

ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ И СИСТЕМНАЯ МОРФОМЕТРИЯ САМОФОРМИРУЮЩИХСЯ РУСЕЛ РЕК И КАНАЛОВ

Обоснованы зависимости гидравлических сопротивлений от уклона свободной поверхности русловых потоков, получены системно-групповые инварианты подобия и морфометрические характеристики самоформирующихся рек и каналов.

Множественность морфометрических зависимостей и неопределенность их параметров составляют методологический «камень преткновения» современного русловедения. К. Парк [23] приводит статистические данные о параметрах формул вида: $B \sim Q^m$ — для ширины русла, и $h \sim Q^n$ — для глубины более чем 200 рек мира. Как оказалось, показатели степени изменялись в широких пределах, особенно для B , вплоть до ничтожно малых значений, свидетельствующих об отсутствии связи с расходом воды Q . В. И. Антроповский [3] привел более 150 формул для основных размеров русла, предложенных в России и за рубежом. Они оставляют впечатление некоего «морфометрического хаоса». Его преодоление требует последовательного использования основополагающих географических и гидроморфологических подходов [4], [12], [21], физически обоснованных расчетных схем и математических моделей [9], [15], [24].

В этих условиях естественно обратиться к предпосылкам теории подобия, вытекающим из общих закономерностей движения русловых потоков. Одним из первых ими воспользовался М. А. Великанов. Затем свои решения предложили Г. В. Железняков [8] и К. В. Гришанин [7]. Они обосновали исходные комплексы подобия, включающие относительную ширину русла и число Фруда:

$$\frac{B}{h} Fr = idem.$$

Отсюда К. В. Гришанин получил так называемый инвариант подобия — безразмерную глубину

$$M = \frac{h(gB)^{0.25}}{Q^{0.5}} = inv, \tag{1}$$

где g — ускорение свободного падения.

Установив значение $M = 0,92$, Гришанин считал его действительным для равнинных устойчивых прямолинейных участков всех рек при любых наполнениях, не выходящих за бровки русла. Однако, как показала наша проверка [11], значения M и в самом деле остаются постоянными в отдельно взятых гидрометрических створах, но изменяются в зависимости от порядка реки.

Характеристика M выведена из уравнения кинематической волны, не учитывающего гидравлические сопротивления и уклоны свободной поверхности — важнейшие факторы руслоформирования. В связи с этим будет правомерным исходить из уравнений планового движения открытого потока в системе коор-

динат (X, Y) при негоризонтальной поверхности дна, имеющей продольный уклон I_0 . Разрешив одно из двух уравнений относительно члена, содержащего I_0 [7] и введя масштабные коэффициенты соответствующих переменных и параметров α , получим критериальную форму этого уравнения:

$$\begin{aligned} \frac{\alpha_g \alpha_h \alpha_I}{\alpha_B} g I_0 \left(\frac{\partial z}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial x} \right) &= \frac{\alpha_{V^2}}{\alpha_B} \left(V \frac{\partial V}{\partial x} + U \frac{\partial V}{\partial x} \right) + \\ + \frac{\alpha_g \alpha_h}{\alpha_B} g \left(\frac{\partial z}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial x} \right) &- \alpha_g \alpha_I g I_0 - \frac{\alpha_\lambda \alpha_{V^2}}{\alpha_h} \lambda \frac{V^2}{2g}, \end{aligned} \quad (2)$$

где V и U — соответственно продольная и поперечная составляющие средних скоростей на вертикалях, h и z — глубина потока и отметка дна, λ — коэффициент гидравлических сопротивлений: $\lambda = 2g/C^2$ (C — коэффициент Шези). При равномерном движении уклон I_0 совпадает с уклоном свободной поверхности I .

