышения достоверности определения характеристик паводочного стока.

*Ключевые слова:* дождевой паводок, гидрограф, обеспеченность, факторы.

**DOI:** 10.7868/S0321059615030074

Водный режим рек Беларуси в годовом разрезе характеризуется высоким весенним половодьем, относительно низкой летней меженью, периодическими паводками. В осенне-зимний период обычно наблюдается несколько повышенная водность рек в результате выпадения значительных осадков. Во внутригодовом распределении стока выделяются два максимума — весенний и осенний и два минимума — летний и зимний. На весну приходится 44–67% годового стока.

Паводки на реках Беларуси бывают почти ежегодно и наблюдаются в различное время года. На дождевые паводки приходится в среднем 15–20% (в отдельные годы — до 40% и более) годового стока рек. Максимальные расходы воды дождевых паводков могут превышать максимумы половодий. Особенно часто это наблюдается в бассейнах рек Припять, Западный Буг и Вилия. С середины 1980-х гг. отмечается тенденция увеличения случаев превышения половодий дождевыми паводками на всех реках страны.

При решении ряда практических задач (проектировании водохранилищ, прудов, оценке затопления пойм, пропуске высоких вод через дорожные сооружения, разработке мероприятий по борьбе с наводнениями, отводе вод от сооруже-

ний в период их строительства и т.д.), помимо максимального расхода, необходимы сведения о продолжительности паводка, интенсивности его подъема и спада. Распределение стока паводка во времени отражают гидрографы дождевых паводков.

Цель настоящего исследования — анализ и моделирование гидрографов дождевых паводков рек Беларуси в случае недостаточности или отсутствия данных гидрометрических наблюдений. Проблема определения характеристик паводков в этих условиях представляется одной из главных. Так, в Беларуси на более чем 20 тыс. рек и ручьев приходится только 123 гидрологических поста. Существующая методика построения гидрографов дождевых паводков при отсутствии данных гидрометрических наблюдений на реках предусматривает наличие рек-аналогов. Однако подобрать реку-аналог при современной разреженной сети гидрологических постов достаточно сложно. Кроме того, в связи наблюдаемыми изменениями условий формирования стока (вследствие увеличения антропогенной нагрузки и изменения климата) возникла необходимость уточнения существующих методов расчета гидрологических характеристик.

### ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

В основу исследования положены материалы наблюдений Управления гидрометеорологической деятельности Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь за максимальными расходами воды дождевых паводков за период от начала инструментальных наблюдений до 2010 г., среднесуточными расходами воды рек в период 1981–2010 гг. и суточными атмосферными осадками по метеостанциям Беларуси в период 1960–2010 гг.

В настоящее время нормативными документами для расчета одновершинных гидрографов дождевых паводков при отсутствии данных гидрометрических наблюдений для условий Беларуси рекомендован метод, предложенный Г.А. Алексеевым. Формула для расчета одновершинного гидрографа имеет следующий вид [5]:

$$y = 10^{\frac{a(1-x)^2}{x}}, \quad (1)$$

где  $y = \frac{Q_i}{Q_p}$  – отношение расхода воды  $Q_i$  к максимальному среднему суточному расходу  $Q_p$  заданной обеспеченности  $P$ , %;  $x = \frac{t_i}{t_n}$  – время от начала паводка, выраженное в долях от продолжительности подъема паводка  $t_n$ , при этом  $t_i$  – время, соответствующее  $Q_i$  от начала паводка;  $a$  – параметр, зависящий от коэффициента формы гидрографа  $\lambda$ :

$$\lambda = \frac{qt_n}{0.0116h} \quad (2)$$

( $q$  – модуль максимального среднесуточного расхода воды дождевого паводка,  $\text{м}^3/(\text{с км}^2)$ ;  $t_n$  – продолжительность подъема паводка, сут;  $h$  – слой стока за паводок, мм).

Коэффициент формы гидрографа  $\lambda$ , абсцисса расчетного гидрографа  $x$  и ордината  $y$  принимаются в зависимости от коэффициента несимметричности гидрографа  $k_s$ , вычисляемого по следующей формуле ([5], приложение Б, табл. Б. 10):

$$k_s = \frac{h_n}{h} = f(\lambda), \quad (3)$$

где  $h_n$  – слой стока за период подъема паводка, мм.

Расчетный коэффициент несимметричности гидрографа  $k_s$  при отсутствии данных гидрометрических наблюдений на реке принимается по данным наблюдений на реке-аналоге.

Координаты расчетного гидрографа  $t_i$  и  $Q_i$  определяются путем умножения абсцисс  $x$  на про-

должительность подъема паводка, а ординат  $y$  – на максимальный расчетный расход воды ([5], приложение Б, табл. Б. 10) по формулам:

$$t_i = xt_n, \quad (4)$$

$$Q_i = yQ_p, \quad (5)$$

где  $Q_p = q_p A$  – расчетный максимальный среднесуточный расход воды дождевого паводка,  $\text{м}^3/\text{с}$  ( $A$  – площадь водосбора,  $\text{км}^2$ );  $t_n$  – продолжительность подъема дождевого паводка, сут, определяемая по формуле

$$t_n = \frac{0.0116\lambda h_p}{q_p} \quad (6)$$

( $q_p$  – расчетный модуль максимального среднесуточного расхода воды паводка,  $\text{м}^3/(\text{с км}^2)$ ;  $h_p$  – слой стока расчетной обеспеченности, мм).

Таким образом, для построения расчетного гидрографа в случае отсутствия данных гидрометрических наблюдений необходимо определить: максимальный среднесуточный расход воды, слой стока расчетной обеспеченности, коэффициент несимметричности паводка.

### АНАЛИЗ ГИДРОГРАФОВ ДОЖДЕВЫХ ПАВОДКОВ

Паводки по характеру формирования и форме проявления бывают весьма разнообразны, в значительной мере отражают динамику формирующих их дождей. Вследствие большого числа комбинаций формирующих факторов гидрографы дождевых паводков уникальны.

