

МЕТОДЫ, МОДЕЛИ И ТЕХНОЛОГИИ METHODS, MODELS AND TECHNOLOGIES

УДК 630.375;525

DOI: 10.34753/HS.2021.3.1.59

ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ РАСЧЕТОВ МАКСИМАЛЬНОГО СТОКА МАЛЫХ РЕК

И.Н. Бельдиман

ООО НПО «Гидротехпроект», г. Валдай, Россия

irinabeldiman@gmail.com

Аннотация. Доля исследованных малых водотоков на территории Российской Федерации составляет 0,01% от их общего количества. В связи с этим, при проведении гидрологических расчетов для подавляющего большинства проектируемых сооружений, особенно линейных, изыскатель имеет дело с неизученными реками. Для проектирования и обеспечения безопасности при эксплуатации различных водохозяйственных и гидротехнических сооружений на водных объектах рекомендуется использовать Свод Правил СП 33-101-2003 и методические рекомендации по определению расчетных гидрологических характеристик при отсутствии данных гидрометрических наблюдений. Однако до настоящего времени полноценного анализа погрешности расчетов значений максимального стока заданной повторяемости по предлагаемым в Своде Правил методикам в сравнении с наблюдаемыми практически не проводилось. Предлагаемая работа восполняет этот пробел для ручьев (площади водосборов $<1 \text{ км}^2$) и малых рек (до $2\,000 \text{ км}^2$) лесной зоны Европейской части Российской Федерации. Перед расчетами проведен необходимый предварительный анализ исходных данных наблюдений на реках-аналогах с целью оценки качества исходной гидрометеорологической информации. Рассматривается расчет максимальных расходов воды ручьев и малых рек весеннего половодья с использованием редуцированной формулы. Максимальные срочные расходы воды дождевых паводков заданной вероятности рассчитывались по: редуцированной формуле типа I при наличии

ESTIMATION OF THE ERROR IN CALCULATING THE MAXIMUM FLOW OF SMALL RIVERS

Irina N. Beldiman

Scientific and Industrial Research Association

Gidrotehproekt, Valday, Russia

irinabeldiman@gmail.com

Abstract. The share of the studied small watercourses on the territory of the Russian Federation is 0.01% of their total number. In this regard, when conducting hydrological calculations for the vast majority of projected structures, especially linear ones, the surveyor deals with unexplored rivers. To design and ensure safety in the operation of various water management and hydraulic structures on water bodies, it is recommended to use the Set of Rules SP 33-101-2003 and methodological recommendations for determining the calculated hydrological characteristics in the absence of hydrometric observations. However, until now, a full-fledged analysis of the error in calculating the values of the maximum runoff of a given repeatability according to the methods proposed in the joint venture, in comparison with the observed ones, has not been carried out. The proposed work fills this gap for streams (catchment areas $<1 \text{ km}^2$) and small rivers (up to $2,000 \text{ km}^2$) in the forest zone of the European part of the Russian Federation. Before calculations, the necessary preliminary analysis of the initial observation data on the analogous rivers was carried out in order to assess the quality of the initial hydrometeorological information. The calculation of the maximum water flow rates of streams and small rivers of spring flood is considered using the reduction formula. The maximum urgent water flow rates of rain floods of a given probability were calculated using: the type I reduction formula in the presence of one or more analogous rivers; the type II calculation formula in the absence of analogous rivers; and the type III limit intensity formula. One of the calculation option is considered according to

одной или нескольких рек-аналогов; расчетной формуле типа II при отсутствии рек-аналогов; формуле предельной интенсивности типа III. При этом рассмотрен вариант расчета по формуле типа I при использовании различных рек-аналогов, удовлетворяющих требованиям свода Правил к таковым. В результате расчетов сделан вывод, что для ручьев и рек с площадью водосбора до 100 км², расхождение в величинах измеренного и рассчитанного 1% расхода весеннего половодья может достигать 300%, а дождевых паводков – 2 000%. Подобная погрешность ни в коем случае не может обеспечить безопасность при эксплуатации проектируемых сооружений.

Ключевые слова: малые реки; максимальный сток; расходы воды; весеннее половодье; дождевые паводки; погрешность расчетов

Введение

Целью данного исследования являлось выявление величины ошибок в расчетах расходов воды весеннего половодья и дождевых паводков, допускаемых при определении гидрографических характеристик по топографическим картам, на примере экспериментальных водосборов Валдайской воднобалансовой станции. Подобное сравнение особенно актуально при проведении расчетов для очень малых водотоков.

В расчетных створах, выбранных для проведения исследования, велись гидрометрические наблюдения, но для оценки точности результатов расчетов наибольших расходов воды различного происхождения, расчет выполнялся с использованием метода аналогии, в предположении, что рассматриваемые водотоки являлись гидрологически неизученными. В дальнейшем было выполнено сравнение полученных в результате данного расчета величин заданной вероятности превышения с величинами, полученными в результате анализа данных кривых распределения, аппроксимирующих ряды

the type I formula when using various analogues that meet the requirements of the joint venture for such. As a result of calculations, it is concluded that for streams and rivers with a catchment area of up to 100 km², the discrepancy in the values of the measured and calculated 1% of the spring flood flow rate can reach 300%, and rain floods – 2,000%. Such an error in any case can not ensure the safety of the operation of the designed structures.

Keywords: small rivers; maximum flow; water consumption; spring flood; rain floods; calculation error

данных наблюдений на постах в расчетных створах.

