

МАКСИМАЛЬНЫЙ СТОК ДОЖДЕВЫХ ПАВОДКОВ РЕК ГОРНОГО КРЫМА

В статье приводится краткий анализ состояния вопроса в области расчетов максимального стока на территории Горного Крыма. На современных исходных данных уточнена региональная методика для расчета максимального стока дождевых паводков.

Ключевые слова: *максимальный сток, дождевые паводки, максимальный модуль стока.*

Введение. Горный Крым занимает южную часть Крымского полуострова. Горы тянутся вдоль берега Черного моря на 150-160 км от Севастополя на западе до Феодосии - на востоке. Согласно классификации приведенной в [1], реки данной территории можно разделить на следующие группы:

- *Реки западной части северного склона.* В эту группу входят самые значительные по протяженности и водности реки полуострова (с севера на юг) – Альма, Кача, Бельбек и Чёрная. Их общая длина составляет 701 км. Истоки рек находятся на северо-западных склонах Главной гряды Крымских гор, затем они текут с востока на запад почти параллельно друг другу. Примерно до середины своего течения имеют характер, типичный для горных потоков.

- *Реки восточной части северного склона,* которые берут начало на северо-восточных склонах главной гряды Крымских гор. Они пересекают продольную долину, внутреннюю гряду и выходят на степную равнину, после чего впадают в залив Азовского моря - Восточный Сиваш. Следует отметить, что водность рек по направлению к устью значительно уменьшается, и они часто теряются на равнине.

- *Реки Южного берега Крыма,* где протекают самые короткие реки рассматриваемой территории. Длины рек в основном не превышают 10 км. Самая протяжённая река Южного побережья - Таракташ, протекающая через город Судак, имеет длину 22 км. Невелики и водосборные площади этих рек, составляющие 20-50 км² в западной части и 75-100 км² - в восточной части Южного берега Крыма [1].

Водный режим рек Горного Крыма в связи с его сравнительно небольшой высотой характеризуется в целом довольно однообразными гидрологическими условиями. На него в первую очередь оказывает влияние наличие трещиноватых известняков, регулирующих поверхностный и подземный сток. Кроме того, одной из особенностей рек Крыма является резкая деформация их русел. И наконец, естественный режим большинства рек искажается регулирующим влиянием искусственных водоемов, а также забором воды на орошение. В связи с этим отмечаются различия в водном режиме для разных водотоков и даже по длине одной и той же реки.

Максимальные расходы рек района формируются в летне-осенний период в результате прохождения ливней. За многолетний период максимальные расходы воды для большинства рек наблюдаются в теплый период и для некоторых из них могут превышать зимне-весенние максимумы в 2-4 раза (реки Бельбек, Демерджи, Зуя и др.). Для рек территории характерно уменьшение максимальных расходов воды при выходе из гор и предгорий к устью, что объясняется, помимо естественной трансформации паводков на бесприточных участках, потерями воды в карст, забором на орошение и заполнение прудов и водохранилищ. Наибольшие годовые суммы осадков имеют место на вершинах Главной гряды Крымских гор – яйлах; однако наличие закарстованных известняков обуславливает отсутствие продолжительного поверхностного стока. Область максимального стока располагается в зоне, где благоприятные для формирования речного стока гидрометеорологические условия усиливаются наибольшим выходом грунтовых (карстовых) вод [1].

Материалы исследования. Для характеристики максимального стока дождевых паводков на реках Горного Крыма использованы материалы режимных изданий за многолетний период наблюдений (от начала наблюдений по 2010 включительно) по 43 водосборам. Диапазон изменения площадей - от 2,46 до 3540 км², средние высоты водосборов колеблются в диапазоне от 340 до 980 м. Максимальная продолжительность наблюдений – 82 года.