На реках Беларуси наиболее часто отмечаются однопиковые паводки. Вероятность появления двухпиковых паводков составляет в среднем ~20%. Трехпиковые паводки – явление еще более редкое. Они встречаются в 10% случаев и реже. Многопиковые (более трех пиков) паводки на реках страны встречаются крайне редко.

Явление паводков с несколькими пиками обусловлено прежде всего характером выпадения осадков. Двух- и трехпиковые паводки формировались осенью 2009 г. в бассейне Западной Двины, в 1998 г. – на многих реках Беларуси, летом 1988 г. – в бассейне Западного Буга, в отдельные годы на разных реках страны. Например, в 1998 г., когда выпало аномально большое количество осадков, дождевые паводки на большинстве рек Беларуси формировались неоднократно и гидрографы их имели разнообразные формы (рис. 1).

На малых реках форма гидрографов паводков, как правило, островершинная с резкими подъемами и спадами. Здесь даже кратковременный

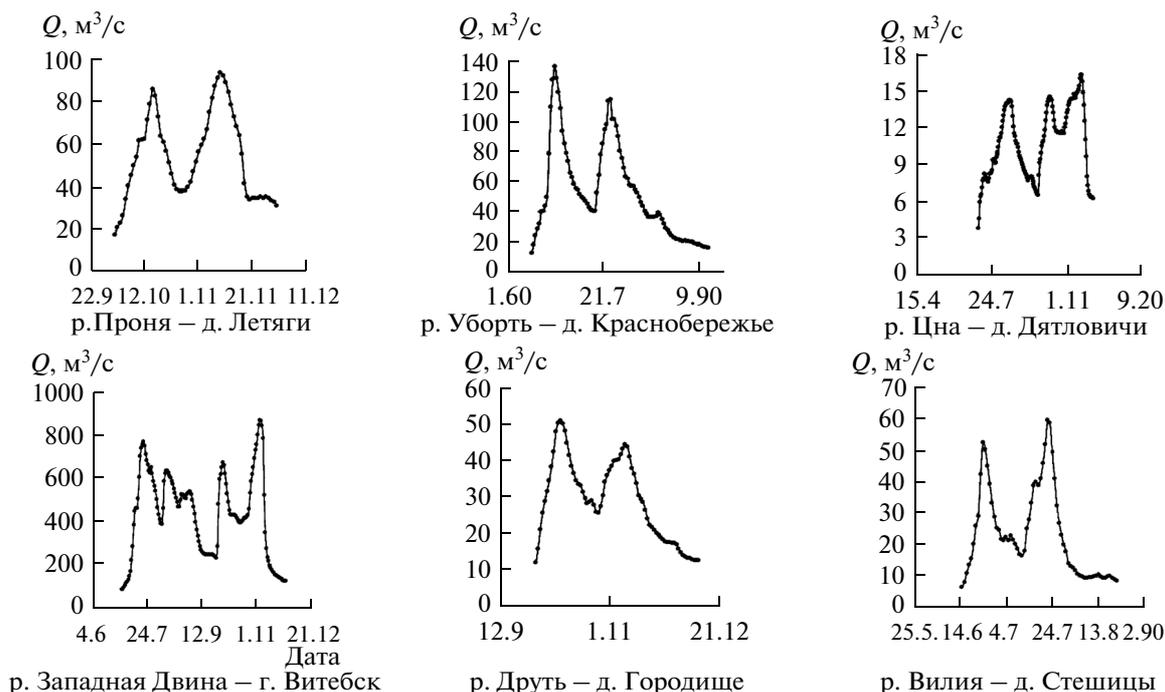


Рис. 1. Гидрографы дождевых паводков 1998 г.

дождь вызывает подъем уровня и часто образует небольшую паводочную волну. На больших реках максимальные уровни могут удерживаться несколько суток. На некоторых реках (Дрыса, Нища, Ясельда) гидрографы часто приобретают зубчатую форму.

Продолжительность дождевых паводков зависит от многих факторов (площади водосбора, типа дождя, зарегулированности озерами и болотами и др.). Средняя продолжительность дождевых паводков на малых и средних реках Беларуси (с площадью водосбора  $<10$  тыс.  $\text{km}^2$ ) составляет  $\sim 32$  сут; причем на реках бассейна Припяти она наибольшая —  $\sim 39$  сут, в бассейне Западной Двины  $\sim 30$ , Немана и Западного Буга  $\sim 28$ , Днепра  $\sim 29$  сут. На больших реках продолжительность паводков гораздо больше — в среднем  $\sim 50$  сут и изменяется от 45 сут на реках Западная Двина и Неман, 50 сут на р. Днепр до 62 сут на р. Припяти. Паводки с меньшей продолжительностью вызываются кратковременными дождями и ливнями, а с большей — обложными дождями. На зарегулированных озерами и болотами реках Полесья продолжительность летних и осенних паводков, которые нередко сливаются и вместе образуют несколько или одну большую волну, может достигать нескольких месяцев.

Наибольшее значение при построении гидрографов паводков имеет продолжительность подъ-

ема, которая определяет скорость формирования паводка. Средняя продолжительность подъема паводков в бассейне Припяти составляет 16 сут, на остальных реках Беларуси  $\sim 11$  сут. Существенны различия и между реками с разной площадью водосбора. На больших реках подъем может продолжаться по 3–4 недели и более.

Продолжительность (в среднем 21 сут) спада обычно больше продолжительности подъема паводка. Она также увеличивается на больших водосборах (в среднем 26) и уменьшается на малых (17). Нередко на спаде паводка выпадают осадки, тогда гидрографы паводков приобретают многовершинную форму. На реках в северной и западной частях страны время подъема заметно меньше, чем спада. В бассейне Днепра и Припяти форма паводков более симметричная.