Объекты исследования и используемый картографический материал

В качестве объектов исследования (рисунок 1) использовались посты лог Усадьевский, лог Таежный, река Лонница (деревня Мосолино), река Полометь (деревня Дворец) и река Полометь (село Лычково), расположенные на территории Новгородской области в лесной зоне с площадями водосборов 0,36-2 180 км²; в качестве рек-аналогов: река Круппа (деревня Сутокский Рядок), река Пола (село Налючи).

В соответствии с требованиями Таблицы 7.1 свода Правил по определению расчетных гидрологических характеристик¹ (далее – СП 33-101-2003), для определения гидрографических характеристик водосборов с площадью менее 10 км² необходимо использовать карты масштаба 1:10 000, а для водосборов, площадью 10–50 км² – 1:25 000.

¹ СП 33-101-2003. Свод Правил по определению расчетных гидрологических характеристик. М.: Госстрой России, 2004. 73 с.

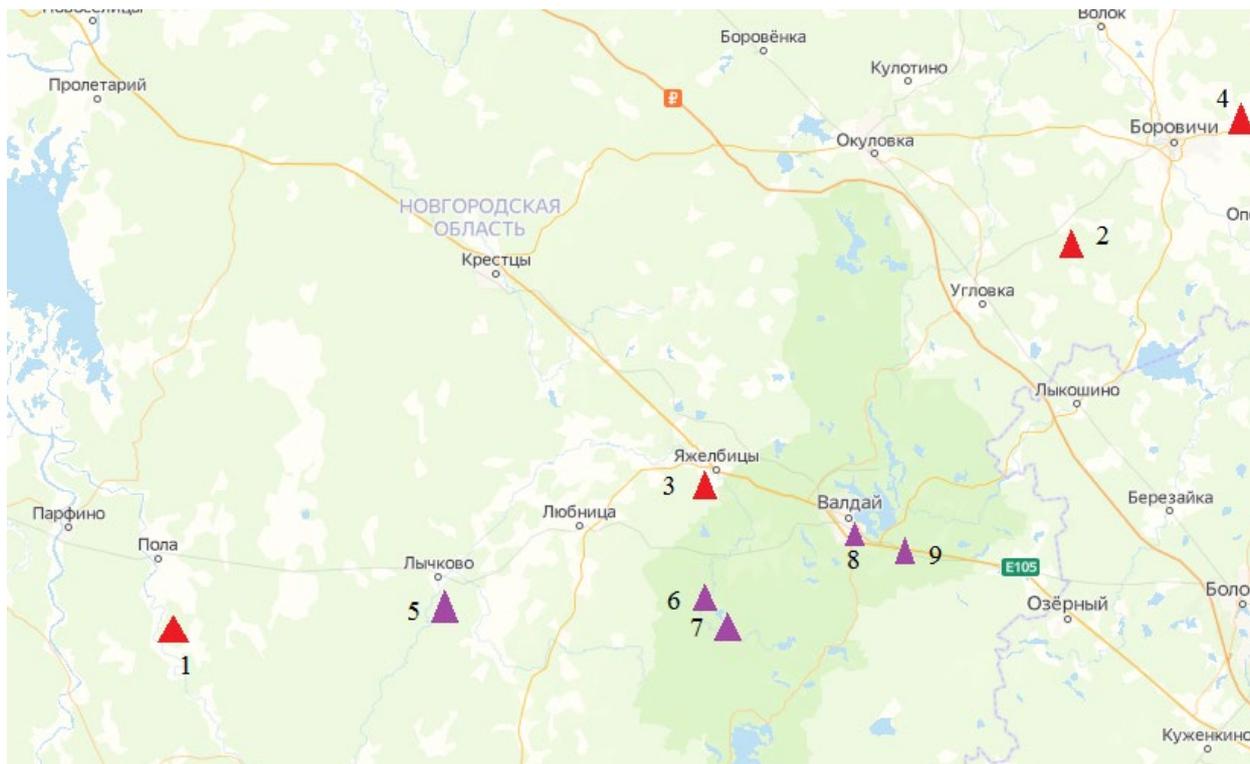


Рисунок 1. Реки-аналоги: 1 – река Пола (деревня Налючи), 2 – река Круппа (деревня Сутокский Рядок), 3 – река Полометь (село Яжелбицы), 4 – река Быстрица (деревня Новоселицы).

Исследуемые реки и ручьи: 5 – река Полометь (село Лычково), 6 – река Полометь (деревня Дворец), 7 – река Лонница (деревня Мосолино), 8 – лог Усадьевский, 9 – лог Таежный.

Figure 1. Analogous rivers: 1 – Pola River (Nalyuchi Village), 2 – Kruppa River (Sutoksky Ryadok Village), 3 – Polomet River (Yazhelbitsy Village), 4 – Bystritsa River (Novoselitsy Village).

The investigated rivers and streams: 5 – Polomet River (Lychkovo Village), 6 – Polomet River (Dvoretz Village), 7 – Lonnitsa River (Mosolino Village), 8 – log Usadievsky, 9 – log Tazhny.

В данной работе, для определения гидрографических характеристик были использованы топографические карты масштаба 1:50 000 и 1:100 000, а также спутниковые снимки Google как наиболее доступный, а временами – единственно доступный, картографический материал, которым может располагать изыскатель.

Используемый картографический материал мало пригоден для работы с объектами, площади водосборов которых составляют менее 0,5 км², как в определении границ водосбора (недостаточное количество высотных отметок), длины главного водотока и всей гидрографической сети, так и в определении среднего уклона водосборов и средневзвешенных уклонов русел, что особенно важно при расчетах наибольших расходов дождевых паводков.