Современное состояние вопроса в области расчета характеристик максимального стока паводков. Широкое распространение в расчетной практике максимального стока дождевых паводков нашли формулы редуционного типа [2]. На их основе построены рекомендации СНиП 2.01.14-83 [2]. В частности, для водосборов с площадью больше 200 км² рекомендуется формула вида:

$$Q_{p\%} = q_{200} (200 / F)^n \delta \delta_2 \delta_3 \lambda_{p\%} F, \quad (1)$$

где q_{200} - модуль максимального мгновенного расхода воды ежегодной вероятности превышения $P=1\%$ при $\delta = \delta_2 = \delta_3 = 1$, приведенный к условной площади водосбора, равной 200 км²; n - показатель редукиции модуля максимального мгновенного расхода воды с увеличением площади водосбора F ; $\lambda_{p\%}$ - переходный коэффициент от максимальных мгновенных расходов воды ежегодной вероятности превышения $P=1\%$ к максимальным расходам воды других вероятностей превышения; δ, δ_2 - коэффициенты, учитывающие снижения максимальных расходов под влиянием заболоченности и водоемов проточного типа. Степенной показатель n – районирован, а множитель δ_3 , учитывающий изменение параметра q_{200} с высотой водосбора в горных районах, определяется по данным гидрологически изученных рек.

При наличии рек- аналогов расчёт $Q_{p\%}$ производится по формуле:

$$Q_{p\%} = q_{p\%a} \frac{\delta \delta_2}{\delta_a \delta_{2a}} \left(\frac{F_a}{F}\right)^n F, \quad (2)$$

где δ, δ_2 и δ_a, δ_{2a} - коэффициенты, соответственно для исследуемой реки и реки-аналога. Область применения формулы (2) ограничена условием

$$K_{\phi} \leq 1,5 K_{\phi.a} \quad (3)$$

Коэффициенты формы водосборов исследуемой реки K_{ϕ} и аналога $K_{\phi.a}$ вычисляются по соотношениям:

$$K_{\phi} = L / F^{0.56}; K_{\phi.a} = L_a / F_a^{0.56}, \quad (4)$$

где L и L_a – длины исследуемой реки и аналога от наиболее удаленных точек на водосборах с площадями F и F_a .

Для рек с площадями водосборов меньше 200 км² нормативным документом рекомендуется максимальные мгновенные расходы воды рек дождевых паводков $Q_{p\%}$ (м³/с) определять по формуле предельной интенсивности:

$$Q_{p\%} = A_{1\%} \phi H'_{1\%} \delta \lambda_{p\%} F, \quad (5)$$

где $A_{1\%}$ - максимальный модуль стока ежегодной вероятностью превышения P , равной 1%, выраженный в долях произведения $\phi H'_{1\%}$ при $\delta = 1$; $H'_{1\%}$ - максимальный суточный слой осадков вероятностью превышения P , равной 1%; ϕ - сборный коэффициент стока.

Авторами данной работы в ряде публикаций проведен подробный анализ формул СНиП 2.01.14 - 83 [3,4]. Не останавливаясь на теоретических недостатках формул нормативного документа, отметим лишь следующие:

- При обосновании расчетных характеристик максимального стока рек использованы данные по 1976 г., которые, несомненно, нуждаются в уточнении на современном этапе.
- Применение формулы (1) вызывает чисто практические трудности - в таблице, рекомендуемой СНиП 2.01.14 - 83 для определения коэффициента редукиции n для горных территорий, отсутствует регион Горного Крыма. Та же ситуация и для δ_3 – коэффициента учитывающий изменение параметра q_{200} с изменением средней высоты водосбора в горных районах.
- При использовании формулы (5) возникают сложности, связанные с определением сборного коэффициента стока φ . Также как и в предыдущем случае, параметры рассматриваемого региона отсутствуют в ряде вспомогательных таблиц.

Что касается региональных методик, то в монографии «Ресурсы поверхностных вод» [1] обобщение материалов по максимальному стоку и рекомендации по его расчету для неизученных рек горных и предгорных районов произведено для трех групп рек, в зависимости от экспозиции склонов Крымского хребта: реки западной части северного склона; реки Южного берега; реки восточной части северного склона [1].

В основу обобщения положена редукиционная формула вида:

$$q_m = \frac{q'_{1\%}}{(F + b)^n}, \quad (6)$$

где q_m - максимальный модуль стока, м³/(с·км²); $q'_{1\%}$ - максимальный модуль склонового притока, м³/(с·км²); F - площадь водосбора, км²; b - параметр, характеризующий затухание редукиции модуля стока в зоне малых площадей; n - показатель степени редукиции.