#### ВРЕМЕННАЯ ПРИУРОЧЕННОСТЬ ДОЖДЕВЫХ ПАВОДКОВ

Изучена приуроченность наибольших в году дождевых паводков к определенным сезонам года за период инструментальных наблюдений на реках страны. При этом паводки были разделены на 3 группы по времени формирования: весенние (апрель—начало июня), летние (июнь—начало сентября) и осенние (сентябрь—ноябрь). Границы сезонов могут смещаться в зависимости от предшествующей гидрометеорологической ситуации.

Так, например, при продолжительном растянутом половодье в случае выпадения осадков на его спаде дождевые паводки, формирующиеся на фоне повышенной водности весеннего периода, возможны до июля. Если паводки в июне наблюдались уже после спада половодья, то они относились к летнему сезону, а если на фоне повышенного стока весеннего периода — то к весеннему. Паводки, наблюдаемые в сентябре, относились либо к летнему периоду, если формирование их началось еще летом, либо к осеннему.

В ходе исследования выявлено, что в целом по стране наиболее часто отмечаются осенние или летние паводки. Причем осенние паводки особенно заметно преобладают на реках водосбора Западной Двины, а летние — на реках водосбора Немана. На некоторых реках Беларуси наибольшие в году дождевые паводки чаще отмечаются в весенний период (реки Кривинка, Бобр, Копаявка).

Отдельно рассматривалась частота встречаемости паводков за различные сезоны года по периодам: от начала инструментальных наблюдений до 1965 г. и с 1965 по 2010 г. В период до 1965 г. практически на всех реках Беларуси преобладали осенние паводки (50% дождевых паводков), а после 1965 г. — летние.

Для выявления влияния современных изменений климата на сезонную приуроченность дождевых паводков период 1965–2010 гг. был разделен на 2 одинаковых по продолжительности интервала: 1965–1987 и 1988–2010 гг. Анализ количества дождевых паводков за различные периоды показал, что в период современного потепления климата (1988–2010 гг.) количество летних паводков увеличилось по сравнению с предшествующим периодом на 10–20%, особенно существенно — в бассейне Немана.

Наибольшие дождевые паводки (обеспеченностью <5%) формируются при сочетании большого числа экстремальных факторов, и они менее привязаны к тому или иному сезону. До 1965 г. наибольшие паводки чаще формировались в осенний период, а после 1965 г. — в летний либо весенний.

### РОЛЬ ОСАДКОВ В ФОРМИРОВАНИИ ДОЖДЕВЫХ ПАВОДКОВ

Для формирования паводка необходимо некоторое критическое количество выпавших осадков. Если осадков выпадает меньше этого количества, то паводка на реке не будет. Этот предел меняется с изменением площади и увлажненности водосбора, а также в зависимости от продолжительности и интенсивности осадков. Началь-

ные потери стока связаны с расходами воды на заполнение неровностей на поверхности водосбора, инфильтрацию, испарение. В условиях сухих грунтов и большого испарения происходят быстрые потери воды, поэтому даже большое количество осадков не всегда приводит к формированию дождевого паводка. Данные наблюдений показывают, что есть случаи, когда количество осадков >80 мм за сутки не вызывало паводка на реках. И наоборот, в дождливую осень осадки <10 мм обращались в сток с минимальными потерями. Таким образом, количество осадков, вызывающих паводок, может зависеть от целого ряда факторов. При одинаковом количестве осадков в одних случаях может сформироваться значительный паводок, в других — паводка может и не быть.

От количества, интенсивности, продолжительности осадков, их распределения по площади водосбора зависит объем стока паводка и его распределение во времени, т.е. форма гидрографа. Так, паводки, вызванные сильными ливнями, характеризуются сильными и резкими подъемом и спадом, а вызванные обложными дождями паводки — плавные и продолжительные. Паводки редко охватывают огромные территории. Часто они захватывают лишь отдельные речные бассейны.

На формирование паводков на реках в значительной мере влияет площадь водосборов. На малых водосборах даже относительно кратковременные дожди вызывают подъем уровней. Вероятность полного охвата таких водосборов ливнями гораздо выше, чем больших. На малых реках время добегания небольшое, паводки кратковременные и редко один ливневый паводок накладывается на другой. В больших бассейнах происходит уменьшение объема паводочного стока в связи с пойменным задержанием и последующим испарением воды. Рост уровня воды на большой реке напрямую зависит от подъема воды на притоках.

Анализ распределения паводков на реках Беларуси показал, что синхронность в формировании особенно высоких дождевых паводков не отмечается. Следовательно, в большинстве случаев интенсивные дожди и ливни локальны и не охватывают всю территорию одновременно. Если на одних реках паводок может достигать катастрофических масштабов, то на других его может и не быть. Однако отдельные паводки отмечались одновременно на многих реках страны в 1933, 1962, 1975, 1998, 2005 гг., при этом их обеспеченность различна по территории.

Синоптические ситуации, приводящие к формированию паводков на реках, очень многообразны; различаются и предшествующие паводку

условия увлажнения в различные сезоны года. Вследствие большой изменчивости влажности почвы по территории в практике широко используются разного рода косвенные оценки степени увлажнения бассейнов. Самая простая и наиболее употребительная характеристика — индекс предшествующего увлажнения  $I_w$  (мм), основанная на использовании данных об осадках за достаточно длительный предшествующий период [1]. Упрощенная формула для расчета имеет следующий вид:

$$I_w = x_1 + 0.7x_{2-4} + 0.5x_{5-9} + 0.3x_{10-14} + 0.2x_{15-30} + 0.1x_{31-60}, \quad (7)$$

где  $x_1$  — количество осадков за предшествующие расчетному дню сутки, мм;  $x_{2-4}$  — сумма осадков, выпавших за вторые—четвертые сутки до расчетного дня и т.д.

Анализ гидрографов дождевых паводков обеспеченностью  $\leq 25\%$  на реках с площадью водосбора до 10 тыс. км<sup>2</sup>, расположенных в разных частях страны, и условий их формирования позволил выделить несколько типовых ситуаций, приводящих к формированию паводков на реках. При этом рассматривались общая продолжительность осадков, приводящих к формированию паводка, слой осадков за период его формирования, индекс предшествующего увлажнения. Три описанные ситуации формирования паводков — осредненные и довольно общие.

