

УДК 551.482.215.2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ И ВРЕМЕНИ ДОБЕГАНИЯ СТОКА В ГОРНЫХ БАССЕЙНАХ

Канд. геогр. наук В.В. Голубцов

Рассматриваются результаты исследования добегаания стока в горных бассейнах. Приводятся формулы для расчета времени добегаания по руслам рек и горным склонам при формировании поверхностного и почвенно-грунтового стока и способы определения их параметров. С помощью полученных формул может быть определено время суммарного (бассейнового) добегаания, складывающееся из продолжительности добегаания стока по склонам и русловой сети.

Расчет скорости и времени добегаания речного стока. Скорость перемещения волны половодья или паводка обычно определяется путем анализа времени прохождения соответственных уровней или расходов через гидрометрические створы, расположенные по длине реки. Горные реки обычно имеют сравнительно небольшую длину и характеризуются большими скоростями добегаания. Поэтому гидрометрические створы на горных реках должны быть обязательно оборудованы самописцами уровней (расходов). В настоящее время число постов, расположенных в среднегорной и высокогорной зонах и оборудованных самописцами, невелико. Такое положение обусловлено невозможностью установки самописцов на участках деформирующегося русла горных рек, а также трудностью их содержания в связи с частыми повреждениями при прохождении паводков и селевых потоков.

Недостаточность гидрометрических материалов побудила автора использовать при разработке формул для определения скорости и времени добегаания установленные выше закономерности движения воды на участках гидрометрических створов с последующей их корректировкой путем сопоставления рассчитанных скоростей течения и реальных скоростей перемещения паводковых волн [13].

Как известно, общее выражение для расчета средних скоростей течения рек, а также поверхностных и почвенно-грунтовых вод может быть записано в следующем виде:

$$V = CH^{\mu} I^{\chi}, \quad (1)$$

где V – средняя скорость, м/сек; H – средняя глубина, м; I – уклон в долях единицы; C – скоростной коэффициент; μ и χ – параметры.

Для расчета скорости течения равнинных рек широко используется формула Шези-Маннинга [11]. Для условий Средней Азии хорошие результаты дают расчеты средней скорости течения воды по формуле [5]:

$$V = C_{\Pi} H^{0,5} I^{0,33}, \quad (2)$$

где C_{Π} – скоростной коэффициент, изменяющийся для гравелисто-галечниковых русел от 8 до 15 и в среднем равный 11.

Недостатком этой формулы является отсутствие зависимости ее скоростного параметра C_{Π} от глубины потока. В этом случае следует полагать, что влияние шероховатости русла не зависит от уровня его заполнения движущейся водной массой, что противоречит достаточно обоснованным представлениям о характере движения воды в речных системах. Для устранения необоснованного игнорирования указанного явления в выражении (2) для определения C_{Π} необходимо использовать формулу Маннинга. Тогда это выражение будет иметь следующий вид:

$$V = \frac{1}{n_{\Pi}} H^{0,67} I^{0,33}, \quad (3)$$

где n_{Π} – коэффициент шероховатости.

По нашему мнению формулу (3) можно использовать для расчета средней скорости течения полугорных рек ($0,001 \leq I \leq 0,004$).

Для горных рек ($I > 0,004$) автором предложена и обоснована следующая формула [7]:

$$V = \frac{1}{m} H^{0,67} I^{0,17}, \quad (4)$$

где m – коэффициент шероховатости.

Определение коэффициента шероховатости m производится в соответствии с классификацией, приведенной в [8].

Исследования Г.А. Алексеева [1], А.Н. Бефани [2], С.И. Харченко [15] и др. показали, что для приближенного определения скорости добега-ния стока может быть использована формула следующего вида:

$$V_p = \alpha Q^\varepsilon I^\nu, \quad (5)$$

где Q – расход воды на участке реки, м³/с; V_p - скорость руслового добега- ния, м/с; α , ε и ν – параметры.

Результаты, полученные А.Г. Иваненко [10] и Е.Д. Гопченко [6] показали, что формула (5) может быть успешно использована для расчета скорости добега сточа равнинных и горных рек. Детальный обзор фор- мул для расчета скорости добега сточа приводится в монографии Р.А. Нежи- ховского [13].

Уравнение для расчета средней скорости добега сточа по рус- лам рек и временных водотоков в горном бассейне может быть получено путем подстановки в выражение (3 или 4) значения H из уравнения расхо- да воды $Q = VbH$. Причем предполагается, что параметры зависимости ширины потока b от средней глубины $b = b(H)$, характеризующей форму русла [13], известны. Можно считать установленным, что эта зависимость для склоновых и русловых потоков имеет следующий вид:

$$b = b_0 H^\delta, \quad (6)$$

где b_0 – ширина потока при $H = 1$ м в м; δ параметр.