Значения расчетных параметров, в зависимости от района, представлены в табл.1

Таблица 1 - Параметры расчетной формулы максимального стока паводков теплого периода для рек Горного Крыма [1]

Район Горного Крыма	Максимальный модуль склонового притока $q'_{1\%}$, м ³ /(с·км ²)	Показатель степени редукиции, n
Западная часть северного склона	8,0	0,5
Восточная часть северного склона	7,6	0,6
Южный берег Крыма	66,0	1,13

Авторами произведен расчет по формуле (6) и оценена точность полученных максимальных модулей 1%-ой обеспеченности по отношению к данным статистической обработки по 2010, включительно (табл.2).

Таблица 2 – Оценка точности расчета по формуле (6)

Район Горного Крыма	Среднее отклонение
Западная часть северного склона	±58,1 %
Восточная часть северного склона	±57,2 %
Южный берег Крыма	±110,8 %

Анализируя данные табл.2, можно прийти к выводу, что параметры формулы (6) нуждаются в существенном уточнении, а для Южного берега Крыма вообще не применимы.

Еще одна расчетная схема максимального стока в свое время была предложена П.Ф.Вишневым [5]:

$$Q_m = 1,67 F h_m \varphi n r r_1 k_1 \lambda, \quad (7)$$

где 1,67-коэффициент, представляющий собой величину максимального ливневого расхода с площади 1 км² при высоте слоя ливневой водоотдачи 1 мм за интервал в 10 мин; h_m - максимальная водоотдача ливневого стока; φ - коэффициент редукции модуля максимального стока, n - коэффициент, учитывающий влияние лесистости и заболоченности водосборов на максимальный расход воды; r - коэффициент, учитывающий влияние искусственной зарегулированности максимального расхода прудами и водохранилищами; r_1 - коэффициент учета естественного зарегулирования максимального расхода воды широкими заболоченными поймами; k_1 - коэффициент, учитывающий неполноту и неодновременность орошения ливневой тучей расчетной водосборной площади; λ - переходной коэффициент от исходной опорной обеспеченности к заданной расчетной.

Основными параметрами формулы (7) являются площадь водосбора, максимальная водоотдача ливневого стока за принятый расчетный интервал времени 10 мин. и коэффициент редукции. Проанализировав составляющие этой формулы, ее скорее можно отнести к разряду модифицированных редукционных формул, чем к предельной интенсивности [4].

Таким образом, для рассматриваемой территории применяются различные варианты редукционных формул, нашедшие широкое распространение во многих странах мира. Они также могут быть получены непосредственно из модели русловых изохрон [1], и в обобщенной редакции представлены уравнениями вида:

$$q_m = \frac{k_0 Y_m}{(F + 1)^{n_1}} \quad (8)$$

или

$$q_m = \frac{q'_m}{(F + 1)^{n_1}}. \quad (9)$$

С другой стороны, формулу (9) следует считать, по существу, обобщенным вариантом одномодальной геометрии гидрографов паводков и половодий, но лишь для случая, если изменчивость продолжительности притока вод со склонов T_o по территории в целом невелика и ее допустимо осреднить. При этих условиях q'_m - максимальный модуль склонового притока равен:

$$q'_m = \frac{n + 1}{n} \frac{1}{T_o} Y_m = k_o Y_m, \quad (10)$$

где k_o - коэффициент трансформации склонового стока, Y_m - слой стока за половодье или паводок, $\frac{n + 1}{n}$ - коэффициент временной неравномерности склонового притока.

В модели русловых изохрон [1]

$$q_m = q'_m \psi \left(\frac{t_p}{T_o} \right) \varepsilon_F. \quad (11)$$

Сопоставление (9) и (11) показывает, что

$$\psi \left(\frac{t_p}{T_o} \right) \varepsilon_F = \frac{1}{(F + 1)^{n_1}}, \quad (12)$$

т.е. при осреднении по территории T_0 уравнение (11) сводится к известной структуре редуccionной эмпирической формулы.

В работе [1] указывается, что формулы вида (9) являются следствием осреднения по территории T_0 . Но как видно из (10), это условие не является обязательным, но тогда T_0 не подлежит осреднению, а обобщается по территории другими приемами. В частности, одним из вариантов обобщения является картирование величин, и, если наблюдается изменение по территории в одном направлении T_0 и Y_m , то тогда редуccionная формула упростится до уровня

$$q_m = \frac{q'_m}{(F+1)^{n_1}}, \quad (13)$$

где q'_m - максимальный модуль склонового притока, равный

$$q'_m = 0,28 \frac{n+1}{n} \frac{1}{(T_0)_{карт}} (Y_m)_{карт}, \quad (14)$$

где $(T_0)_{карт}$ - обобщенные по территории в виде карты значения продолжительности склонового притока;

$(Y_m)_{карт}$ - обобщенная по территории в виде карты величина слоя стока.