В результате было принято решение выполнять расчеты с использованием гидрографических характеристик как определенных по имеющемуся картографическому материалу, так и по данным материалов Валдайской воднобалансовой станции.

Методика исследований

Расчет наибольших расходов воды весеннего половодья

Расчет максимальных расходов воды заданной вероятностью превышения $P = 1; 2; 5$ и 10% при наличии рек-аналогов выполнялся по редуцированной формуле (1), рекомендуемой в СП 33-101-2003:

$$Q_{P\%} = K_0 h_{P\%} \mu \delta \delta_1 \delta_2 A / (A_1 + A)^n \quad (1)$$

где K_0 – параметр, характеризующий дружность весеннего половодья;

$h_{P\%}$ – расчетный слой суммарного весеннего стока ежегодной вероятности превышения $P\%$ (без срезки грунтового питания), мм;

μ – коэффициент, учитывающий неравенство статистических параметров кривых распределения слоев стока и максимальных расходов воды;

$\delta, \delta_1, \delta_2$ – коэффициенты, учитывающие влияние водохранилищ, прудов и проточных озер (δ), залесенности (δ_1) и заболоченности речных водосборов (δ_2) на максимальные расходы воды;

A – площадь водосбора исследуемой реки до расчетного створа, км²;

A_1 – дополнительная площадь, учитывающая снижение интенсивности редукиции модуля

максимального стока с уменьшением площади водосбора, км²;

n – показатель степени редукиции.

Выбор рек-аналогов проводился с соблюдением требований, указанных в пункте 3.11 СП 33-101-2003.

В качестве аналога для расчетов максимальных расходов воды весеннего половодья в створах лог Усадьевский, лог Таежный, река Лонница (деревня Мосолино) использованы данные поста река Круппа (деревня Сутокский Рядок), а для створов река Полометь (деревня Дворец) и река Полометь (село Лычково) – река Пола (село Налючи). Гидрографические характеристики исследуемых водотоков, а также рек-аналогов приведены в таблице 1.

Таблица 1. Гидрографические характеристики расчетных водосборов и водосборов-аналогов.

Table 1. Hydrographic characteristics of calculated catchments and analogous catchments.

Название	Площадь водосбора, км ²	Длина главного водотока, км	Средневзвешенный уклон водотока, ‰	Средний уклон водосбора, ‰	Лесистость, %	Заболоченность, %	Озерность, %
лог Таежный	0,45	1,3	21,8	85	72	27	0
	0,37	0,8	21,8	68	90	0	0
лог Усадьевский	0,36	0,97	15,36	76	2	16	0
	0,42	1,51	15,36	35,5	20	5	0
река Лонница (деревня Мосолино)	48,3	18,6	3,39	38	66	29	<1
	48	18	3,39	38	86	13,7	<1
река Полометь (деревня Дворец)	432	39,1	—	—	58	40	2,33
	430	39,1	—	—	62	23	2,6
река Полометь (село Лычково)	2 180	112	—	—	65	30	0,93
	2 149	112	—	—	65	30	0,93
река Круппа (деревня Сутокский Рядок)	42,8	10	4,65	16,3	69	9	0
река Пола (деревня Налючи)	6 450	200	—	—	50	6	0

Примечание: здесь и далее в верхней строке приведены гидрографические характеристики по данным Валдайской воднобалансовой станции, в нижней – определенные с использованием картографического материала.

Таблица 2. Статистические параметры кривых распределения максимальных расходов воды (Q , м³/с) весеннего половодья.

Table 2. Statistical parameters of curves of distribution of maximum water flow rates (Q , m³/s) of spring flood.

Река-пункт	Среднее	Cv	Cs	Cs/Cv	Q _{1%}
река Круппа (деревня Сутокский Рядок)	7,33	0,41	1,5	3,49	17,4
река Пола (деревня Налючи)	486	0,25	0,09	0,34	779

Длина ряда наблюдений за наибольшими расходами воды весеннего половодья используемых в расчетах постов-аналогов составляет:

река Круппа (деревня Сутокский Рядок) – 28 лет,
река Пола (деревня Налючи) – 63 года.

Ряды подвергались проверке на стационарность и однородность и были признаны пригодными для использования в расчетах.

На первом этапе были определены параметры статистических кривых распределения максимальных расходов воды весеннего половодья. Аппроксимация ряда данных реки Круппы (деревня Сутокский Рядок) выполнялась кривой Крицкого-Менкеля (метод наибольшего правдоподобия); аппроксимация ряда данных реки Пола (деревня Налючи) выполнялась кривой Пирсона III типа. Статистические параметры кривых распределения наибольших расходов воды весеннего половодья приведены в таблице 2.

Средний многолетний слой стока весеннего половодья был определен по листу 6 Атласа расчетных гидрологических карт и номограмм² (далее – Атлас). Также на основании данных Атласа были определены коэффициент вариации Cv и значение отношения коэффициента асимметрии к коэффициенту вариации Cs/Cv.

В соответствии с рекомендациями Пособия по определению расчетных гидрологических характеристик³ (далее – Пособие) для водотоков с площадью водосбора 0–50 км² была введена поправка к значению коэффициента вариации Cv.

Слой стока половодья заданной вероятности превышения водотока реки-аналога

Круппа (деревня Сутокский Рядок) определялся с использованием ординат трехпараметрической кривой гамма-распределения, а реки-аналога Пола (деревня Налючи) – с использованием ординат биномиальной кривой распределения.

Коэффициенты, учитывающие влияние водохранилищ, прудов и проточных озер (δ) были приняты равными единице для всех водотоков.