Значение параметра δ изменяется от 0 для прямоугольных русел до единицы для русел треугольной формы. Исследования Р.А. Нежихов- ского [13] показали, что параметр δ изменяется от 0,3 до 0,7 для русла и от 0,7 до 4,5 – для поймы. Проведенный анализ морфометрических харак- теристик русел, полугорных и горных рек Средней Азии, Юго-восточного и Восточного Казахстана позволил установить, что параметр δ может быть принят равным 0,33.

Подставив выражение (6) в уравнение расхода воды, получим:

$$Q = Vb_0 H^{\delta+1}. \quad (7)$$

Тогда уравнение для расчета средней скорости течения, получен- ное путем подстановки значения H , определенного из выражения (7), в формулу (4) при $\delta = 0,33$, будет иметь следующий вид:

$$V = \frac{\bar{Q}^{0,33} I^{0,11}}{m^{0,67} \bar{b}_0^{0,33}}, \quad (8)$$

где \bar{Q} , I , \bar{b}_0 и m - средние значения параметров для участка реки.

Следует отметить, что показатель степени при уклоне в выражении (8) зависит от принятой исходной формулы для расчета средней скорости течения воды в реке. При подстановке средней глубины потока из выражения (7) в формулу (3) показатель степени при уклоне будет равен 0,22. При использовании формулы (4) показатель степени при уклоне оказался равным 0,11. Изменения этого показателя, а также значений коэффициента шероховатости n_{II} и m обусловлены различным характером гидравлических сопротивлений при движении воды соответственно в полугорных и горных реках.

При изложении рассматриваемого вопроса все параметры формул принимаются средними для участка от истока до замыкающего створа реки. В дальнейшем внимание на осреднение характеристик и параметров формул акцентируется только в случае необходимости. Средний взвешенный уклон реки при значительных изменениях ее продольного профиля следует определять по способу, предложенному Г.А. Алексеевым [1]. Для гравелисто-галечниковых русел полугорных рек ($0,001 \leq I \leq 0,004$) и их отдельных участков, характеризующихся сравнительно однородными условиями движения воды, значение параметра n_{II} может быть принято изменяющимся равным 0,08 до 0,15 и в среднем равным 0,12. Для горных рек значение параметра m может быть определено с помощью классификации, предложенной автором [8]. Эта классификация по нашему мнению, может оказаться полезной преимущественно при определении параметра m на реках с $I = 0,004 \dots 0,05$. Для горных рек с $I > 0,05$ использование визуальных оценок характера движения потока для определения параметра m с помощью указанной классификации крайне затруднительно. На полугорных и горных реках, как правило, наблюдается чередование участков с различным характером движения воды. Для участков длиной 2...3 км, значение параметра m стремится к наиболее вероятному значению. В связи с этим, для указанных рек рекомендуется принимать значение параметра m постоянным и равным его наиболее вероятной величине 0,211 [8]. В этом случае крайние значения m , приведенные в классификационной таблице, характеризуют диапазон наиболее часто встречающихся величин параметра шероховатости русел горных рек.

Для определения \bar{b}_0 на участке от истока до замыкающего створа или между двумя створами может быть использована связь значений

b_0 определенных для каждого гидрометрического створа и расстояния L от истока до этого створа (рис.). Как известно, гидрометрические створы выбираются на участках рек с сосредоточенным движением воды. Анализ материалов гидрографических обследований рек рассматриваемой горной территории позволил установить, что значения b_0 , определенные в гидрометрических створах, на 15...20 % меньше, чем средние на участке. Поэтому линия на рис. проведена с учетом приведенной выше величины отклонения. Полученная зависимость имеет следующее аналитическое выражение:

$$b_0 = 0,82L^{0,82}, \quad (9)$$

где L – длина реки от истока до замыкающего створа, км.

С помощью этого выражения можно установить зависимость:

$$\bar{b}_0 = \frac{0,82L}{L} \int_0^L L^{0,82} dL, \quad (10)$$

где \bar{b}_0 – среднее значение параметра b_0 .