При этих условиях параметр q'_m и степенной показатель n_1 могут быть получены при помощи простой графической корреляции. Для этого достаточно прологарифмировать (13).

Результаты исследования. Статистическая обработка максимальных расходов воды паводков теплого периода проводилась по 43 гидрологическим постам, расположенным на территории Горного Крыма.

Полученные по методу моментов коэффициенты вариации максимальных расходов воды изменяются в широких пределах - от 0,39 до 2,99, аналогичные коэффициенты по методу наибольшего правдоподобия колеблются в диапазоне от 0,39 до 3,26. Соотношение C_s/C_v можно осреднить на уровне 3,0.

Статистическая обработка временных рядов слоев паводочного стока выполнена также методами моментов и наибольшего правдоподобия. Коэффициенты вариации Крымских рек, рассчитанные по методу моментов, колеблются в пределах от 0,59 до 2,57; по методу наибольшего правдоподобия - от 0,61 до 2,78. Соотношение C_s/C_v равно 2,5.

Поскольку коэффициенты вариации в обоих случаях больше 0,5, то согласно рекомендациям [2], в качестве расчетных приняты статистические параметры, полученные по методу наибольшего правдоподобия. На их основе рассчитаны расходы и слои стока различной обеспеченности ($P=1,3,5,10\%$) при $C_s/C_v=3,0$ и $C_s/C_v=2,5$, соответственно. Наибольшее значение модуля стока 1%-ной обеспеченности наблюдается на р. Ворон-с. Ворон - 4,98 м³/(с·км²) ($F=10,3$ км², $H_{cp}=500$ м), а минимальный равен 0,07 м³/(с·км²) для р. Бююк-Карасу - с. Зыбино ($F=601$ км², $H_{cp}=410$ м). Что касается слоев стока дождевых паводков 1%-ой обеспеченности, то они колеблется от 10 мм (р. Салгир - с. Двуречье, $F=3540$ км², $H_{cp}=490$ м) до 1238 мм (приток р. Кучук-Узеньбаш, $F=2,46$ км², $H_{cp}=530$ м).

Как видно из рис.1, зависимость модулей стока паводков от площади водосборов для рек исследуемой территории выражена достаточно четко с высоким коэффициентом корреляции ($r=0,78$). В итоге, для данного региона можно принять значение показателя степени редуccionции $n_1 = 0,59$, и с учетом его для каждого водосбора установить $q'_{1\%}$ с целью их дальнейшего обобщения по территории.