Масштабные коэффициенты продольных и поперечных направлений приняты равными масштабу ширины русла α_B , а для глубин и отметок дна — α_h . Масштабы скоростей V и U должны совпадать по условиям неразрывности движения. Деление всех членов уравнения (2) на комбинацию масштабных коэффициентов в его левой части порождает ряд индикаторов подобия:

$$\frac{\alpha_{V^2}}{\alpha_g \alpha_L \alpha_I} = \frac{1}{\alpha_I} = \frac{\alpha_B}{\alpha_h} = \frac{\alpha_\lambda \alpha_{V^2} \alpha_B}{\alpha_{h^2} \alpha_g \alpha_I} = 1.$$

Каждому из индикаторов отвечают соответствующие числа подобия. Наиболее содержательна последняя комбинация, которая непосредственно приводит к новому выражению безразмерной глубины:

$$\eta = \frac{h}{Q^{0.5}} \left(\frac{g B I_0}{\lambda} \right)^{0.25} = idem. \quad (3)$$

Правомерно не считать η априорно универсальным инвариантом, а отнести эту характеристику к определенным системам (группам) русел. Рассмотрим в первую очередь характеристики равнинных рек средней полосы Европейской территории России (ЕТР). В условиях сравнительной ландшафтно-гидрологической однородности водосборов реки ЕТР образуют так называемую каскадно-русловую систему (КРС). В соответствии со структурной схемой, разработанной Н. А. Ржаницыным [16], порядок входящих в нее потоков возрастает от истоков к устью от I до XV. В дальнейшем будут рассматриваться реки VIII и более высоких порядков, формирующие свои русла в аллювиальных отложениях. Все их характеристики ставятся в соответствие руслоформирующим расходам воды (РФР), в качестве которых, согласно изложенному в работе [10], принимаются средние за многолетие максимальные расходы \bar{Q}_{\max} .

В комплексе характеристик КРС, разработанных Н. А. Ржаницыным, не представлен коэффициент гидравлических сопротивлений λ , зато приведены числа Лохтина для всех порядков рек. Этих данных достаточно для определения относительной шероховатости d/h (d — средний диаметр частиц дна), а за-

тем и коэффициента сопротивлений λ по формуле В. М. Маккавеева [14] для русловых потоков, формирующих шероховатость собственного ложа

$$\lambda \approx 0,22 \left(\frac{d}{h} \right)^{1/3}. \quad (4)$$

В структуре комплекса подобия (3) уклон дна I_0 одновременно отражает и потери энергии при движении потока, и литологические (грунтовые) условия, в которых формируется русло. Отсюда вытекает прямая целесообразность представления λ в функции I_0 . И такая возможность существует, поскольку в КРС устанавливается достаточно определенное соответствие этих характеристик

$$\left. \begin{aligned} \frac{d}{h} &= \alpha_w I_0^{1,5}, \\ \lambda &= \alpha_c I_0^{0,5}, \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где α_w и α_c — статистические параметры зависимостей относительной шероховатости и коэффициента сопротивлений от I_0 . Для однорукавных русел на плесовых участках получены значения: $\alpha_w = 95,2$; $\alpha_c = 1,0$. Плесы на реках, как правило, сопряжены с перекатными участками и образуют двуединые морфологические звенья «плес—перекат». Одна из причин образования перекатов — малая глубина залегания базального слоя, состоящего из трудноразмываемых отложений предшествующих геологических эпох. Поток взаимодействует непосредственно с частицами грунтов его кровли, перемещая по ней более мелкие русловые наносы. В этих условиях формируются двух- и многорукавные русла, а средние скорости потока в 1,4–1,6 раза превышают неразмывающие скорости V_n для русловых наносов [17]. Согласно известной формуле Б. И. Студеничкина [20],

$$V_n = 1,15 (hd)^{0,25} \sqrt{g}. \quad (6)$$

Если средняя скорость $V = 1,5 V_n$ является неразмывающей для частиц базального слоя, то их средняя крупность должна ориентировочно составлять $d_6 \approx 5d$. Из выражения (5) для двух- и многорукавных русел будем иметь: $\alpha_w = 476$; $\alpha_c = 1,71$.