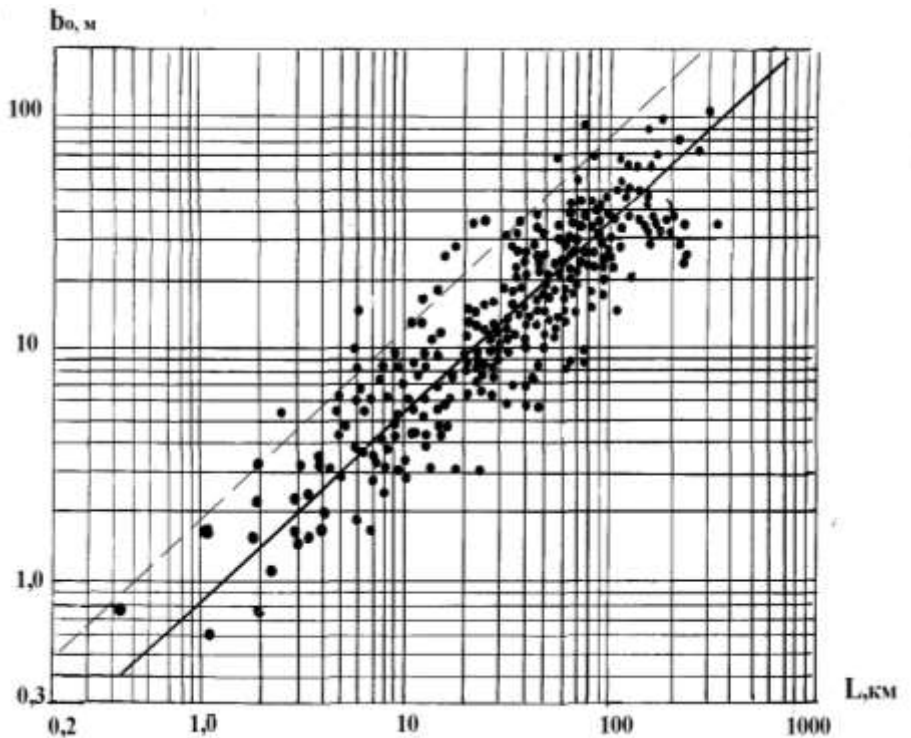


Рис. Зависимость $b_0 = f(L)$.

В результате интегрирования получим:

$$\bar{b}_0 = 0,45L^{0,82}. \quad (11)$$

Анализ материалов гидрографических обследований горных рек показывает, что числовой коэффициент в формуле (11) изменяется преимущественно в пределах 0,25...0,65.

Параметр \bar{b}_0 для участка между верхним и нижним створами, расположенными на расстоянии L_1 и L_2 от истока, может быть определен с помощью выражения (11). Он будет равен величине b_0 , определенной на расстоянии $L^* = 0,5(L_1 + L_2)$ от истока реки. Более точное определение указанного параметра возможно путем использования материалов гидрографических обследований. В отдельных случаях может оказаться полезными крупномасштабные карты и аэрофотоснимки.

Подставив значение \bar{b}_0 из (11) в выражение (8), получим:

$$V_p = \frac{1,3\bar{Q}^{0,33} I^{0,11}}{m^{0,67} L^{0,27}}. \quad (12)$$

Значение \bar{Q} для участка от истока до замыкающего створа может быть приближенно определено с помощью редуцированных формул максимального стока, имеющих следующий вид:

$$M = \frac{A}{F^\lambda} \quad (13)$$

откуда

$$Q = A \cdot F^{1-\lambda}, \quad (14)$$

где M – модуль максимального стока, л·с⁻¹ с 1 км²; F – площадь водосбора, A и λ – параметры.

Параметр λ является показателем степени редукции модуля стока в зависимости от размера водосбора. Из выражения (14) легко получить зависимость:

$$\bar{Q} = \frac{A}{F} \int_0^F F^{1-\lambda} dF \quad (15)$$

или

$$\bar{Q} = \frac{A}{2-\lambda} F^{1-\lambda}. \quad (16)$$

Обозначив $\frac{I}{2-\lambda} = \gamma$ и, учитывая (14), получим:

$$\bar{Q} = \gamma \cdot Q. \quad (17)$$

Таким образом, для определения коэффициента перехода от расхода в замыкающем створе к среднему расходу необходимо знать только показатель степени редукции λ . Формулы вида (13) получили широкое распространение в гидрологии. Значение параметра γ приводится в ряде работ и научно-прикладных изданий. Они могут быть использованы для определения коэффициента γ . При изменении λ от 0 до 1 коэффициент γ изменяется в пределах 0,5...1,0. Для полугорных и горных рек коэффициент степени редукции λ в среднем может быть принят равным 0,5, а коэффициент $\gamma = 0,67$.

При определении величины среднего расхода на участке между двумя створами особых трудностей обычно не возникает. Характер изменения расхода воды на участке может быть установлен при его обследовании и определении максимальных расходов по меткам высоких вод. Для слабоприточных (транзитных) участков при расчете средней скорости в первом приближении может быть принят расход верхнего створа.

Значение \bar{Q} с учетом (17) может быть представлено в следующем виде:

$$\bar{Q} = 16,67\gamma qF, \quad (18)$$

где q – интенсивность стокообразования, мм/мин.

Следует отметить, что при выполнении расчетов по формуле (18) может возникнуть необходимость замены F через L . Для этого можно использовать зависимость $L = L(F)$, полученную для бассейнов горных рек Средней Азии, Южного, Юго-восточного и Восточного Казахстана. Она имеет следующее аналитическое выражение:

$$L = 1,6F^{0,55}. \quad (19)$$

откуда

$$F = 0,425L^{1,82}. \quad (20)$$

Следует отметить, что выражения, близкие к (19) и (20) получены рядом авторов в республиках бывшего Союза и за рубежом. Таблица параметров формул вида (20) приведена в монографии Р.А. Нежиховского

[13]. Для равнинных районов республик бывшего Союза им получена достаточно обоснованная зависимость $F = F(L)$:

$$F = 0,58L^{1,78}. \quad (21)$$

Сравнение зависимостей (20) и (21) при $L = const$ показывает, что в горных условиях водосборы имеют меньшую площадь, чем на равнине. Увеличение водосборной площади с увеличением длины рек на равнине происходит менее интенсивно, чем в горных условиях. Эти закономерности, по-видимому, близки к действительности.