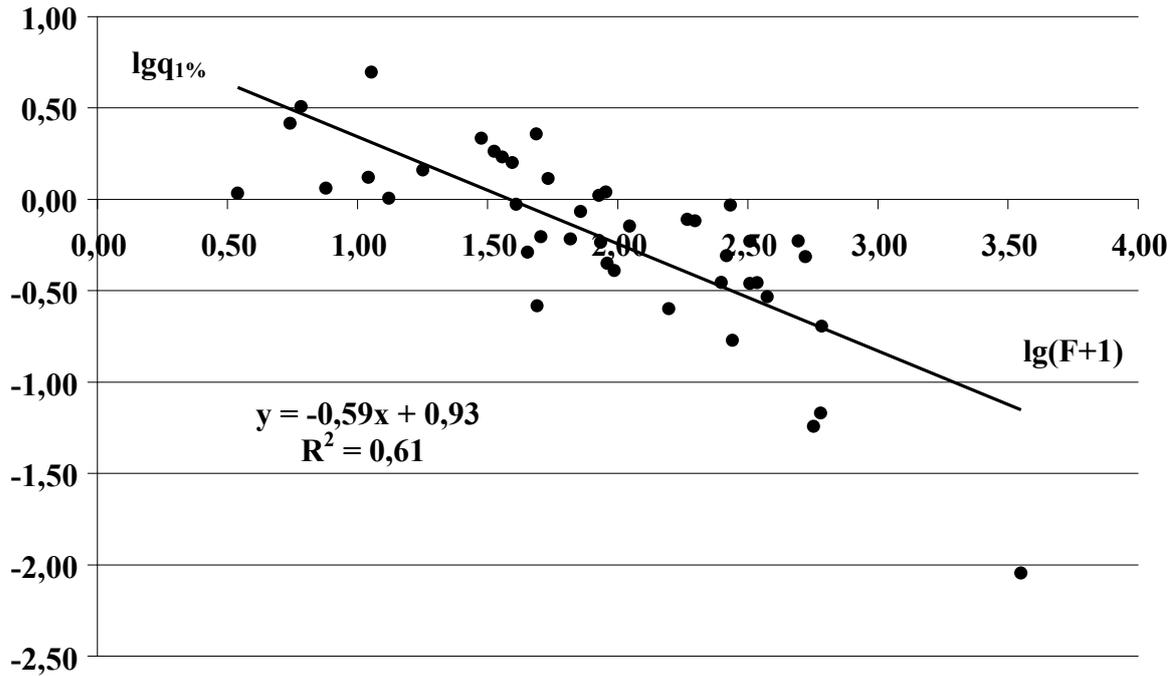


Рис.1 – Зависимость максимальных модулей дождевого стока 1%-ной обеспеченности от площади водосборов рек Горного Крыма

Как известно, для горных территорий обычно хорошо выражена зависимость стоковых характеристик от средней высоты водосборов. Поэтому сначала была построена зависимость $q'_{1\%} = f(H_{cp})$, представленная на рис.2. Однако, для территории Горного Крыма такая зависимость практически отсутствует, о чем свидетельствует очень низкий коэффициент корреляции ($r=0,037$), который является незначимым.

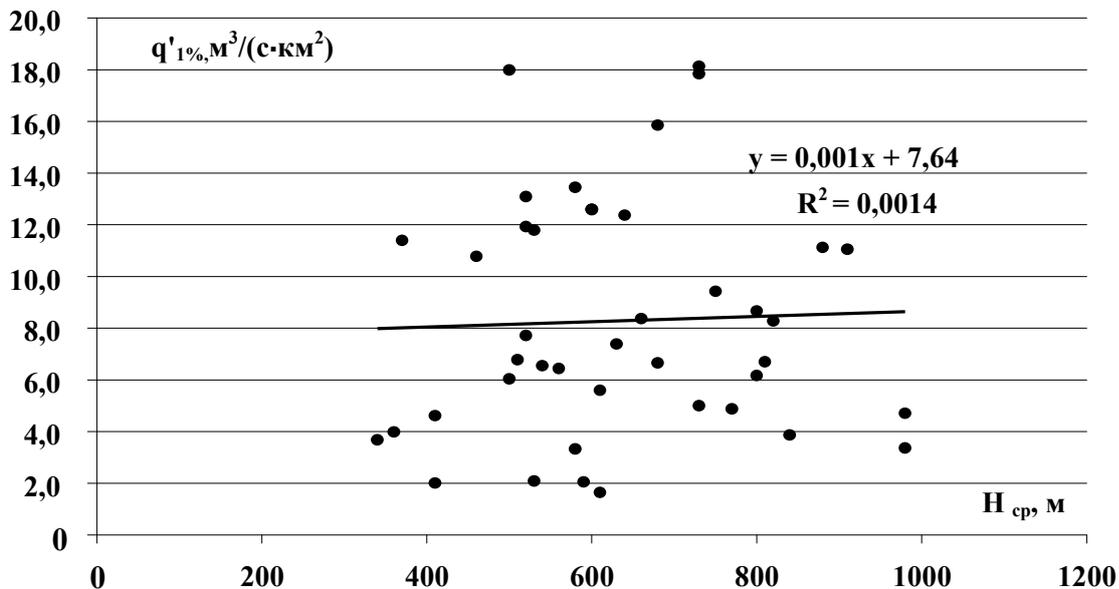


Рис.2 – Изменение максимальных модулей склонового притока дождевых паводков теплого периода с высотой водосборов рек Горного Крыма

Следующим этапом обобщения максимальных модулей склонового притока является исследование влияния на эту величину широты местности. Как показано на рис.3, в целом наблюдается уменьшение $q'_{1\%}$ с увеличением широты местности, что соответствует распределению осадков на данной территории. Коэффициент корреляции полученной зависимости является значимым ($r=0,32$), что является основанием для картирования исследуемой величины.