Особую группу русел образуют предгорные и горные реки в собственных аллювиальных отложениях. Как показали З. Д. Копалиани и В. С. Цхададзе [13], их напластования сложнее и многообразнее, чем на равнинных реках, что объясняется не только поступлением наносов из вышележащих звеньев гидрографической сети, но и обвалами и осыпями со склонов. В связи с этим оценку связи $\lambda \sim I_0^{0,5}$ оказалось целесообразным выполнить непосредственно по результатам натурных наблюдений без использования каких-либо расчетных схем. Гидрометрические данные, приведенные в работе [13], позволили определить $\alpha_c = 1,36$. Близкое соотношение устанавливается из морфометрических зависимостей [5].

И, наконец, необходимо рассмотреть самоформирующиеся русла каналов и канализованных рек. Они создаются как самим потоком, так и регулирующим инженерным воздействием, которые проявляются в виде ограничивающих условий — естественной зарегулированности стока на канализованных реках или искус-

ственных мер по стабилизации береговой линии и предупреждению береговой эрозии. Само же формирование ложа остается свободным и сохраняет все его признаки, характерные для рек КРС. На подобные русла, формирующиеся в песчаных и слабо связных грунтах, может быть распространена формула О. М. Айвазяна [1] (ее параметры записываем соответственно представлению $\lambda = 2g/C^2$):

$$\lambda = 0,005 + 26,5 I.$$

В диапазоне $I = 0,00002 \dots 0,0006$ эта двухчленная формула аппроксимируется зависимостью (5) при $\alpha_c = 0,9$.

На рис.1 сопоставлены графики функции (5) для λ и значений по формулам и данным других авторов. Их достаточное соответствие не оставляет сомнений.

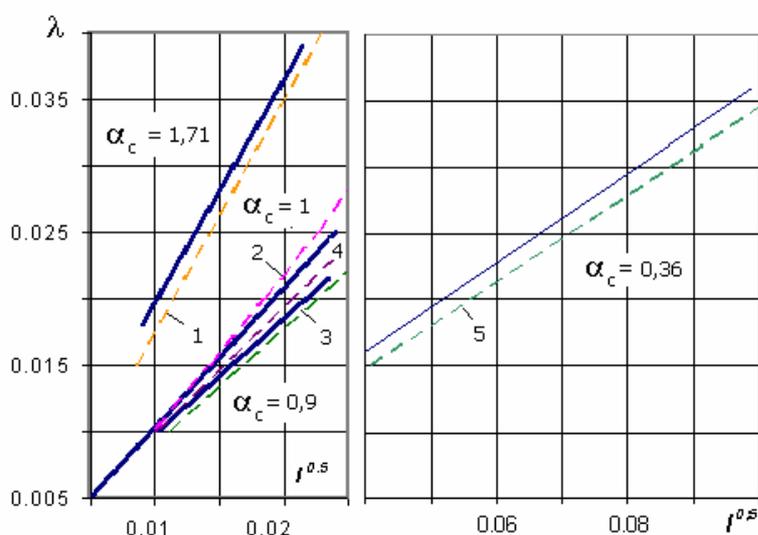


Рис. 1. Зависимость $\lambda = \alpha_c I^{0,5}$ (сплошные линии) и по формулам и данным:

1, 4 — В. И. Антроповского, 2 — А. Д. Альтшуля и У. Ван-Тейна,
3 — О. М. Айвазяна, 5 — И. Ф. Артамонова и др.

$\alpha_c = 1$ — однорукавные и $\alpha_c = 1,71$ — двух- и многорукавные русла равнинных рек,

$\alpha_c = 0,9$ — самоформирующиеся русла каналов и канализованных рек,

$\alpha_c = 0,36$ — аллювиальные русла предгорных и горных рек

Особо следует отметить почти полное совпадение λ для КРС, рассчитанных по (5) и формуле А. Д. Альтшуля и У. Ван-Тейна [2]:

$$C = \frac{14,8}{I^{1/6}} - 26.$$

Эта, казалось бы, простейшая эмпирическая зависимость, к тому же, еще не удовлетворяющая условиям размерности, вполне вписалась в пределы λ , полученные нами. Как ни парадоксально, но известная «академическая» формула А. Д. Альтшуля, безупречная с точки зрения полуэмпирической теории турбулентности, находится в явном противоречии с приведенными соотношениями, так как она выражает прямую, а не обратную зависимость C от уклона I .

$$\frac{B_o}{B_0} = 1,82; \quad \frac{h_o}{h_0} = 0,85; \quad \frac{I_o}{I_0} = 0,75.$$

Соответственно этому при $\alpha_c = 1,71$ получим соотношение между системными инвариантами двухрукавного и однорукавного русел:

$$\frac{\eta_d}{\eta_0} = \frac{0,85 * 1,82^{0,25} * 0,75^{0,125}}{1,72^{0,25}} = 0,83.$$

Следовательно, $\eta_d = 0,83 * 0,27 = 0,22$.