Использование зависимости (12), а также (18) и (20) дают возможность перейти к определению средней скорости и времени добегания на участке реки от истока до замыкающего створа. Подставив выражение (18) при $\gamma = 0,67$ в (12) и, учитывая (20), получим:

$$V_p = \frac{I}{m^{0,67}} q^{0,33} I^{0,11} L^{0,33}. \quad (22)$$

Необходимо отметить, что в формуле (22) мы пренебрегли полученным при ее выводе численным значением коэффициента, равного 2,19, с целью компенсации превышения средних скоростей на относительно прямолинейных участках гидрометрических измерений по сравнению с их значениями для всей реки, характеризующейся значительной извилистостью и разнообразием форм и размеров речного русла.

Известно, что время руслового добегания τ_p , выраженное в минутах, равно:

$$\tau_p = 16,67 \frac{L}{V}. \quad (23)$$

Подставив в (23) значение скорости (22) получим:

$$\tau_p = \frac{16,67m^{0,67} L^{0,67}}{q^{0,33} I^{0,11}}. \quad (24)$$

Формулы (22) и (24) можно использовать для определения скорости добегания полугорных рек ($0,001 \leq I \leq 0,004$), заменив в них коэффициент шероховатости m на n_{II} и показатель степени при уклоне на 0,22.

Теоретические расчеты [13] показывают, что скорость перемещения волн половодий и паводков V_p^* определяется следующим образом:

$$V_p^* = V_p + \omega \cdot \frac{dV}{d\omega}, \quad (25)$$

где V_p^* – скорость перемещения паводковой волны, м/с.

В монографии Р.А. Нежиховского [13] показано, что если в теоретическом выражении (25) заменить среднюю скорость по Шези-Маннингу, а ширину реки выразить с помощью (6), то можно получить следующую формулу:

$$V_p^* = k \cdot V_p, \quad (26)$$

где

$$k = 1 + \frac{0,67}{\delta + 1}. \quad (27)$$

Расчеты по этой формуле показывают, что при изменении δ от 1 до 0 скорость добегания должна превысить скорость течения в 1,33...1,67 раза. Как показали исследования Р.А. Нежиховского [13], в реальных условиях, из-за неоднородности морфометрических и гидравлических характеристик по длине реки соотношение скорости добегания и скорости течения k для отдельных ее участков изменяется в пределах преимущественно от 0,5 до 1,4 и в среднем может быть принято равным единице. Этот вывод в первом приближении не противоречит немногочисленным данным определения скорости добегания стока горных рек.

Полученные расчетные выражения для вычисления скорости и времени руслового добегания проверялись путем сравнения с данными определений указанных характеристик на участках между гидрометрическими створами, а также с помощью материалов, опубликованных в ряде работ [6, 10 и др.]. Использование материалов наблюдений постов, оборудованных самописцами уровней (расходов) воды в бассейнах р. Уба (Западный Алтай) и р. Шарын (Северный склон Заилийского Алатау) показали, что параметр k в первом приближении может быть принят равным единице. Этот вывод хорошо согласуется с результатами исследований Р.А. Нежиховского для равнинных рек ЕТР [13] и подтверждает существующее представление о том, что русла горных рек оказывают значительно сопротивление движению потока вследствие разнообразия их форм и размеров, а также шероховатости и уклонов по длине реки.

Определение скорости и времени добегания склонового стока. Основными факторами, определяющими трансформации процесса интенсив-

ности стокообразования в гидрограф притока к речной сети, является скорость и время добегания талых и дождевых вод по микроручейковой и дренажной сети склонов горных бассейнов. Однако работы, в которых рассматриваются вопросы склонового добегания, в связи с трудностью проведения натуральных экспериментов, сравнительно немногочисленны. К ним следует отнести исследования С.И. Харченко [15], А.Н. Бефани [2] и др. Отдельные полезные сведения о процессах добегания воды приводятся в работах по искусственному дождеванию поверхности речных бассейнов [12]. Теоретические вопросы добегания склонового стока в значительной степени разработаны А.Н. Бефани [2].