Коэффициенты, учитывающие влияние залесенности (δ_1), были рассчитаны по формуле:

$$\delta_1 = \alpha / (f_L + 1)^{n'} \quad (2)$$

где n' – коэффициент редуции; принят для исследуемого района, относящегося к лесной зоне, равным 0,22;

α – параметр, учитывающий расположение леса на водосборе, принимается равным 1,0 как при равномерном расположении леса, так и при залесенности $f_L > 30\%$.

Коэффициенты, учитывающие влияние заболоченности речных водосборов (δ_2) на максимальные расходы воды, были рассчитаны по формуле:

$$\delta_2 = 1 - 0,7 \lg(0,1f_6 + 1) \quad (3)$$

где f_6 – заболоченность водосбора, %.

Далее по данным рек-аналогов обратным путем из формулы (1) рассчитывался параметр K_0 , значение которого получилось равным 0,0071 для створов лог Усадьевский, лог Таежный, река Лонница (деревня Мосолино) и 0,0152 для створов река Полометь (деревня Дворец) и река Полометь (село Лычково).

² Атлас расчетных гидрологических карт и номограмм / Приложение 1 к Пособию по определению расчетных гидрологических характеристик. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 25 отд. л. карт.

³ Пособие по определению расчетных гидрологических характеристик / Составители: А.В. Рождественский, В.Е. Водогрецкий, А. П. Копылов и др. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 448 с.

Таблица 3. Значения переходных коэффициентов μ , учитывающие неравенство статистических параметров кривых распределения слоев стока и максимальных расходов воды весеннего половодья.

Table 3. The values of the transition coefficients μ , taking into account the inequality of the statistical parameters of the distribution curves of runoff layers and the maximum water discharge of the spring flood.

P%	1%	2%	5%	10%
μ	1	0,99	0,96	0,93

Таблица 4. Результаты расчета наибольших расходов воды весеннего половодья.

Table 4. The results of calculating the highest water discharge in the spring flood.

Водоток	Q _{1%} , м ³ /с		Q _{2%} , м ³ /с		Q _{5%} , м ³ /с		Q _{10%} , м ³ /с	
	расчет	измер.	расчет	измер.	расчет	измер.	расчет	измер.
лог Таежный	0,142	0,114	0,131	0,101	0,106	0,085	0,089	0,065
	0,187		0,171		0,139		0,116	
лог Усадьевский	0,274	0,191	0,251	0,187	0,204	0,179	0,171	0,123
	0,255		0,234		0,190		0,159	
река Лонница (деревня Мосолино)	11,8	11,5	10,8	11	8,8	10,3	7,3	9,6
	13,9		12,8		10,4		8,7	
река Полометь (деревня Дворец)	154	84,3	144	79,3	123	73,4	108	58,2
	125		116		100		87,0	
река Полометь (село Лычково)	557	219	521	208	445	194	388	185
	550		515		439		384	

Для определения значений расчетных максимальных расходов воды весеннего половодья вероятности превышения 1, 2, 5 и 10% применительно к расчетным створам были использованы переходные коэффициенты μ , учитывающие неравенство статистических параметров кривых распределения слоев стока и максимальных расходов воды весеннего половодья. Значения переходных коэффициентов приведены в таблице 3.

Далее выполнен расчет наибольших расходов воды весеннего половодья заданной вероятностью превышения 1; 2; 5; 10%. Результаты сравнения расчетов по методикам, рекомендованным СП 33-101-2003, с измерениями, приведенными в материалах наблюдений Валдайского филиала ГУ «ГГИ» в базе данных для ВМО в 2000 году, приведены в таблице 4. Перевод рассчитанных значений в среднесуточные производился согласно Пособию.

Расчет наибольших расходов воды дождевых паводков

Расчет наибольших расходов воды дождевых паводков вероятностью превышения 1; 2; 5 и 10% для створов река Полометь (деревня Дворец) и река Полометь (село Лычково) выполнялся по эмпирической редуцированной формуле (4), рекомендованной в СП 33-101-2003 при отсутствии рек-аналогов и площади водосбора, для которого производится расчет, более 200 км²:

$$Q_{p\%} = q_{200}(200/A)^n \delta \delta_2 \delta_3 \lambda_{p\%} A \quad (4)$$

где q_{200} – модуль максимального срочного расхода воды ежегодной вероятности превышения $P=1\%$, приведенный к условной площади водосбора, равной 200 км², определяемый по листу 12 Атласа и равный 0,2 при $\delta = \delta_3 = 1,0$;

δ_3 – поправочный коэффициент, учитывающий изменение параметра q_{200} с увеличением средней высоты водосбора в горных районах;

n – степенной коэффициент, отражающий редуцицию максимального модуля стока

дождевого паводка значение которого определяется по листу 10 Атласа и составляет 0,3; $\lambda_{p\%}$ – переходный коэффициент от максимальных срочных расходов воды ежегодной вероятностью превышения $P=1\%$ к значениям другой вероятности превышения.

Вычисленные по формуле (4) значения расходов представлены в таблице 5.