**Весенние паводки.** Дождевые паводки в конце весны — начале лета формируются в условиях, когда еще сохраняется повышенная водность за счет весеннего половодья при насыщенных влагой грунтах. В этом случае выпадение даже относительно небольшого количества осадков может вызвать большие паводки. Подъем воды при прохождении дождей на спаде половодья или сразу после его окончания начинается в первый же день выпадения осадков. Индекс предшествующего увлажнения составляет 45—50 мм. Общее количество осадков, приводящее к формированию весенних паводков, как правило, невелико: даже суточные осадки 20—30 мм могут вызвать значительные паводки на реках.

**Летние паводки.** Формирование летних паводков происходит обычно в результате выпадения ливневых дождей при достаточно высокой температуре воздуха, когда сохраняется повышенное испарение; почва в состоянии поглотить значительное количество воды. Однако, несмотря на большие потери, летние паводки в Беларуси наблюдаются довольно часто, что связано с преобладанием летних осадков. Осадки с суточным

максимумом  $>50$  мм чаще отмечаются в июле и августе (~34 и 26% соответственно), несколько реже — в июне (~20%). Иногда за сутки может выпасть месячная норма и даже 1.5—2.0 месячных норм осадков. Большие летние паводки на реках формируются в случае выпадения серии дождей или при продолжительном дождливом периоде. Осадков за время паводка может выпасть до 150—200 мм. Индекс предшествующего увлажнения также сильно изменяется, его среднее значение — 80 мм.

**Осенние паводки,** в отличие от летних, характеризуются меньшей высотой, но большей продолжительностью. Они возникают из-за частых обложных дождей. Вследствие преобладания пасмурной погоды при снижении температуры воздуха испарение уменьшается. Индекс предшествующего увлажнения составляет ~50 мм. Количество осадков, необходимое для формирования паводка, не очень велико. Осадки продолжительные, но их интенсивность невелика. Осенние паводки уступают летним и весенним по величине максимального расхода, за исключением некоторых катастрофических паводков, например в 1974 г.

Таким образом, наиболее благоприятные условия для образования паводков — после весеннего снеготаяния, когда почва увлажнена до состояния наименьшей влагоемкости. Летом почва иссушается испарением и транспирацией и способна интенсивно поглощать воду. Осенью вследствие уменьшения испарения и возрастания осадков инфильтрационная способность снова понижается.

Наиболее катастрофические дождевые паводки на реках Беларуси отмечались осенью 1974 г. (бассейн Западного Буга и верховья р. Припяти), весной 1975 г. (бассейн Припяти), летом 1993, 1998 (бассейн Припяти) и 2007 гг. (реки в Брестской области).

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАКСИМАЛЬНЫХ РАСХОДОВ ВОДЫ ПАВОДКОВ

Для построения гидрографов дождевых паводков необходимо рассчитать максимальные расходы воды. Рекомендованная методика определения максимальных расходов воды паводков в случае отсутствия данных гидрометрических наблюдений на реках предусматривает определение ряда специфических параметров (гидравлического параметра русла; коэффициента, учитывающего снижение максимального расхода воды проточными озерами, и др.), определение которых вызывает трудности. Авторами настоящей статьи разработана методика, позволяющая определять макси-

мальные модули стока дождевых паводков рек Беларуси с использованием гидрографических характеристик водосборов, которая на стадии предварительных и оценочных расчетов дает приемлемые результаты. Подробно методика изложена в [3, 4].

Для того чтобы использовать величины максимальных расходов воды паводков для обобщения, необходимо сделать их сравнимыми и привести к одной величине обеспеченности. С этой целью для каждого створа с помощью программного комплекса Гидролог [2] определены 10%-ные максимальные расходы воды дождевых паводков, которые представлены в виде модулей стока,  $\text{м}^3/(\text{с км}^2)$ . Выбор данной расчетной обеспеченности обусловлен нормативными документами, поскольку большинство гидротехнических сооружений рассчитывается на расход дождевых паводков именно 10%-ной обеспеченности.

В качестве гидрографических факторов, формирующих паводки, рассматривались следующие:  $A$  – площадь водосбора,  $\text{км}^2$ ;  $H_{\text{ср}}$  – средняя высота водосбора,  $\text{м}$ ;  $L$  – длина реки от истока до пункта наблюдений,  $\text{км}$ ;  $\gamma_A$  – густота речной сети,  $\text{км}/\text{км}^2$ ;  $J_p$  – средний уклон реки,  $\%$ ;  $A_{\text{заб}}$  – заболоченность водосбора,  $\%$ ;  $A_{\text{оз}}$  – озерность водосбора,  $\%$ ;  $A_{\text{лес}}$  – лесистость водосбора,  $\%$ . Помимо гидрографических факторов, рассматривались и географические координаты центров тяжести водосборов:  $\varphi$  – широта,  $\text{км}$ ,  $\lambda$  – долгота,  $\text{км}$ .

С целью выявления статистически значимых факторов в формировании максимальных модулей стока дождевых паводков 10%-ной обеспеченности для рек Беларуси проведен корреляционный анализ. В связи с различием по территории страны условий формирования паводков анализ степени влияния рассматриваемых факторов выполнен и в пределах отдельных крупных речных бассейнов: Западной Двины, Немана, Днепра, Припяти и Западного Буга. Для линеаризации зависимостей дождевого стока от рассматриваемых факторов проведен корреляционный анализ и для логарифмического преобразования максимальных модулей стока 10%-ной обеспеченности и гидрографических факторов. Фрагмент корреляционной матрицы представлен в табл. 1.

Таким образом, статистически значимые факторы для рек Беларуси в целом – площадь водосбора, длина реки от истока до пункта наблюдений и средний уклон реки. Значимость различных факторов изменяется по бассейнам рек. Для большинства водосборов наиболее значимый

фактор – средний уклон реки (кроме бассейна Западной Двины). В бассейнах Западной Двины и Днепра велика роль озерности водосборов, в бассейне Немана – средней высоты водосбора.