Ограниченность экспериментальных материалов побудила автора при разработке способов определения добегания поверхностного стока использовать характеристики речных водосборов. При исследовании добегания по поверхности горных склонов мы исходили из того, что склон в горном бассейне разделен на отдельные микроводосборы, расположенные рядом, один за другим. Верхняя часть большинства из них примыкает к бровке склона. Кроме этого предполагалось, что выражение (20) характеризует морфометрические закономерности не только речных бассейнов, но и микроводосборов, расположенных на горных склонах. Это позволило подойти к определению времени склонового добегания с помощью приемов, использованных выше при рассмотрении руслового добегания.

Исследования С.И. Харченко показали, что в микроручейковой сети склонов наблюдается переходный режим движения воды от ламинарного к турбулентному. Это обусловлено низкими значениями числа Рейнольдса Re , определенными по данным полевых измерений скорости и глубины микроручейковых потоков на склонах и равным 300...400 [15]. По результатам проведенных им полевых исследований средняя скорость микроручейковых потоков может быть приближенно определена с помощью следующего выражения:

$$V_{c\Pi} = \frac{I}{n_c^{2,5}} H^{1,5} I^{0,75}, \quad (28)$$

где $V_{c\Pi}$ – средняя скорость микроручейкового потока, м/с; n_c – коэффициент шероховатости; H – средняя глубина воды на поверхности склона, м; I – средний уклон поверхности склона.

Следует полагать, что в этом выражении показатели степени при n_c , H и I для переходного от ламинарного к турбулентному режиму дви-

жения воды на склонах несколько завышены. Возможно, это связано с недостаточной определенностью зависимостей скорости микроручейкового добегания от расхода воды и уклона при выводе формулы вида (5) использованной для получения выражения (28).

По нашему мнению формулу для определения средней скорости движения воды по склону можно записать в следующем виде:

$$V_{c\Pi} = \frac{I}{n_c^2} H I^{0,67}. \quad (29)$$

В связи с трудностью определения слоя воды, текущей по поверхности склона возникает необходимость введения в формулу (29) значения расхода воды. Наблюдения на склонах речных водосборов показывают, что параметр δ в выражении (6) для эродированных и задернованных частей склонов шириной 1 м может быть принят равным нулю. Тогда уравнение для вычисления скорости добегания по их поверхности, полученное путем подстановки значения H , определенного из выражения (6), в формулу (29) при $\delta = 0$ будет иметь следующий вид:

$$V_{c\Pi} = \frac{\bar{Q}^{-0,5} I^{0,33}}{n_c \bar{b}_0^{-0,5}}. \quad (30)$$

Для определения величины \bar{b}_0 в выражении (32) может быть использована верхняя огибающая основной группы точек, проведенная на рисунке и характеризующая зависимость $b_0 = b_0(L_c)$ для условий свободной эрозии. Такие условия имеются на эродированных и задернованных склонах горных бассейнов. Следует полагать, что микроручейковая сеть как эродированных, так и задернованных склонов характеризуется примерно одинаковыми морфометрическими закономерностями. Это, по-видимому, обусловлено тем, что микротальвеги задернованных склонов также имеют эрозионное происхождение. Аналитическое выражение огибающей (рис.) имеет следующий вид:

$$b_0 = 1,82 L_c^{0,82}. \quad (31)$$

Из этого выражения аналогично (11) имеем:

$$\bar{b}_0 = L_c^{0,82}. \quad (32)$$

Далее, подставив (32) в (30), получим:

$$V_{c\Pi} = \frac{\bar{Q}^{0,5} I^{0,33}}{n_c L_c^{0,41}}. \quad (33)$$

В формуле (33) показатель степени при уклоне оказался близким к значению, полученному С.И. Харченко [15] при оценке параметров в формуле вида (5), а показатель степени при расходе воды – к значению, полученному Ю.Б. Виноградовым [3] при определении зависимости скорости добегания от величины поверхностного стока.

Значение \bar{Q} может быть представлено в зависимости от интенсивности стокообразования и длины склона. Для этого необходимо в выражении (18) определить значение параметра λ и выразить площадь водосбора через длину склонового водотока.

При определении параметра γ в формуле (18) можно принять, что изменение расхода воды по длине склона пропорционально площади микроводосбора ($\lambda=0$) расположенного в его пределах. Тогда в соответствии с (16) и (17) $\gamma=0,5$. Следует также полагать, что морфометрические характеристики микроводосборов, расположенных в пределах склона, примерно идентичны их значениям для малых речных бассейнов. Поэтому для них можно в первом приближении использовать те же закономерности, что и для малых водосборов. Это позволяет для перехода от площади микроводосборов к длине склонов использовать выражение (20). Подставив его в (18) и, учитывая что $\gamma=0,5$, получим:

$$\bar{Q} = 3,54qL^{1,82}. \quad (34)$$

Затем, подставив (34) в (33), имеем:

$$V_{c\Pi} = \frac{1,88q^{0,5} I^{0,33} L_c^{0,5}}{n_c}. \quad (35)$$

Далее, подставив (35) в (23), получим:

$$\tau_{c\Pi} = \frac{8,87n_c L_c^{0,5}}{q^{0,5} I^{0,33}}, \quad (36)$$

где $\tau_{c\Pi}$ – время склонового поверхностного добегания, мин.