В соответствии с приложением Б таблицы 7 СП 33-101-2003 для расчета максимальных расходов дождевых паводков для водосборов с площадью менее 200 км², каковыми являются рассматриваемые объекты лог Усадьевский, лог Таежный, река Лонница (деревня Мосолино), должна быть применена формула предельной интенсивности стока

$$Q_{p\%} = q'_{1\%} \varphi H_{1\%} \delta \lambda_{p\%} A \quad (5)$$

где $q'_{1\%}$ – относительный модуль максимального срочного расхода воды ежегодной вероятности превышения $P=1\%$, представляющий отношение $q'_{1\%} = q_{1\%} / \varphi H_{1\%}$, определяется для исследуемого района в зависимости от гидроморфометрической характеристики русла Φ_p и продолжительности склонового добега $\tau_{ск}$ (мин.);

φ – сборный коэффициент стока;

$H_{1\%}$ – максимальный суточный слой осадков вероятности превышения $P=1\%$, мм.

В рамках проводимого исследования было принято решение произвести расчет наибольших

расходов воды дождевых паводков как с применением метода аналогии, так и в предположении, что водоток-аналог подобрать не удалось.

Расчет расходов дождевых паводков при отсутствии рек-аналогов

Расчет состоит из нескольких этапов для определения параметров формулы (5).

На первом этапе выполняется расчет сборного коэффициента стока φ . Для неизученного водотока в условиях отсутствия реки-аналога формула для расчета данного коэффициента имеет вид:

$$\varphi = \frac{c_2}{(A+1)^{n_3}} \varphi_0 \left(\frac{I_{ск}}{50}\right)^{n_2} \quad (6)$$

где c_2 – параметр, принимаемый для водотоков лесной зоны равный 1,2 в соответствии с требованиями СП 33-101-2003 и Пособия;

$I_{ск}$ – средний уклон склонов водосбора;

φ_0 и n_2 – параметры, значения которых приняты по таблице 11 приложения 2 Пособия и изменялись в диапазонах 0,38–0,56 и 0,5–0,65 соответственно;

n_3 – показатель степени, принятый равным 0,11.

Для рассматриваемого района значение $H_{1\%} = 120$ мм, соответствующее картированному в Атласе. Исследуемые водотоки находятся в области применения кривой редукции интенсивности дождевых осадков 3 типа.

Таблица 5. Максимальные расходы дождевых паводков заданной обеспеченности.

Table 5. The maximum guaranteed discharge of rainfall floods.

Створ	А, км ²	Q, м ³ /с, обеспеченностью			
		1%	2%	5%	10%
река Полометь (деревня Дворец)	432	162	151	129	113
	430	131	122	105	91,3
река Полометь (село Лычково)	2180	557	521	445	388
	2149	550	515	439	384

Таблица 6. Результаты вычисления значений параметров формулы (5) и значений максимальных расходов дождевых паводков $Q_{p\%}$ (m^3/c) в исследуемых створах.

Table 6. The results of calculating the values of the parameters of formula (5) and the values of the maximum flow rates of rain floods $Q_{p\%}$ (m^3/s) in the investigated sections.

Название водотока	А, км ²	φ	Фр	τск	φ*Н1%	q'1%	Q, м ³ /с, обеспеченностью			
							1%	2%	5%	10%
лог Таежный	0,45	0,627	18	60	75,3	0,071	2,42	1,98	1,16	0,78
	0,37	0,545	12	100	65,4	0,101	2,44	2,00	1,17	0,78
лог Усадьевский	0,36	0,586	16	60	70,3	0,114	2,88	2,36	1,38	0,92
	0,42	0,356	27	60	42,7	0,075	1,35	1,11	0,65	0,43
река Лонница (деревня Мосолино)	48,3	0,356	167	60	42,7	0,016	33,1	27,1	19,4	15,0
	48	0,356	162	100	42,7	0,016	32,0	26,3	18,8	14,6

На втором этапе была рассчитана гидроморфометрическая характеристика русла водотока Φ_p по формуле:

$$\Phi_p = 1000L/[m_p(I_p)^m A^{0,25}(\varphi H_{1\%})^{0,25}] \quad (7)$$

где L – длина главного водотока, км;

I_p – средневзвешенный уклон главного водотока, значения которого приведены в таблице 1;

m_p и m – параметры, значения которых определены согласно Таблицы 8 Приложения Б Пособия в зависимости от I_p и состояния водотока. Для дальнейшего расчета приняты значения $m_p = 11$ и $m = 1/3$.

В соответствии с рекомендациями СП 33-101-2003 и Пособия время склонового добегания $\tau_{ск}$ было принято равным 60 минутам для водосборов, заболоченность которых составляет менее 20%, и 100 минутам для водосборов, заболоченность которых изменяется в диапазоне 20–40%.

На основании вышесказанного на третьем этапе по Таблице 9 Приложения 2 Пособия по принятому времени склонового добегания в зависимости от величины гидроморфометрической характеристики русла (Φ_p) был определен относительный модуль максимального срочного расхода воды ежегодной вероятности превышения $P=1\%$ ($q'_{1\%}$), после чего был произведен расчет наибольших расходов воды дождевых паводков заданной вероятности превышения.

Результаты вычислений названных основных параметров, используемых при расчете дождевых паводков, а также результаты расчетов максимальных расходов воды дождевых паводков для исследуемых водотоков приведены в Таблице 6.

Расчет расходов дождевых паводков при наличии рек-аналогов

Далее рассмотрим вариант расчета наибольших расходов воды дождевых паводков заданной вероятностью превышения при наличии реки-аналога.

Согласно рекомендаций СП 33-101-2003 при выборе реки-аналога должны соблюдаться следующие условия:

- однотипность стока реки-аналога и исследуемой реки;
- географическая близость расположения водосборов;
- однородность условий формирования стока, сходство климатических условий, однотипность почв (грунтов) и гидрогеологических условий, близкая степень озерности, залесенности, заболоченности и распаханности водосборов;
- средние высоты водосборов не должны существенно отличаться;
- отсутствие факторов, существенно искажающих естественный речной сток (регулирование стока, сбросы воды, изъятие стока на орошение и другие нужды).