В результате регрессионного анализа получены математические модели, позволяющие определять максимальные модули стока дождевых паводков 10%-ной обеспеченности для рек Беларуси,  $\text{м}^3/(\text{с км}^2)$ . Наиболее эффективные уравнения представлены в табл. 2.

Значения коэффициента множественной корреляции  $R$  в полученных моделях высоки (0.93–0.98), в модели для рек Беларуси в целом значения  $R$  несколько меньше (0.76). Проверка уравнений путем сопоставления рассчитанных по формулам и фактических значений максимальных модулей стока дождевых паводков 10%-ной обеспеченности показала их высокую эффективность. На рис. 2 представлены графики соотношения рассчитанных  $q_{10\% \text{расчет}}$  по формулам и фактических  $q_{10\% \text{факт}}$  значений максимальных модулей стока дождевых паводков 10%-ной обеспеченности рек Беларуси.

Для определения максимального модуля стока паводка другой расчетной обеспеченности ( $P$ , %) используется соотношение  $q_p = \lambda'_p q_{10\%}$ , в котором величина максимального модуля стока обеспеченностью 10% ( $q_{10\%}$ ) определяется по соответствующим моделям (табл. 2),  $\lambda'_p$  – коэффициент перехода к максимальному модулю стока другой обеспеченности, принимаемый по табл. 3.

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

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ СЛОЯ СТОКА ЗА ПАВОДОК

Вторая задача при построении гидрографов дождевых паводков в случае отсутствия гидрометрических наблюдений на реках – определение слоя дождевого паводочного стока расчетной обеспеченности ( $h_p$ ).

Слой стока за паводок  $h$ ,  $\text{мм}$ , рассчитывался по следующей формуле:

$$h = \frac{W}{1000A}, \quad (8)$$

где  $A$  – площадь водосбора,  $\text{км}^2$ ;  $W$  – объем стока за весь паводок,  $\text{м}^3$ , который определялся путем суммирования средних суточных расходов воды  $Q_T$  с первого дня подъема паводка  $T_n$  и до даты конца паводка  $T_k$  включительно:

**Таблица 1.** Корреляционная матрица максимальных модулей стока дождевых паводков 10%-ной обеспеченности и гидрографических факторов и их логарифмических преобразований (жирный шрифт – статистически значимые коэффициенты корреляции)

Гидрографическая характеристика	Преобразования	Бассейн реки									
		Все реки Беларуси		Западная Двина		Неман		Днепр		Припять и Западный Буг	
		$M_{10\%}$	$\lg M_{10\%}$	$M_{10\%}$	$\lg M_{10\%}$	$M_{10\%}$	$\lg M_{10\%}$	$M_{10\%}$	$\lg M_{10\%}$	$M_{10\%}$	$\lg M_{10\%}$
Площадь водосбора реки $A$	$A$	<b>-0.39</b>		-0.27		-0.44		<b>-0.58</b>		-0.33	
	$\lg A$		<b>-0.62</b>		-0.46		-0.45		<b>-0.85</b>		<b>-0.69</b>
Средняя высота водосбора $H_{\text{ср}}$	$H_{\text{ср}}$	0.01		0.10		<b>0.73</b>		-0.14		-0.18	
	$\lg H_{\text{ср}}$		-0.02		0.07		<b>0.59</b>		-0.12		-0.23
Длина реки от истока до пункта наблюдений $L$	$L$	<b>-0.43</b>		-0.24		<b>-0.53</b>		<b>-0.62</b>		-0.38	
	$\lg L$		<b>-0.50</b>		-0.17		-0.19		<b>-0.83</b>		<b>-0.57</b>
Густота речной сети $\gamma_A$	$\gamma_A$	0.08		0.12		-0.10		0.05		0.02	
	$\lg \gamma_A$		0.12		0.06		0.09		-0.01		0.06
Средний уклон реки $J_p$	$J_p$	<b>0.66</b>		0.48		<b>0.89</b>		<b>0.91</b>		<b>0.84</b>	
	$\lg J_p$		<b>0.71</b>		0.45		<b>0.84</b>		<b>0.85</b>		<b>0.79</b>
Заболоченность водосбора $A_{\text{заб}}$	$A_{\text{заб}}$	-0.12		-0.03		-0.23		0.04		-0.08	
	$\lg(A_{\text{заб}} + 1)$		-0.18		-0.07		-0.18		-0.08		0.01
Озерность водосбора $A_{\text{оз}}$	$A_{\text{оз}}$	-0.17		<b>-0.70</b>		-0.38		<b>-0.69</b>		-0.35	
	$\lg(A_{\text{оз}} + 1)$		-0.23		<b>-0.63</b>		<b>-0.50</b>		<b>-0.69</b>		<b>-0.44</b>
Лесистость водосбора $A_{\text{лес}}$	$A_{\text{лес}}$	0.13		-0.33		-0.19		0.31		-0.14	
	$\lg(A_{\text{лес}} + 1)$		-0.00		-0.38		-0.19		0.23		-0.10
Широта створа $\varphi$	$\varphi$	0.09		-0.34		0.41		-0.07		-0.22	
	$\lg \varphi$		0.23		-0.36		0.39		-0.05		0.13
Долгота створа $\lambda$	$\lambda$	0.06		-0.12		0.22		-0.15		0.08	
	$\lg \lambda$		0.09		-0.08		0.21		-0.08		-0.03

**Таблица 2.** Модели расчета региональных максимальных модулей стока дождевых паводков 10%-ной обеспеченности рек Беларуси