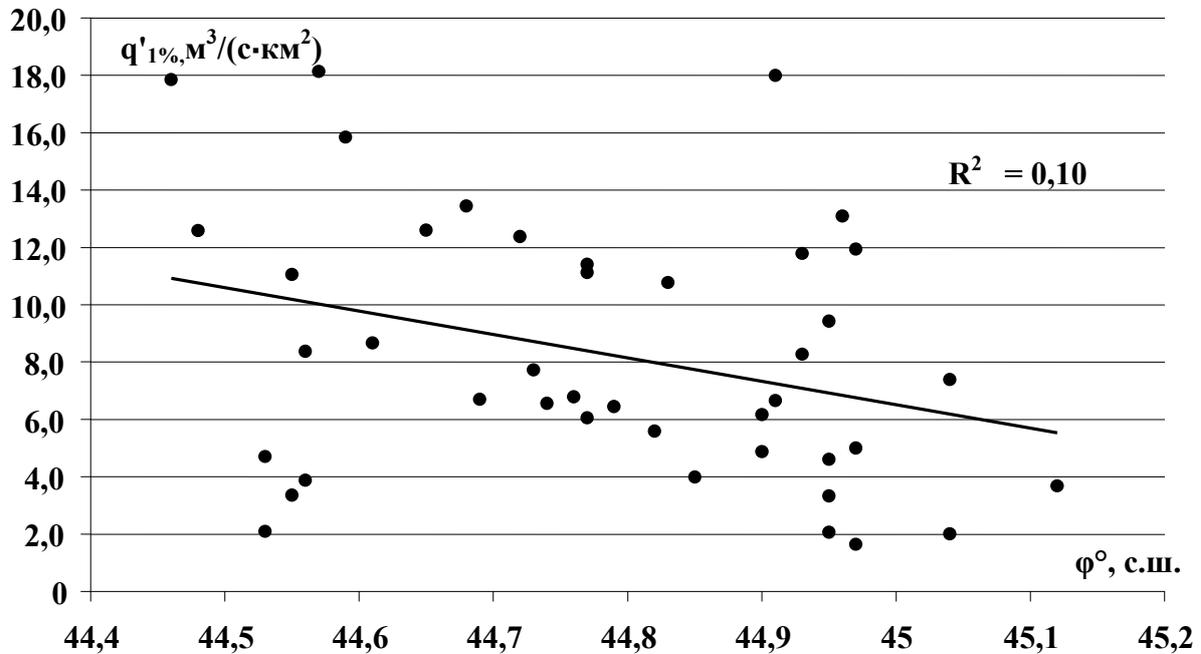


Рис.3 – Зависимость максимальных модулей склонового притока дождевых паводков теплого периода от широты центров тяжести водосборов рек Горного Крыма

Карта-схема распределения максимальных модулей склонового притока $q'_{1\%}$ для территории Горного Крыма представлена на рис.4.

Как видно из него, максимальные модули склонового притока имеют довольно сложный характер распределения и в целом уменьшаются в направлении с северо-запада на юг и с юго-запада - на восток от $5 \text{ м}^3/(\text{с} \cdot \text{км}^2)$ до $15 \text{ м}^3/(\text{с} \cdot \text{км}^2)$. Локальные максимумы наблюдаются на реках: Бельбек, Черная и Ворон, а минимумы соответствуют рекам: Улу-Узень, Салгир, Биюк-Карасу, и, по нашему мнению, приурочены к зонам питания и разгрузки карста.

Таким образом, для рек Горного Крыма предлагается следующая расчетная формула для максимальных модулей паводков теплого периода:

$$q_{1\%} = \frac{q'_{1\%}}{(F + 1)^{0,59}}, \quad (15)$$

где $q'_{1\%}$ - максимальные модули склонового притока, определяемые по карте-схеме, приведенной на рис. 4 для геометрических центров тяжести водосборов.

Среднее отклонение расчетных значений от фактических данных составляет $\pm 23,6 \%$, при точности исходной информации $\pm 21,1 \%$. Такой результат можно считать вполне удовлетворительным.