Перейдем к оценке параметров формулы для определения $\tau_{c\Pi}$.

В качестве характеристики среднего уклона склонов следует использовать средний уклон бассейна. Параметр n_c может быть определен с помощью предложенной классификации стокообразующих поверхностей горных склонов по величине параметров шероховатости (табл.). Значение параметра n_c , помещенные в этой таблице, определены с помощью материалов непосредственных характеристик склонового поверхностного стока, опубликованных в ряде работ [2, 4, 15] и др. В таблице приводятся значения n_c для двух категорий шероховатости эродированных поверхностей и трех категорий поверхностей, покрытых растительностью. В сложных условиях, когда трудно отдать предпочтение одной из двух категорий, принимается большее значение параметра n_c .

Значение L_c определяется с помощью выражения:

$$L_c = \frac{I}{2\rho}, \quad (37)$$

где ρ – густота гидрографической сети, км/км². Густоту гидрографической сети следует определять на основании анализа материалов аэрофотосъемки. В этом случае целесообразно использовать для определения L_c по видимому, более точное выражение, предложенное А.Р. Нежиховским [13]:

$$L_c = \frac{I}{2,25\rho}. \quad (38)$$

Необходимо отметить, что результаты расчетов $V_{c\Pi}$ и $\tau_{c\Pi}$, выполненные с помощью формул (33), (35) и (36) показывают довольно хорошую сходимость с данными непосредственных определений этих характеристик, опубликованных в работах [2, 15] и др. Эти материалы сравнительно немногочисленны, поэтому формула нуждается в дальнейшей проверке и корректировке параметров для определенных физико-географических условий.

Перейдем теперь к определению скоростей движения и времени добегания почвенно-грунтового стока. Исследованием этого вида горного склонового стока гидрологи начали заниматься сравнительно недавно, в конце 50-х - начале 60-х гг. 20 столетия [2, 4, 9 и др.].

Классификация стокообразующих поверхностей горных склонов по величине параметров шероховатости

Категория	Характеристика поверхностей	n_c	$\frac{I}{n_c}$
I	Сильно эродированные склоны, сложенные лесами и щебнистыми лессовидными суглинками. Растительность полностью отсутствует или занимает небольшие участки у водоразделов.	0,17	6
II	Умеренно и слабо эродированные склоны. Задернованные поверхности имеются преимущественно на приводораздельных участках микроводосборов и в верхней части склонов. Пашни в обычных условиях.	0,25	4
III	Умеренно задернованные склоны, лишенные кустарниковой и древесной растительности. Заброшенные пашни со следами водной эрозии.	0,33	3
IV	Луговые склоны, покрытые изреженной растительностью. Поверхность склонов неровная, местами бугристая. В местах концентрации склонового стока встречаются срывы дернового покрова.	0,50	2
V	Задернованные склоны, покрытые густой горнолуговой растительностью. Залесенные склоны с наличием густого подлеска и мощной лесной подстилки.	0,75	1,33

Из приведенных работ следует особо отметить детальные исследования паводкового грунтового стока, выполненные Ю.Б. Виноградовым в бассейнах горных рек Средней Азии [3 и 4] и А.Н. Бефани в горных районах Дальнего Востока [2]. Следует отметить, что в литературе нет единого наименования этого вида стока. Его называют "внутрипочвенным", "приповерхностным", "контактным", "дренажным" и "быстрым грунтовым" стоком. Нам представляется более уместным называть указанное выше явление почвенно-грунтовым стоком. Это название мы, по-видимому, впервые встречаем у Д.Е. Залесского [9]. Таким образом, почвенно-грунтовым стоком будем называть перемещение воды под влиянием гид-

равлического уклона в верхнем слое рыхлых отложений по системе относительных водоупоров, расположенных на сравнительно небольшой глубине от поверхности склона.

Движение почвенно-грунтовых вод в мелкозернистых грунтах является ламинарным и подчиняется линейному закону фильтрации Дарси [14, 16]. Скорость движения почвенно-грунтовых вод может быть определена с помощью следующего выражения:

$$V_{сПГ} = k_{\phi} I_c, \quad (39)$$

где $V_{сПГ}$ – скорость движения почвенно-грунтовых вод, м/мин; k_{ϕ} – коэффициент фильтрации, характеризующий водонепроницаемость грунта и зависящий от его пористости и трещиноватости, м/мин.

В крупнозернистых, грубообломочных и трещиноватых грунтах движение почвенно-грунтовых вод имеет турбулентный характер и подчиняется нелинейному закону фильтрации Шези-Краснопольского [14]:

$$V_{сПГ} = k_{\phi} I_{0,5}^c. \quad (40)$$

Многие исследователи при описании нелинейной фильтрации принимают показатель степени в формуле (40) равный 0,67 [16]. Ориентировочные значения коэффициента фильтрации горных пород опубликованы в "Справочном руководстве гидрогеолога" [14].