Обратимся к определяющим факторам руслоформирования. Важнейший из них — уклон дна I_0 , который для потока фиксированного порядка определяется как осредненная по его длине величина. Уклон I_0 находится в обратной зависимости от порядка реки и настолько тесной, что его можно рассматривать как системный параметр, обладающий физической природой, в отличие от порядкового индекса речной системы. Непосредственно от I_0 зависят две характеристики:

— относительная ширина образующихся в турбулентных потоках обособленных кинематических структур (макроструй), для которых ранее [9] установлено соотношение

$$\hat{b}_0 = \frac{B_0}{h} = a_0 / I^{0,25}, \quad (9)$$

— относительная ширина русла

$$\hat{b} = \frac{B}{h} = a_1 / I^{0,13}. \quad (10)$$

Общеизвестно, что относительная ширина русла является одной из важнейших характеристик русловых процессов. Не менее значимо и отношение \hat{b}_0 / \hat{b} : оно выражает как степень взаимного соответствия морфологических и кинематических структур, так и направленность руслоформирования. Превышение \hat{b} над \hat{b}_0 выражает тенденцию развития двух- и многорукавности, а при $\hat{b} < \hat{b}_0$ — наличие ограничивающих условий для боковой эрозии на каналах и реках с устойчивыми берегами.

Основные размеры русла h и B всецело зависят от уклонов дна I_0 и руслоформирующих расходов воды \bar{Q}_{\max} . Структура морфометрических зависимостей определяется на основе комплекса подобия (7) при следующих предпосылках и граничных условиях:

1) по результатам статистической обработки наблюдений для каждой группы (системы) русел получены значения параметра сопротивлений α_c и инварианта η ;

2) в самоформирующихся руслах соблюдается условие $\bar{Q}_{\max} = BhV_p$, где V_p — размывающая скорость, связанная с неразмывающей V_n соотношением $V_p = 1,4 V_n$, а диаметр частиц дна в формуле (6) определяется в зависимости от I_0 по выражению (5);

3) остается действительной формула Шези:

$$\bar{Q}_{\max} = \left(\frac{2g}{\alpha_c I_0^{0,5}} \right)^{0,5} B h^{1,5} I_0^{0,5}.$$

После соответствующих подстановок и преобразований исходных выражений устанавливается универсальная структура системно-групповых морфометрических зависимостей:

$$\left. \begin{aligned} h &= \frac{a_2}{I^{0,048}} \left(\frac{\bar{Q}_{\max}}{\sqrt{g}} \right)^{0,4}, \\ B &= \frac{a_3}{I^{0,178}} \left(\frac{\bar{Q}_{\max}}{\sqrt{g}} \right)^{0,4}. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Для аллювиальных русел предгорных и горных рек оказалось возможным принять морфометрические зависимости И. Ф. Артамонова и соавторов [5], близкие по структуре к универсальным с несущественной корректировкой параметров a_2 и a_3 .

Все полученные характеристики и параметры представлены в сводной табл. 1. Особо выделена КРС (однорукавные и двухрукавные русла). Остальные представлены как внесистемные группы русел (ВГР), поскольку их особенности зависят не только от общих физико-географических условий, но и от локальных факторов и воздействий.