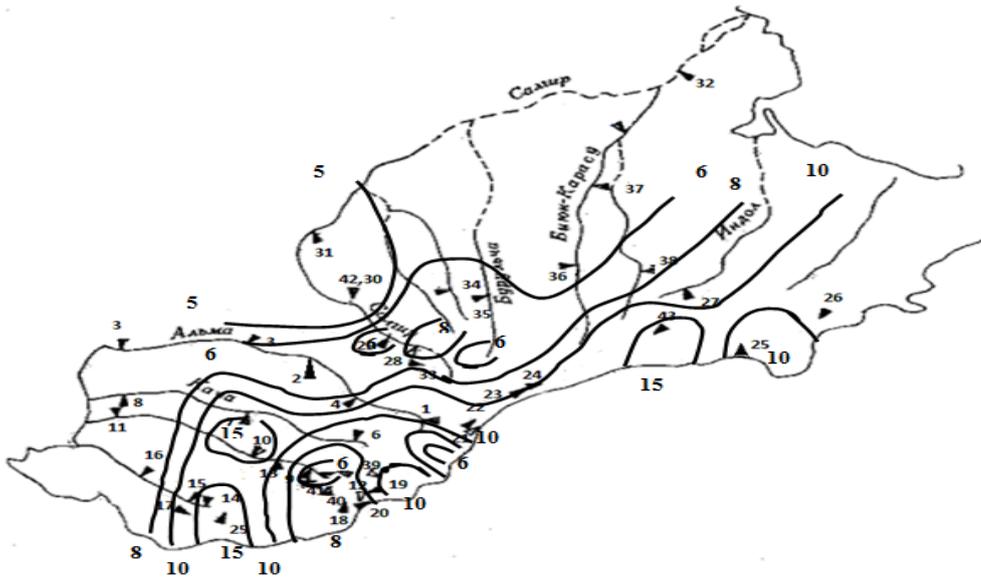


Рис.4 – Распределение максимальных модулей склонового притока $q'_{1\%}$ по территории Горного Крыма, $\text{м}^3/(\text{с}\cdot\text{км}^2)$

Выводы.

1. Разработка методики определения максимального стока дождевых паводков на реках Горного Крыма является весьма актуальной задачей в условиях отсутствия надежных региональных и нормативных методик, обоснованных на современных исходных данных.
2. Рассчитанные по рекам Горного Крыма максимальные расходы воды и слои стока дождевых паводков редкой вероятности превышения ($P=1,3,5,10\%$) с использованием временных рядов до 2010 год позволили уточнить их величины, по сравнению с теми, которые вошли в действующий нормативный документ СНиП2.01.14 – 83.
3. В результате работы уточнены параметры региональной редуцированной формулы, которую можно рекомендовать для практического применения.

Перспективы дальнейших расчетов. Полученные результаты будут использоваться при дальнейшем уточнении методики расчета максимального стока дождевых паводков рек Горного Крыма.

Список литературы

1. *Ресурсы поверхностных вод СССР. / Крым - Л.: Гидрометеиздат., 1973.Т. 6.вып.4 – 848 с.*
2. *Пособие по определению расчетных гидрологических характеристик.- Л.:Гидрометеиздат,1984.-448 с.*
3. *Гопченко Е.Д., Романчук М.Е. Нормирование характеристик максимального стока весеннего половодья на реках Причерноморской низменности. – Київ, КНТ, 2005. –148 с.*
4. *Гопченко Е. Д., Овчарук В.А. Формирование максимального стока весеннего половодья в условиях юга Украины. ТЭС, Одесса, 2002.- 110 с.*
5. *Вишневецький П.Ф. Зливи і зливовий стік на Україні. – Київ: Наукова думка, 1964. – 230 с.*

Максимальний стік дощових паводків річок Гірського Криму. Гопченко Є.Д., Овчарук В.А., Тодорова О.І.

У статті приводиться короткий аналіз стану питання в області розрахунків максимального стоку на території Гірського Криму. На сучасних вихідних даних уточнена регіональна методика для розрахунку максимального стоку дощових паводків.

Ключові слова: максимальний стік, дощові паводки, максимальний модуль стоку.

Maximal runoff of the rain floods of Mountain Crimea rivers. Gopchenko E.D., Ovcharuk V.A., Todorova O.I.

In the article the short analysis of the state of question in the area of calculations of maximal flow on territory of Mountain Crimea is presented. On the modern information a regional method is specified for the calculation of maximal runoff of rain floods.

Keywords: maximal runoff, rain floods, maximal module of flow.