Исследования С.В. Избаша и Кребера [16] показали, что параметр k_{ϕ} изменяется в зависимости от диаметра (крупности) фильтрационного материала. Анализ материалов Алма-Атинской селестоковой станции, сведения, приведенные в [2, 12], показали, что параметр k_{ϕ} для горных бассейнов Средней Азии изменяется преимущественно в пределах 50...200 мм/мин. Для районов Дальнего Востока, характеризующихся интенсивной ливневой деятельностью, значение этого параметра по исследованиям А.Н. Бефани достигает для щебнистых пород 300 мм/мин, а для каменистых пород – 700 мм/мин и более [2].

Экспериментальные исследования в бассейнах рек Дальнего Востока России, выполненные под руководством А.Н. Бефани [2] показали, что в определенных условиях нелинейная фильтрация почвенно-грунтовых вод имеет характер движения по закрытым каналам – дренам. В этих случаях формулы для расчета скорости и времени перемещения почвенно-

грунтового стока можно получить из следующих соображений. Как известно формула Шези для напорного потока в трубе может быть представлена в следующем виде [11]:

$$V = C\sqrt{DI}, \quad (41)$$

где D – диаметр трубы; C – скоростной коэффициент.

Для переходного от ламинарного к турбулентному режиму движения воды в микро и макропорах дренажной сети горных склонов по аналогии с (41) можно записать:

$$V = C\sqrt[3]{(DI)^2}. \quad (42)$$

Приняв площадь поперечного сечения микро и макропор горных склонов близкой к окружности, заменив ее значение на $\frac{Q}{V}$ из уравнения расхода и, произведя необходимые преобразования, получим:

$$V_{cПГ} = \alpha Q^{0,25} I^{0,5}, \quad (43)$$

где $V_{cПГ}$ – скорость почвенно-грунтового стока, м/мин; Q – расход воды через дренажную сеть полосы склона шириной 1 м, л/с; α – скоростной коэффициент.

Использование результатов экспериментальных исследований [2] показывает, что скоростной коэффициент α в среднем может быть принят равным 0,4...0,6. Показатель степени при уклоне в формуле (43) соответствует значению, полученному А.Н. Бефани для дренажной сети горных склонов Дальнего Востока. Это подтверждает правильность использования исходного выражения (42), характеризующего переходный от ламинарного к турбулентному режим движения воды в макро и микропорах дренажной сети горных склонов.

Выражение для расчета времени добегания по дренажной сети горных склонов будет иметь следующий вид:

$$\tau_{cПГ} = \frac{1000L_c}{\alpha Q^{0,25} I^{0,5}}, \quad (44)$$

где $\tau_{cПГ}$ – скорость добегания, мин.

Важно подчеркнуть, что скорость движения почвенно-грунтовых вод в отличие от скорости движения поверхностных вод не зависит от слоя стекания, а только от водопроницаемости почво-грунтов. Для определенного состава пород, слагающих поверхность бассейна, скорость поч-

венно-грунтовых вод является практически постоянной. Это обусловлено тем, что с увеличением слоя почвенно-грунтовых вод (верховодки), перемещающихся по относительному водоупору, водопроницаемость поперечного сечения фильтрационного потока изменяется незначительно. При этом она может в зависимости от геологического строения отдельных горных склонов (слоистости пород) как увеличиваться, так и уменьшаться. Для отдельных элементарных бассейнов, характеризующихся определенным геологическим строением, эту скорость можно принять постоянной, т.е. не зависящей от слоя стекания по относительному водоупору и интенсивности почвенно-грунтового стокообразования.

При использовании формул (43) и (44), следует учитывать, что расход почвенно-грунтового стока не может превышать определенной величины. Эта предельная величина обуславливается расходной характеристикой, определяющей пропускную способность горных склонов. В соответствии с выражением (43) пропускная способность определяется следующим образом:

$$Q_{np} = kI^{0,5}, \quad (45)$$

где Q_{np} – пропускная способность горного склона, л/мин; k – расходная характеристика, л/мин.

Анализ материалов Алматинской селестоковой станции показывает, что в центральной части Заилийского Алатау средняя расходная характеристика для участка склона шириной 1 м составляет преимущественно 1...2 л/мин. По данным А.Н. Бефани [2] расходная характеристика k_2 достигает 3 л/мин и более для горных склонов Дальнего Востока, сложенных щебнисто-каменистыми грунтами. При $\bar{Q} > \bar{Q}_{np}$ наблюдается выклинивание почвенно-грунтового стока на поверхность склона преимущественно в его нижней части, как правило, характеризующейся повышенным увлажнением почво-грунтов и пониженными уклонами. В этом случае на этих переувлажненных склонах наблюдается формирование поверхностного стока.