Выборочное сравнение результатов расчета основных размеров русла по универсальным зависимостям и формулам других авторов позволило убедиться в том, что их расхождение остается в пределах интервала среднеквадратических погрешностей морфометрических связей, указываемых В. И. Антроповским [3]: $\pm 20\%$. Однако нельзя не отметить принципиальную несопоставимость универсальных зависимостей, выведенных на основе предпосылок подобия, и морфометрических, не удовлетворяющих условиям размерности. Кроме того, при выводе морфометрических зависимостей часто не учитывается различие русел в гидрометрических створах регулярных наблюдений и на участках рек, которым ставятся в соответствие те или иные типы русловых процессов.

Приведем пример двух поперечных сечений русла Нижней Зеи (рис. 3): в створе гидрологического поста Малая Сазанка (160 км от устья) и ниже по течению на участке Нижне-Петровского переката (70–90 км).

Если в верхнем створе русло находится в условиях свободного формирования ($\eta = 0,26$), то нижний створ — пример многорукавного русла, которое образовалось на кровле базального слоя из отложений легкоподвижных наносов, поступивших от размыва расположенных выше береговых склонов (так называемых Белых гор). Средняя крупность частиц базального слоя (2–5 мм) в четыре-пять раз превосходила диаметр русловых наносов. При углублении фарватера на перекатах Нижней Зеи оборот базальтового пласта повышал устойчивость прорезей и прилегающих частей дна (рис. 3, в).

Таблица 1

Системно-групповые характеристики гидравлических сопротивлений, инварианты и морфометрические параметры русел рек и земляных каналов при руслоформирующих (доминирующих) расходах воды

Система и группы русел					
Инварианты и гидравлические параметры			Характеристики русел и морфометрические параметры		
η	α_c	a_0	\hat{b}	h	B
			a_1	a_2	a_3
КРС		<i>Каскадно-русловая система равнинных рек VIII–XV порядков</i>			
1. Двухрукавные русла перекаатов					
0,22	1,71	3,43	45,8	0,20	9,62
2. Однорукавные русла плесов					
0,27	1,00	4,50	26,5	0,235	6,22
ВГР		<i>Внесистемные группы русел рек и земляных каналов</i>			
1. Многорукавные русла равнинных рек					
0,20	1,71	3,43	67,2	0,180	12,1
2. Самоформирующиеся каналы и канализованные реки					
0,33	0,90	4,72	12,4	0,311	3,87
3. Аллювиальные русла предгорных и горных рек					
0,38	0,36	7,50	11,7	0,265	3,11

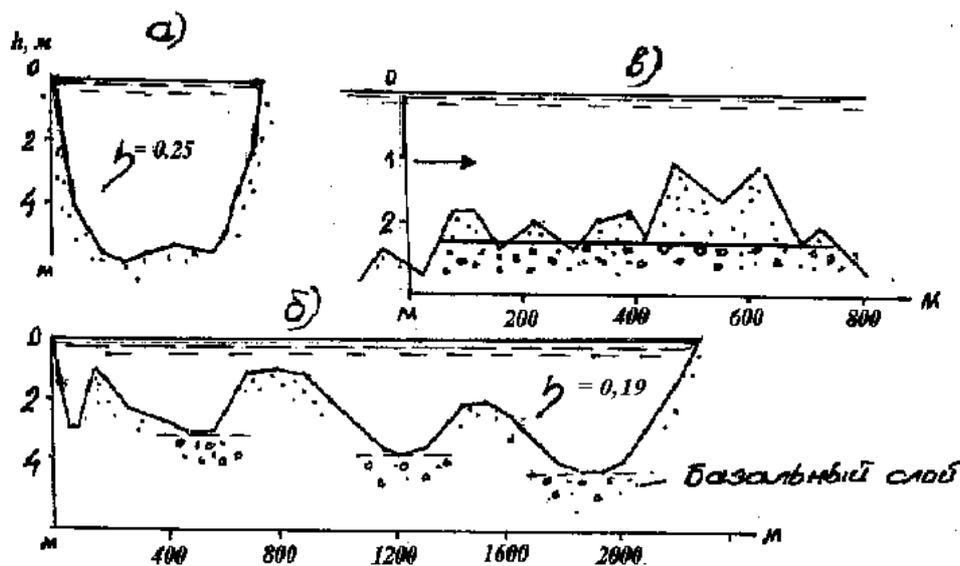


Рис. 3. Примеры поперечных сечений русла р. Зеи: а — ств. с. Малая Сазанка (160 км); б — на участке с. Н. Петровки (70–90 км от устья); в — схема дноуглубительной прорези на Нижне-Петровском перекаате

Системно-групповые характеристики, приведенные в табл. 1, отнесены к руслоформирующим или доминирующим расходам воды. При спаде половодий и паводков многорукавные русла равнинных рек и аллювиальные — горных и предгорных рек разветвляются на обособленные водотоки. Оценка их морфометрических характеристик в общем случае — трудноразрешимая задача. Но такая возможность существует для русел КРС.