Бассейн реки	Модель	$R$
Западная Двина	$q_{10\%} = 10^{-3}(8.74J_p + 0.13L - 2.81A_{\text{оз}} - 0.002A + 28.5)$	0.93
Неман	$q_{10\%} = 10^{-3}(6.63J_p + 0.0005A - 0.08L - 0.55A_{\text{оз}} + 26.1)$	0.97
Днепр	$q_{10\%} = 10^{-3}(30.1J_p + 1.64A_{\text{заб}} + 0.29H_{\text{ср}} - 7.55A_{\text{оз}} - 48.5)$	0.98
Припять и Западный Буг	$q_{10\%} = \frac{10^{3.57} J_p^{0.38}}{H_{\text{ср}}^{1.94} A^{0.15} (A_{\text{оз}} + 1)^{0.43} (\varphi - 50)^{0.72}}$	0.95
Все реки Беларуси	$q_{10\%} = \frac{0.057 J_p^{0.37} L^{0.16}}{A^{0.18}}$	0.76

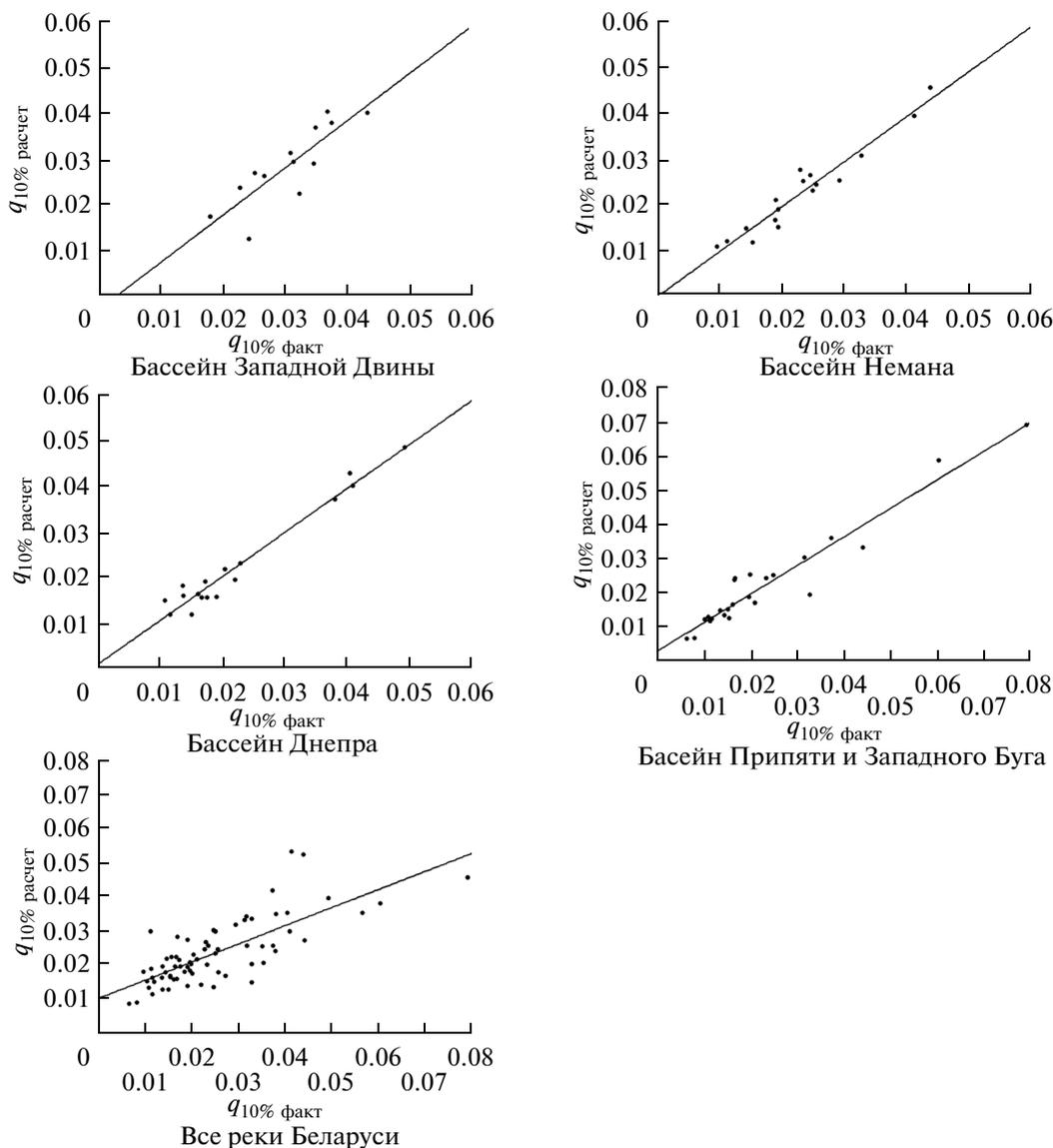


Рис. 2. Графики соотношения рассчитанных и фактических значений максимальных модулей стока паводков.

$$W = 86400 \sum_{T_k}^{T_n} Q_T. \quad (9)$$

Чтобы исключить составляющую подземного питания в формировании дождевого паводка, расходы воды, соответствующие датам начала паводка  $T_n$  и конца  $T_k$ , включались в объем в половинном размере.

Полученные слои стока за период паводков ранжировались. С использованием трехпараметрического гамма-распределения рассчитывались значения слоев стока за время паводков 1-, 5-, 10- и 25%-ной обеспеченностей.

Слои стока за паводок 10%-ной обеспеченности были картографированы с использованием

координат центров тяжести водосборов исследуемых рек (рис. 3). Для определения слоев стока за паводок другой расчетной обеспеченности получены коэффициенты  $\lambda_p''$ , представленные в табл. 4.

Таким образом, расчетный слой дождевого паводочного стока  $h_p$  требуемой обеспеченности  $P, \%$ , рассчитывается по соотношению  $h_p = \lambda_p'' h_{10\%}$ , в котором величина слоя стока за паводок обеспеченностью 10% ( $h_{10\%}$ ) определяется по карте (рис. 3),  $\lambda_p''$  – коэффициент перехода к слою стока другой обеспеченности, принимаемый по табл. 4.