В заключение следует отметить, что с помощью полученных формул может быть определено время суммарного (бассейнового) добегания, складывающееся из продолжительности добегания стока по склонам и русловой сети. Как известно, время руслового добегания зависит, а склонового не зависит от площади водосбора. При формировании поверхност-

ного стока время склонового добегаания сравнительно невелико как по абсолютной величине, так и по сравнению с его суммарной величиной. Для достаточно больших водосборов оно соизмеримо с точностью определения продолжительности бассейнового добегаания. При формировании почвенно-грунтового стока время склонового добегаания достигает значительной величины и его всегда необходимо учитывать в расчетах.

Предложенные формулы, в общем, достаточно хорошо отражают основные закономерности перемещения стока и позволяют рассчитать скорость и время добегаания по горным склонам и руслам полугорных и горных рек. Однако проверка некоторых из них выполнена на сравнительно небольшом материале. В связи с этим имеется необходимость в дальнейшем уточнении параметров формул и методов их определения. При моделировании гидрографа стока эти характеристики уточняются в процессе оптимизации параметров модели.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев Г.А. Расчеты паводочного стока рек СССР. - Гидрометеиздат, 1955. - 198 с.
2. Бефани А.Н. Теоретическое обоснование методов исследования и расчета паводочного стока рек Дальнего Востока // Тр. ДВНИГМИ. - 1966. - Вып. 22. - С. 124-215.
3. Виноградов Ю.Б. Формирование поверхностного стока // Изв. Академии Наук Уз СССР. Серия технических наук. - 1960. - Вып. 1. - С. 57-67.
4. Виноградов Ю.Б. Вопросы гидрологии дождевых паводков на малых водосборах Средней Азии и Южного Казахстана // Тр. КазНИГМИ. - 1967. - Вып. 28. - 262 с.
5. Гастунский А.Н. Гидрология Средней Азии. - Ташкент.: - Изд-во «УКИТУВЧИ». - 1969. - 328с.
6. Гопченко Е.Д. О расчете скоростей руслового добегаания на горных реках Северо-востока СССР. Сб. Метеорология, климатология и гидрология. - Киев.: Изд-во Киевского университета. - 1969. - Вып. 5. - С. 213 - 217.
7. Голубцов В.В. Гидравлические сопротивления и расчет средней скорости течения полугорных и горных потоков // Гидрометеорология и экология. - 2000. - № 3-4. - Алматы. - С. 59-83.
8. Голубцов В.В. Классификация русел полугорных и горных потоков по величине коэффициента шероховатости // Гидрометеорология и экология. - 2001. - № 1-2. - С. 87-101.

9. Залесский Ф.В. Анализ формирования дождевых паводков в условиях вечной мерзлоты (на примере крайнего Северо-Востока СССР). // Международный симпозиум по паводкам и их расчетам. – Л.: Гидрометеоздат, 1969. - С. 318-327.
10. Иваненко А.Г. Исследование скоростей добега паводков на реках Закарпатской области // Тр. ОГМИ. - 1961. - Вып. 24. - С. 48 - 51.
11. Караушев А.В. Речная гидравлика. - Л.: Гидрометеоздат, 1969.
12. Литовченко А.Ф., Мочалов В.П. Полевые экспериментальные исследования потерь дождевых вод на инфильтрацию в горах северного склона Заилийского Алатау. – Алма-Ата. - 1964. - 195с.
13. Нежиховский Р.А. Руслонная сеть бассейна и процесс формирования стока воды. - Л.: Гидрометеоздат. – 1971. - 476 с.
14. Справочное руководство гидрогеолога. Т.1. Издание второе, исправленное и дополненное / Под ред. В.М. Максимова. - Л.: «Недра». - 1967. – 592 с.
15. Харченко С.И. Исследование потерь и добегание талых вод // Тр. ГГИ. - 1956. - Вып. 57(111). - С. 5-53.
16. Чертоусов В.Д. Гидравлика. Специальный курс - М.-Л., Госэнергоиздат. - 1962. – 630 с.

Казахский научно-исследовательский институт экологии и климата

ТАУЛЫҚ БАССЕЙНДЕРДЕГІ АҒЫННЫҢ ЖЫЛДАМДЫҒЫ МЕН АҒЫННЫҢ АҒЫП ЖЕТУ УАҚЫТЫН АНЫҚТАУ

Геогр. ғылымд. канд.

В.В. Голубцов

Таулық бассейндердегі ағынның ағып жетуін зерттеу нәтижелері қарастырылады. Беткі және топырақтық – грунттық ағынның жиналуымен өзен арнасындағы және тау беткейлеріндегі ағынның жету жылдамдығын есептеу формулалары беріліп, олардың параметрлерін анықтау тәсілдері ұсынылады. Алынған формулалардың көмегімен беткейлер мен арналық тараулардан ағынның ағып жету ұзақтығынан құралатын ағынның жету жиынтығы (бассейндік) уақытын анықтауға мүмкіндік туады.