Вернемся к равенству (1), которое после подстановки Q по формуле Шези приводит к зависимости для коэффициента сопротивления

$$\lambda = 2M^4 \widehat{b}I. \quad (12)$$

Но непостоянство M , на которое указывалось выше, не позволяет принять (12) в качестве расчетной оценки λ . Так поступил Б. Ф. Снищенко [19], ограничившись лишь указанием на пропорциональность $\lambda \sim \widehat{b}I$.

Тем не менее, параметр M не теряет своего важного методологического значения. Дело в том, что, оставаясь зависимым от уклона потока, согласно (8), M сохраняет относительное постоянство при более низких, чем в половодье, наполнениях русла. В этом смысле M можно назвать локально-амплитудным инвариантом. После подстановки выражения M по выражению (8) будем иметь

$$\lambda = 2\eta^4 \widehat{b}_{\text{л}} I_{\text{л}} / I_0^{0.5}. \quad (13)$$

Здесь $\widehat{b}_{\text{л}}$ и $I_{\text{л}}$ — соответственно локальные значения относительной ширины русла и уклона свободной поверхности в рассматриваемом створе при расходах $Q < Q_{\text{рф}}$. Очевидно, если $Q = Q_{\text{рф}}$, то $\widehat{b} = \widehat{b}_{\text{л}}$, $I = I_{\text{л}}$. Соблюдение этого условия требует равенства

$$2\eta^4 \widehat{b}_{\text{л}} \approx \alpha_c \approx 1, \quad (14)$$

что с погрешностью 15–20% обеспечивается на реках IX–XV порядков.

Расчетная зависимость для коэффициента Шези получает вид

$$C = \left(\frac{gI_0^{0.5}}{\eta^4 \widehat{b}_{\text{л}} I_{\text{л}}} \right)^{0.5}. \quad (15)$$

Применительно к конкретному створу принимается уточненное значение инварианта η по условию (14).

Формула (15) в качестве одного из определяющих факторов включает относительную ширину русла $\widehat{b}_{\text{л}}$. Повышение уровня воды сопровождается уменьшением $\widehat{b}_{\text{л}}$, а следовательно, и снижением гидравлических сопротивлений. Этот факт общеизвестен [6]. Его объясняют уменьшением коэффициента шероховатости русла при больших наполнениях. Но такое объяснение спорно: разве условия обтекания дна и особенно берегов при высоких уровнях более благоприятны, чем при низких? Напротив, меженные русла равнинных рек находятся под более продолжительным воздействием потока, чем в половодье, и неизбежно должны отличаться лучшей обтекаемостью своих форм. Снижение гидравлических сопротивлений при уменьшении \widehat{b} объясняется более высокой гидродинамической устойчивостью потока при высоких уровнях, сокращением

или полным отсутствием очагов интенсивной диссипации энергии – зон внутреннего раздела течения на струи и ветви, как это наблюдается в межень или близкие к ней фазы водного режима.