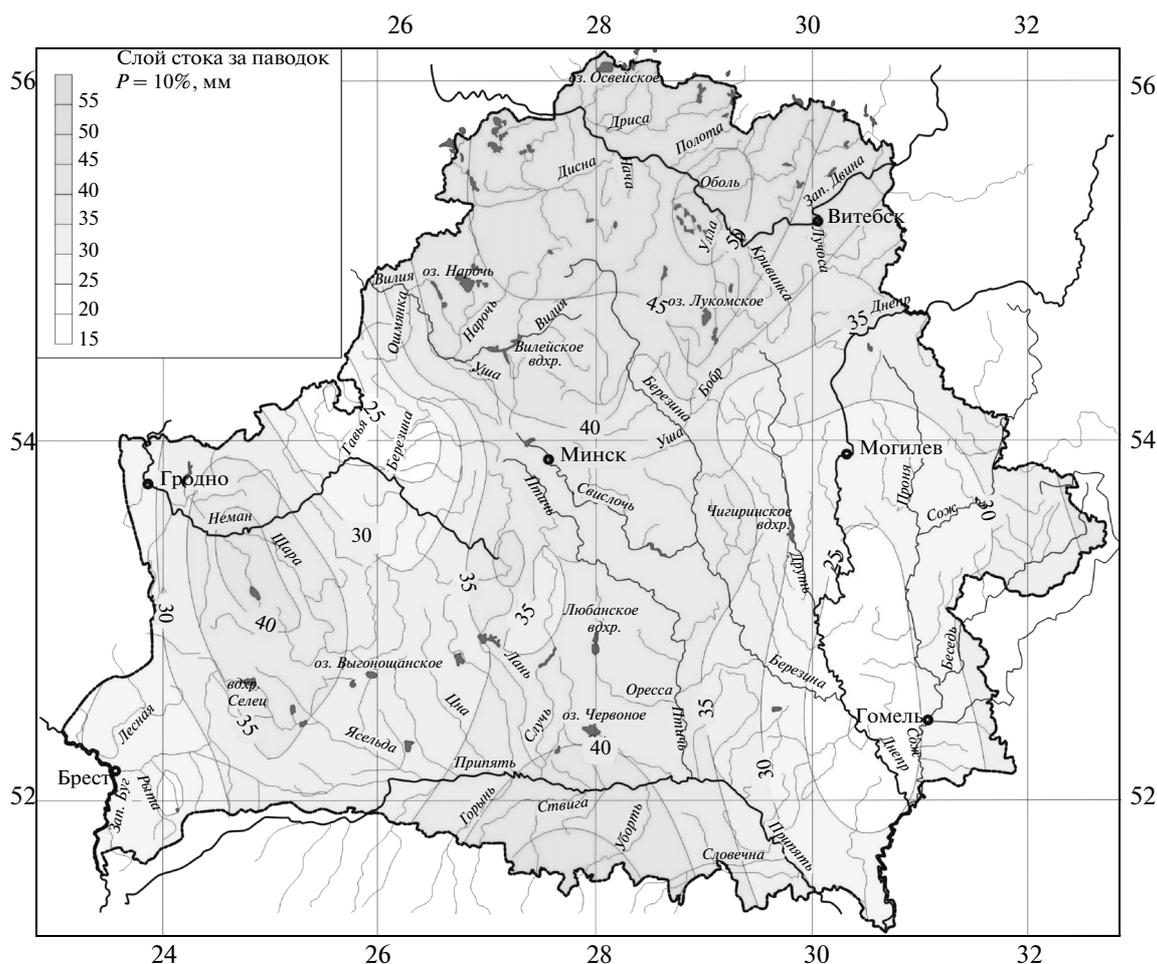
**Таблица 3.** Коэффициенты перехода  $\lambda_p$  максимальных модулей стока дождевых паводков от 10%-ной к другим обеспеченностям

Бассейн реки	1%	5%	10%	20%	25%
Западная Двина	1.88	1.35	1	0.66	0.60
Неман	2.04	1.30	1	0.76	0.70
Днепр	2.74	1.52	1	0.74	0.65
Припять и Западный Буг	2.10	1.33	1	0.69	0.60
Все реки Беларуси	2.16	1.39	1	0.72	0.65

Анализ карты показывает, что наибольшие значения слоя стока за паводок характерны для рек в северной части Беларуси – в среднем 45–50 мм, несколько меньшие – на крайнем юге. Самые малые показатели слоя стока отмечаются на реках на востоке и крайнем юго-западе страны – 25–30 мм.

На остальных реках страны средние значения слоя стока за паводок составляют 35–40 мм.

В связи с тем, что параметры максимальных расходов воды паводков и соответствующие им слою стока не совпадают, в формулу для определе-



**Рис. 3.** Карта слоя стока за паводок 10%-ной обеспеченности рек Беларуси.

**Таблица 4.** Коэффициенты перехода  $\lambda_p''$  слоя стока дождевых паводков от 10%-ной к другим обеспеченностям

<i>P, %</i>				
1	5	10	20	25
2.03	1.28	1	0.71	0.65

ния продолжительности подъема паводка (6) введен коэффициент  $\mu$ , значения которого определяются по табл. 5. Тогда формула (6) принимает следующий вид:

$$t_{п} = \frac{0.0116\lambda h_p \mu_{10\%}}{q_p}, \quad (10)$$

где  $\mu_{10\%}$  – коэффициент, учитывающий неравенство статистических параметров слоя стока за паводок и максимальных расходов воды.

Таким образом, для определения слоя дождевого паводочного стока 10%-ной обеспеченности построена карта, позволяющая определять величину слоя стока за паводок без привлечения рек-аналогов, и рассчитаны коэффициенты перехода от 10%-ной к другим расчетным обеспеченностям.

### КОЭФФИЦИЕНТЫ НЕСИММЕТРИЧНОСТИ ФОРМЫ ПАВОДКА

Третья задача при построении гидрографов дождевых паводков – расчет коэффициента формы гидрографа  $\lambda$ , который определяется в зависимости от коэффициента несимметричности  $k_s$ .