Основным количественным показателем выбора реки-аналога, согласно нормативных документов (СП 33-101-2003 и Пособие), является приблизительное равенство (9) коэффициентов формы водосбора (K_ϕ) исследуемой реки и реки-аналога.

$$K_\phi = L/A^{0,56} \quad (8)$$

$$L/A^{0,56} \approx L_a/A_a^{0,56} \quad (9)$$

где индекс «а» означает принадлежность к реке-аналогу.

В качестве реки-аналога была выбрана река Круппа (деревня Сутокский Рядок), коэффициент формы водосбора которой составляет 1,22, а коэффициенты формы водосборов исследуемых водотоков изменяются в диапазоне 1,40-2,45.

Необходимо отметить, что, несмотря на относительно небольшие различия коэффициентов формы исследуемых водотоков и водотока-аналога, а также схожесть условий, перечисленных выше, выбранная река-аналог не может считаться таковой в полной мере для всех исследуемых объектов в первую очередь ввиду значительной разницы в площади водосборов. Тем не менее в ходе выполнения инженерных изысканий, ввиду практически полного отсутствия постов на очень малых водотоках, приходится использовать в качестве аналогов более крупные изученные реки, поэтому река Круппа (деревня Сутокский Рядок) была использована в качестве аналога для расчета наибольших расходов воды дождевых паводков на рассматриваемых объектах лог Усадьевский, лог Таежный, река Лонница (деревня Мосолино).

Так же как и в случае расчета, выполняемого при отсутствии реки-аналога, расчет с использованием данных наблюдений выполнялся в несколько этапов.

На первом этапе была построена кривая распределения наибольших расходов воды

дождевых паводков реки-аналога Круппа (деревня Сутокский Рядок) и определены ее статистические параметры. Аппроксимация данных наблюдений была выполнена кривой Пирсона III типа, ее статистические параметры представлены в Таблице 7.

Сборный коэффициент стока ϕ для водосбора реки-аналога определялся согласно рекомендаций СП 33-101-2003 и Пособия по формуле:

$$\phi = \frac{q_{1\%a}}{16,67\bar{\psi}(\tau_6)\delta H_{1\%}} \quad (10)$$

где $q_{1\%a}$ – модуль максимального срочного расхода воды реки-аналога ежегодной вероятности превышения $P=1\%$, $\text{м}^3/\text{с}\cdot\text{км}^2$; $16,67\bar{\psi}(\tau_6)$ – значения ординат районной кривой редукции осадков при $\tau_6 \leq 1440$ мин.

Продолжительность бассейнового добега τ_6 определяли по формуле:

$$\tau_6 = 1,2\tau_p^{1,1} + \tau_{\text{СК}} \quad (11)$$

Продолжительность руслового времени добега τ_p определялась по формуле:

$$\tau_p = 1000L/(m_p I_p^m A^{0,25} q_{1\%}^{0,25}) \quad (12)$$

Продолжительность склонового времени добега $\tau_{\text{СК}}$, как и в случае отсутствия реки-аналога, принималась равной 60 минутам, согласно рекомендаций Пособия для водосборов, заболоченность которых не превышает 20%.

По полученной величине продолжительности бассейнового времени добега, которая составила 670 минут, с использованием Таблицы 10 Приложения 2 Пособия было найдено значение ординаты районной кривой редукции осадков $16,67\bar{\psi}(\tau_6)$, которое составило 0,0236, и далее было использовано в расчетах сборного коэффициента стока ϕ , величина которого получилась равной 0,1071.

Таблица 7. Статистические параметры кривой распределения максимальных расходов воды (Q , $\text{м}^3/\text{с}$) дождевых паводков.

Table 7. Statistical parameters the curve distribution of maximum water discharge (Q , m^3/s) of rainfall floods.

Река-пункт	Средн.	Cv	Cs	Cs/Cv	Q _{1%}
река Круппа (деревня Сутокский Рядок)	3,71	0,75	1,51	2,0	13,0

Далее, согласно рекомендаций СП 33-101-2003 и Пособия, необходимо выполнить уточнение продолжительности склонового времени добегания. Уточнение величины $\tau_{ск}$ рекомендуется выполнять по Таблице 12 Приложения 2 Пособия в зависимости от величины гидроморфометрической характеристики склонов $\Phi_{ск}$, которая в свою очередь рассчитывается по формуле:

$$\Phi_{ск} = (1000L_{ск})^{0,5} / [m_{ск}(I_{ск})^{0,25}(\varphi H_{1\%})^{0,5}] \quad (13)$$

где $L_{ск}$ – средняя длина безрусловых склонов водосбора, определяемая в зависимости от густоты речной и овражно-балочной сети ρ_p согласно выражения $L_{ск} = 1/(1,8\rho_p)$. Густота овражно-балочной сети была принята равной 1 км/км^2 ;

$m_{ск}$ – параметр, значение которого с учетом состояния водосбора принято равным $0,25$.

В результате расчета, выполненного по формуле (13), величина $\Phi_{ск}$ получилась равной 13 , что выходит за рамки таблицы 12 Пособия, но в результате построения зависимости величины $\tau_{ск}(\Phi_{ск})$ для величин $\Phi_{ск} > 12$ (методика построения описана в Пособии) было установлено, что полученной величине гидроморфометрической характеристики склонов соответствует величина продолжительности склонового добегания равная 240 минутам. В итоге мы видим значительное расхождение величины $\tau_{ск}$, принятой ориентировочно и полученной в результате уточнения. В этом

случае согласно требований СП 33-101-2003 и Пособия необходимо произвести повторный расчет величины бассейнового времени добегания с использованием величины $\tau_{ск}$ равной 240 минутам.