Из структуры (15) вытекают парадоксальные, на первый взгляд, соотношения, используемые в гидрометрии при экстраполяции расходов воды до наивысших уровней, а именно — пропорциональность средней скорости потока корню из средней глубины $V \sim \sqrt{h}$ или даже самой глубине $V \sim h$ (рис. 4). Первое из этих соотношений составляет основу метода Стивенса, получившего развитие в ГГИ (Д. Е. Скородумов и Р. А. Шестакова [22]). Линейная пропорциональность использовалась в Гидропроекте М. П. Сасоровым [18]. Каждый из авторов обосновывал свои предложения достаточно большими объемами данных наблюдений на реках и отвергал правомерность других решений. Метод Стивенса клеймился даже как порочный. Между тем, согласно формуле (15), вариант $V \sim \sqrt{h}$ вполне реален, если относительная ширина \tilde{b} мало изменится с уровнями воды, что соответствует близкой к треугольной форме поперечного сечения. Вместе с тем в каньонообразных руслах постоянной или мало изменяющейся ширины реализуется линейная пропорциональность $V \sim h$, если не во всем диапазоне измерения расходов воды, то, по крайней мере, для их средних и высоких значений. Нетрудно убедиться в том, что при параболической форме русла, согласно (15), будет соблюдаться пропорциональность $V \sim h^{0,75}$. Формула Шези—Маннинга при малых изменениях коэффициента шероховатости n и уклона I приводит к соотношению $V \sim h^{2/3}$.

Реальность двух крайних вариантов характеризует рис.4, на котором представлены створы двух рек – Волги и Пшиша. Как видим, каждая из спорящих сторон [18] и [22] была по-своему права.

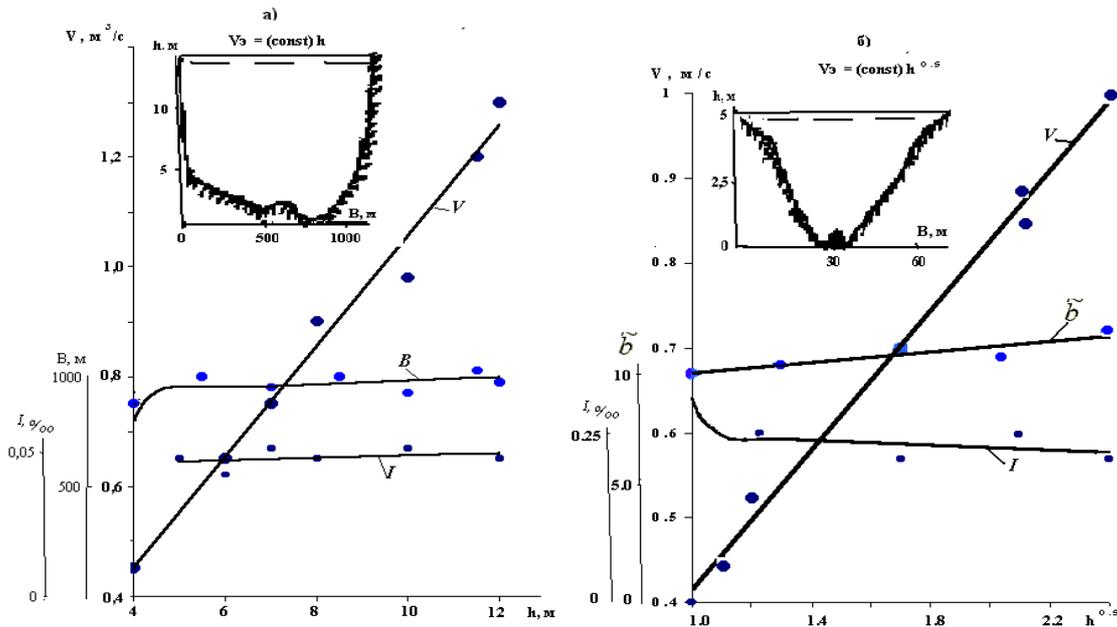


Рис. 4. Поперечные сечения русел и графические зависимости для экстраполяции средних скоростей и расходов воды:

a — р. Волга — г. Чебоксары (1957 г.); b — р. Пшиш — ст. Бжедуховская (1953 г.)

В заключение можно сказать, что, несмотря на сложность процессов руслоформирования и генезиса гидравлических сопротивлений, их систематизация и упорядочение вполне возможны. При этом не только не игнорируются, но находят свое место результаты, полученные ранее, а морфометрическая статистика ставится в рамки четких физических предпосылок и граничных условий.