В [5] коэффициенты несимметричности рекомендуется принимать по рекам-аналогам; при их отсутствии допускается принимать  $k_s = 0.30$ . Однако в силу различий условий формирования и особенностей прохождения дождевых паводков на разных реках Беларуси и для повышения точности построения рассчитаны средние коэффициенты несимметричности гидрографов дождевых паводков рек, которые представлены в табл. 6.

Исходя из представленных в табл. 6 значений коэффициентов несимметричности ([5], приложение Б, табл. Б. 10) определяются координаты расчетного гидрографа.

**Таблица 5.** Значения коэффициента  $\mu$ , учитывающего неравенство параметров слоя стока и максимальных расходов воды дождевых паводков

Бассейн реки	<i>P, %</i>				
	1	5	10	20	25
Западная Двина, Неман, Западный Буг	1.0	0.98	0.95	0.89	0.86
Днепр и Припять	1.0	0.97	0.94	0.87	0.83

### ПОСТРОЕНИЕ ГИДРОГРАФОВ ДОЖДЕВЫХ ПАВОДКОВ

Построение гидрографов дождевых паводков при отсутствии данных гидрометрических наблюдений выполняется по следующему алгоритму:

1. по карте определяются местоположение изучаемой реки и площадь водосбора в замыкающем створе, а также гидрографические характеристики;

2. рассчитывается максимальный модуль стока дождевого паводка 10%-ной обеспеченности с использованием гидрографических характеристик водосбора;

3. осуществляется переход к максимальному модулю стока требуемой расчетной обеспеченности с помощью коэффициента  $\lambda_p'$  (табл. 3);

4. определяется слой стока за паводок 10%-ной обеспеченности по карте (рис. 3);

5. осуществляется переход от слоя стока 10%-ной обеспеченности к слою стока требуемой расчетной обеспеченности с помощью коэффициента  $\lambda_p''$  (табл. 4);

6. находится коэффициент несимметричности гидрографа дождевого паводка  $k_s$  (табл. 6);

7. в зависимости от коэффициента несимметричности гидрографа  $k_s$  по [5] определяются относительные абсциссы  $x$  и ординаты  $y$  расчетного гидрографа;

8. определяется коэффициент  $\mu$ , учитывающий неравенство параметров слоя стока и максимальных расходов воды дождевых паводков (табл. 5);

9. рассчитываются продолжительность подъема дождевого паводка  $t_{п}$  по формуле (10) и максимальный средний суточный расход воды дождевого паводка  $Q$ ;

10. по формулам (4) и (5) рассчитываются абсциссы и ординаты расчетного гидрографа;

11. по полученным значениям строится гидрограф дождевого паводка.

Сопоставление гидрографов дождевых паводков, построенных по предлагаемой методике и по

**Таблица 6.** Коэффициенты несимметричности гидрографов дождевых паводков рек Беларуси

Бассейн реки	Значения коэффициентов $k_s$
Западная Двина, Неман	0.29
Днепр, левобережные притоки Припяти, Западный Буг	0.31
Правобережные притоки Припяти	0.33

наблюдениям, показало их удовлетворительное соответствие.

### ВЫВОДЫ

Средняя продолжительность дождевых паводков на малых и средних реках Беларуси ~32, на больших ~50 сут. Наибольшая она в бассейне Припяти, наименьшая – в бассейнах Немана и Западного Буга.

Наиболее благоприятные условия для формирования дождевых паводков наблюдаются после весеннего снеготаяния. Летом, когда почва способна интенсивно поглощать воду, количество осадков, приводящих к формированию паводков, может достигать 150–200 мм. Осенью паводки формируются в результате выпадения частых обложных дождей в условиях уменьшения испарения. На реках Беларуси чаще отмечаются осенние или летние паводки. Причем, если до 1965 г. практически на всех реках страны преобладали осенние паводки, то после 1965 г. участились паводки в летний период.

Выполненные исследования позволили усовершенствовать существующую методику построения гидрографов дождевых паводков рек Беларуси при отсутствии данных гидрометрических наблюдений на реках, не прибегая к использованию рек-аналогов. Были уточнены и упрощены некоторые вычисления, повышена достоверность определения характеристик паводочного стока, использованы последние данные гидрометрических наблюдений за паводками. Для определения максимальных модулей стока дождевых паводков разработаны региональные математические модели, позволяющие определять

максимальные модули стока паводков с использованием гидрографических характеристик водосборов. Для определения слоя стока за паводок 10%-ной обеспеченности построена карта. Рассчитаны коэффициенты перехода к другим расчетным обеспеченностям. Предложена таблица коэффициентов несимметричности формы паводков, необходимых для определения абсциссы и ординаты расчетного гидрографа, а также коэффициента формы гидрографа. Данная методика дает приемлемые для практики результаты и может быть использована для решения ряда научных и практических задач.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бэфани Н.Ф., Калинин Г.П.* Упражнения и методические разработки по гидрологическим прогнозам. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 390 с.
2. *Волчек А.А.* Автоматизация гидрологических расчетов // Водохозяйственное строительство и охрана окружающей среды. Тр. междунар. науч.-практ. конф. по проблемам водохозяйственного, промышленного и гражданского строительства и экономико-социальных преобразований в условиях рыночных отношений. Брест: Изд-во Брестского политехнич. ин-та, 1998. С. 55–59.
3. *Волчек А.А., Шелест Т.А.* Влияние гидрографических факторов на величину дождевых паводков рек Беларуси // Мелиорация. 2010. Т. 63. № 1. С. 36–48.
4. *Лобанов В.А., Никитин В.Н.* Региональные модели определения характеристик максимального стока в зависимости от гидрографических факторов // Метеорология и гидрология. 2006. № 11. С. 60–69.
5. ТКП 45-3.04-168-2009(02250). Расчетные гидрологические характеристики. Порядок определения. Минск: Стройтехнорм, 2010. 55 с.