При повторном расчете величина τ_6 стала равна 850 минутам, ординаты районной кривой редукции осадков $16,67\bar{\psi}(\tau_6) = 0,022$, сборный коэффициент стока $\varphi = 0,115$, а $\Phi_{ск} = 12,6$, что соответствует $\tau_{ск}$, равной 200 минутам, что незначительно отличается от величины, принятой ориентировочно при повторном расчете.

На втором этапе согласно рекомендаций СП 33-101-2003 и Пособия с использованием вычисленного значения $16,67\bar{\psi}(\tau_6)$ был определен сборный коэффициент стока φ для расчетных створов при наличии реки-аналога по формуле:

$$\varphi = \frac{q_{1\%a}}{16,67\bar{\psi}(\tau_6)\delta H_{1\%}} (I_{ск}/I_{ск,a})^{n_2} [(A_a + 1)/(A + 1)]^{n_3} \quad (14)$$

где n_2 – степенной коэффициент, согласно рекомендаций Пособия принят равным $0,65$;

n_3 – степенной коэффициент, который для лесотундры и лесной зоны принимается равным $0,07$.

Вычисление гидроморфометрической характеристики русла Φ_p и все последующие вычисления выполнялись в той же последовательности и с использованием тех же формул, что и в случае отсутствия реки-аналога.

Таблица 8. Результаты расчета при определении максимальных расходов воды дождевого паводка рассматриваемых водотоков.

Table 8. Calculation results when determining the maximum water discharge of rainfall flood of the considered watercourses.

Водоток	Сборный коэффициент стока φ	Φ_p	$q'_{1\%}$	Q, м ³ /с, обеспеченностью			
				1%	2%	5%	10%
лог Таежный	0,427	19	0,049	1,12	0,92	0,54	0,36
	0,371	13	0,052	0,85	0,70	0,41	0,27
лог Усадьевский	0,399	17	0,050	0,85	0,70	0,41	0,27
	0,243	30	0,042	0,51	0,42	0,25	0,16
река Лонница (деревня Мосолино)	0,174	200	0,012	12,12	9,94	7,10	5,52
	0,174	194	0,012	12,05	9,88	7,05	5,47

Таблица 9. Результаты расчета при определении максимальных расходов воды дождевого паводка рассматриваемых водотоков с использованием рекомендованных для наших условий величин $\tau_{ск}$.

Table 9. The calculation results when determining the maximum water discharge of a rainfall flood of the considered watercourses using the values recommended for our conditions $\tau_{ск}$.

Водоток	Сборный коэффициент стока ϕ	Φ_p	$q'_{1\%}$	Q, м ³ /с, обеспеченностью			
				1%	2%	5%	10%
лог Таежный	0,398	20	0,068	1,46	1,20	0,70	0,47
	0,346	13	0,110	1,69	1,39	0,81	0,54
лог Усадьевский	0,372	18	0,094	1,52	1,24	0,73	0,49
	0,226	30	0,070	0,80	0,65	0,38	0,26
река Лонница (деревня Мосолино)	0,162	203	0,013	12,23	10,03	7,17	5,57
	0,162	197	0,013	12,16	9,97	7,12	5,52

Результаты вычислений названных основных параметров, используемых при расчете дождевых паводков, и полученные значения максимальных расходов заданной обеспеченности приведены в таблице 8.

Стоит отметить, что выполняемые уточнения продолжительности склонового времени добега $\tau_{ск}$, в действительности представляют собой лишь видимость уточнения. Приемы, предлагаемые нормативными документами СП 33-101-2003 и Пособия, рассчитаны на очень точное определение гидрографических характеристик водосборов как исследуемых водотоков, так и водотоков-аналогов, чего можно добиться лишь с использованием достоверного крупномасштабного картографического материала, что в изыскательской практике в большинстве случаев крайне маловероятно, а обычно используемые картографические материалы способствуют лишь занижению конечного результата путем внесения дополнительной погрешности в величины различных гидрографических характеристик. Поэтому в таблице 9 приведены результаты расчетов, выполненных с использованием тех же данных реки-аналога Круппа (деревня Сутокский Рядок), но полученных с использованием рекомендованных для наших условий величин $\tau_{ск}$, соответствующих, в зависимости от заболоченности водосборов, 60-100 минутам без каких-либо уточнений.

Сравнительные результаты расчетов и измерений заданной обеспеченности, приведены в таблице 10 (ливневые паводки). Перевод рассчитанных значений в среднесуточные производился согласно Пособию.

Для сравнения влияния выбора того или иного аналога расчет половодья проведен с использованием в качестве рек-аналогов реки Полометь (село Яжелбицы) и Быстрица (деревня Новоселицы) (таблицы 11, 12).

Анализ результатов и выводы

В результате получены следующие значения максимальных расходов воды весеннего половодья (таблица 13) и дождевых паводков (таблица 14).

В соответствии с приводимыми в указанных таблицах величинами, для ручьев и рек с площадью водосбора до 100 км², расхождение в величинах измеренного и рассчитанного 1% расхода весеннего половодья может достигать 300%, а дождевых паводков – 2 000%.