Выполненное исследование различных русел не является исчерпывающим. При дальнейшем изучении процессов руслоформирования во всей их полноте важно не постулировать ограниченность русловых комплексов, а признать их многообразие, которому естественно противопоставить системный подход и законы подобия. Именно на этой основе стало возможным получение новых оценок гидравлических сопротивлений, инвариантов руслоформирования и параметров универсальных морфометрических зависимостей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Айвазян О. М. К расчету пропускной способности земляных каналов и русел // Гидротехническое строительство. 1989. № 1. С. 18–20.
2. Альтиуль А. Д., У-Ван-Тейн. Сравнение формул без коэффициента шероховатости для определения средней скорости течения воды в реках // Гидротехническое строительство. 1973. № 1. С. 41–42.
3. Антроповский В. И. Гидроморфологические зависимости и их дальнейшее развитие // Труды ГГИ. 1969. Вып. 169. С. 34–86.
4. Антроповский В. И. Режимы сопротивлений в необлицованных руслах // Гидротехника и мелиорация. 1984. № 4. С. 32–37.
5. Артамонов И. Ф., Крошкин А. Н., Талмаза В. Ф. Гидроморфометрия устойчивых участков русел горных рек // Труды IV Всесоюзного гидрологического съезда. Л., 1976. Т. 10. С. 50–60.
6. Барышников Н. Б. Гидравлические сопротивления речных русел. СПб., 2003.
7. Гришанин К. В. Динамика русловых потоков. Л., 1969.
8. Железняков Г. В. Пропускная способность русел каналов и рек. Л., 1981.
9. Карасев И. Ф. Русловые процессы при переброске стока. Л., 1975.
10. Карасев И. Ф. Руслоформирующий эффект половодий и паводков // Гидротехническое строительство. 1990. № 7. С. 9–12.
11. Карасев И. Ф. Морфометрические инварианты русловых потоков // Труды Академии водохозяйственных наук. М., 1995. Вып. 1. С. 19–27.
12. Кондратьев Н. Е., Попов И. В., Смищенко Б. Ф. Основы гидроморфологической теории руслового процесса. Л., 1982.
13. Копалиани З. Д., Цхакадзе В. С. Типы речных русел Западной Грузии // Труды ГГИ. 1972. Вып. 195. С. 20–32.
14. Маккавеев В. М. Распределение продольных и поперечных скоростей в открытых потоках // Труды ГГИ. 1947. Вып. 2. С. 3–36.
15. Михалев М. А. Теория подобия и размерностей. СПб., 2001.
16. Ржаницын Н. А. Морфологические и гидрологические закономерности строения речной сети. Л., 1960.
17. Савцова Т. М. Критериальный график видов разветвленного русла // Вопросы гидрологии суши. Л., 1991. С. 177–180.
18. Сасоров М. Л. О влиянии формы сечения на линейную зависимость средней скорости потока от глубины // Гидротехническое строительство. 1965. № 7. С. 15–19.
19. Смищенко Б. Ф. О связи высоты песчаных гряд с параметрами речного потока и русла // Метеорология и гидрология. 1980. № 6. С. 84–90.
20. Студеничников Б. И. Размывающая способность потока и методы русловых расчетов. М., 1964.

21. Чалов Р. С., Алабян А. М., Иванов В. В. и др. Морфодинамика русел равнинных рек. М., 1998.

22. Шестакова Р. А. Использование гидравлических зависимостей для определения расходов воды в беспойменных руслах // Труды ГГИ. 1969. Вып. 150. С. 29–43.

23. Park C. C. World-Wide Variations in Hydraulic Channels: Ananalysis and Some Observations // Jor. of Hydrology. Vol. 33. № 2½, March 1977. P. 133–146 .

24. Raudkivi A. J. Keynote Lecture: Loose Boundary Hydraulics — Grey Zones, River Sedimentation. Rotterdam, 1999.

I. Karasseff

HYDRAULIC RESISTANCES AND MORPHOMETRY OF SELF-FORMING RIVERS CANALS

Dependencies of hydraulic resistance upon the slopes of free water surfaces flows are validated in the article; invariants of similarity and morphometric characteristics of self-forming rivers and canals according to the systems and groups are obtained.