На основании вышеизложенного, можно сделать следующие выводы:

1. Определение гидрографических характеристик водосборов носит достаточно субъективный характер и сильно зависит от исходного картографического материала. В зависимости от этого полученные в результате расчетов обеспеченные значения стока могут различаться в разы, причем чем меньше рассматриваемый водосбор, тем большая может быть результирующая ошибка.

Таблица 10. Сравнение результатов расчета среднесуточных максимальных расходов воды дождевых паводков с соответствующими измеренными расходами заданной обеспеченности.

Table 10. Comparison of the results of calculating the average daily maximum water flow rate of rain floods with the corresponding measured flow rates of a given supply.

Водоток	Q _{10%} , м ³ /с			Q _{10%} , м ³ /с		
	расчет		измер.	расчет		измер.
	τ _{ск} расчетное	τ _{ск} принятое		τ _{ск} расчетное	τ _{ск} принятое	
лог Таежный	0,657	0,857	0,082	0,211	0,241	0,053
	0,500	0,994		0,159	0,318	
лог Усадьевский	0,500	0,894	0,151	0,159	0,288	0,073
	0,30	0,47		0,094	0,153	
река Лонница (деревня Мосолино)	10,1	10,2	10,9	4,59	4,63	5,34
	10,0	10,1		4,55	4,59	
река Полометь (деревня Дворец)	39,1	39,1	68	27,0	27,0	34,8
	32,6	32,6		22,5	22,5	
река Полометь (село Лычково)	128	128	150	88,2	88,2	95,8
	126	126		87,3	87,3	

Таблица 11. Гидрографические характеристики.

Table 11. Hydrographic characteristics.

Название	Площадь водосбора, км ²	Длина главного водотока, км	Лесистость, %	Заболоченность, %	Озерность, %
река Полометь (село Яжелбицы)	631	57,9	60	22	2,8
река Быстрица (деревня Новоселицы)	40,4	10,0	80	39	-

Таблица 12. Статистические параметры кривой распределения максимальных срочных расходов воды (Q, м³/с) весеннего половодья.

Table 12. Statistical parameters of curves of distribution of maximum water flow rates (Q, m³/s) of spring flood.

Река-пункт	Средн.	Cv	Cs	Cs/Cv	Q _{1%}	Q _{2%}	Q _{5%}	Q _{10%}
река Полометь (село Яжелбицы)	60,2	0,31	1,39	4,50	121	110	96,5	85,1
река Быстрица (деревня Новоселицы)	6,23	0,42	0,84	2,0	13,9	12,6	11,1	9,78

Таблица 13. Сравнительные значения максимальных расходов воды весеннего половодья, полученные с использованием различных аналогов.

Table 13. Comparative values of the maximum flow rates of spring flood, obtained using various analogs.

Створ	А, км ²	Q _{1%} , м ³ /с, рассчитанный по реке-аналогу			Q _{1%} , м ³ /с эмпирический
		Крупна (Сутокский Рядок)	Полометь (Яжелбицы)	Быстрица (Новоселицы)	
лог Таежный	0,45	0,142	0,217	0,112	0,114
	0,37	0,187	0,285	0,147	
лог Усадьевский	0,36	0,274	0,418	0,211	0,191
	0,42	0,255	0,389	0,196	
река Лонница (деревня Мосолино)	48,3	11,8	12,7	12,5	11,5
	48	13,9	15	14,7	
река Полометь (деревня Дворец)	432	154	86	79	84,3
	430	125	70	64	
река Полометь (село Лычково)	2180	557	298	275	219
	2149	550	294	271	

Таблица 14. Сравнительные значения максимальных расходов воды дождевого паводка, полученные различными способами и сравнение с наблюдаемой величиной.

Table 14. Comparative values of maximum rain flood water discharge obtained by various methods and comparison with the observed value.

Название водотока	Q, м ³ /с, обеспеченностью Р%							
	при отсутствии аналога по формуле (5)		по реке-аналогу Крупна (Сутокский Рядок)				измеренное	
	1%	10%	τ _{ск} =240 мин		τ _{ск} =60 (100) мин			
			1%	10%	1%	5%	1%	10%
лог Таежный	2,42	0,78	1,12	0,36	1,46	0,47	0,082	0,053
	2,44	0,78	0,85	0,27	1,69	0,54		
лог Усадьевский	2,88	0,92	0,85	0,27	1,52	0,49	0,151	0,073
	1,35	0,43	0,51	0,16	0,80	0,26		
река Лонница (деревня Мосолино)	33,1	15,0	12,12	5,52	12,23	5,57	10,9	5,34
	32,0	14,6	12,05	5,47	12,16	5,52		

2. Принятое по тем или иным соображениям в расчетах время продолжительности склонового добега $\tau_{ск}$, оказывает достаточно заметное влияние на результат расчетов (для небольших водосборов в 2 раза).

3. Даже при достаточной длине рядов наблюдений (лог Таежный и лог Усадьевский – более 70 лет, река Полометь (деревня Дворец) – более 40 лет), расхождение в величинах измеренного и рассчитанного 1% расхода весеннего половодья может достигать 300%, а дождевых паводков – 2 000%. При увеличении

площади водосбора до нескольких сотен км², ошибка в расчетах максимальных расходов дождевых паводков уменьшается до приемлемой (до 20%), весеннего половодья сохраняется до 100%.

4. В зависимости от принятой реки-аналога погрешность расчетов может варьировать от 10 до 100% в зависимости от размеров реки.

5. Необходим подобный анализ достоверности расчетных методов нового поколения (методов математического моделирования процессов формирования стока) с целью рассмотрения вопроса о замене существующей нормативной базы.