

## МОРФОЛОГИЯ РЕЧНОГО РУСЛА И ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ЕЕ ПРИРОДНЫЕ ФАКТОРЫ

Система "поток-русло", как отметил К.В.Гришанин /1979/, является одной из самых сложных самоуправляемых систем неживой природы. Как это обычно для больших систем, она является частью ландшафтной геосистемы, вовлекается в сферу территориально-производственных систем. Одновременно система "поток-русло" состоит из большого количества иерархически построенных подсистем, которые в потоке выражены каскадом вихревых структур, а в русле - соответствующими вихрям структурными уровнями руслового рельефа. Взаимодействие между потоком и руслом, по М.А.Великанову /1958/, и определяет содержание руслового процесса. В результате этого взаимодействия происходит развитие системы "поток-русло", при этом в потоке возникает сложная турбулентность, а в русле формируется русловой рельеф.

Система "поток-русло" в основе своей диссипативная. Для участка русла, не претерпевающего в среднем за характерные промежутки времени однонаправленных изменений, диссипация энергии  $\Phi$  может быть выражена через внешние параметры системы - расход воды  $Q$  и уклон свободной поверхности  $I$ :

$$\Phi = \rho g Q I \quad (1)$$

С другой стороны, диссипация энергии может быть выражена через внутренние параметры системы. По гипотезе А.Н.Колмогорова удельная диссипация энергии выражается формулой

$$\epsilon = k q^{3/2} / \lambda, \quad \text{где } q = u_1^2 + u_2^2 + u_3^2$$

$u_i$  - проекция вектора скорости на  $i$ -тую координату,  $\lambda$  - характерный линейный масштаб системы,  $k$  - коэффициент.

Эта гипотеза, выдвинутая из соображений подобия, полностью соответствует представлениям о виде диссипативного члена в уравнениях гидравлики. С использованием последнего диссипация энергии  $\Phi$  выражается формулой

$$\Phi = \frac{\rho g}{c^2} \frac{v^3}{H} F,$$

где  $v$  - средняя скорость потока,  $H$  - средняя глубина,  $F$  - площадь живого сечения,  $\rho$  и  $g$  - плотность воды и ускорение сво-

бодного падения. Коэффициент сопротивления  $C$  в свою очередь является сложной функцией внешних факторов руслового процесса и морфологии русла:  $C = f(N/d; N/h_T; L_T/h_T; B/N_m; L_n/L_T; b/B \dots)$   
Сравнивая формулы (1) и (2), получаем:

$$Q I_0 = \frac{1}{c^2} \frac{V^3}{H^2} F \quad (3)$$

Величины  $Q$  и  $I_0$ /уклон дна долины/ задаются условиями в системе более высокого уровня, чем система "поток-русло" и чаще всего, в масштабе временного осреднения несколько десятков лет, неизменны. В то же время морфометрические параметры русла при неизменных  $Q$   $I_0$  могут изменяться в разнообразных сочетаниях. Исходя из (3), система "поток-русло" имеет как минимум 8 степеней свободы: ширину русла  $B$ , глубину  $H$ , расстояние от тальвега до берега  $b$ , максимальную глубину  $H_m$ , извилистость  $P$ , высоту гряд  $h_T$ , длину гряд  $L_T$ , длину низового откоса гряд  $L_n$ . Если учитывать, что в русле обычно сосуществует несколько рангов русловых форм, то число степеней свободы /т.е. морфометрических характеристик русла и его элементов/ значительно увеличивается. Этому соответствует бесконечное количество состояний равновесия системы. Элементарные расчеты показывают, что если известны только величины  $Q$  и  $I_0$ , то морфологический тип русла остается неопределенным. На рис. 1 показана область существования морфометрических характеристик русла /извилистости, относительной ширины/ при  $Q = 100 \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $I_0 = 0,0003$ , коэффициенте шероховатости  $n = 0,02$  и скоростях потока в диапазоне  $0,6-2,5 \text{ м/с}$ . В этой области располагаются все главные морфологические типы русел - прямолинейные, извилистые и разветвленные на рукава.

В то же время многочисленные факты доказывают очень большую устойчивость морфологического типа каждого конкретного русла. Так, например, участок меандрирующей реки Истуйт в среднем Уэльсе в октябре 1969 г. был спрямлен и превращен в канал, однако уже через год начал восстанавливаться меандрирующий тип русла /Lewin, 1976/. В русло этой реки с 1800 по 1920 гг. сбрасывались отходы горного производства. В результате узкое одорукавное меандрирующее русло к 1904 г. превратилось в широкое малоизвилистое русло с осередками и пойменной рукавностью. Но после прекращения антропогенного воздействия прежний морфологиче-

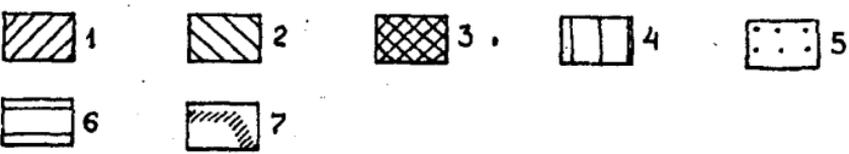
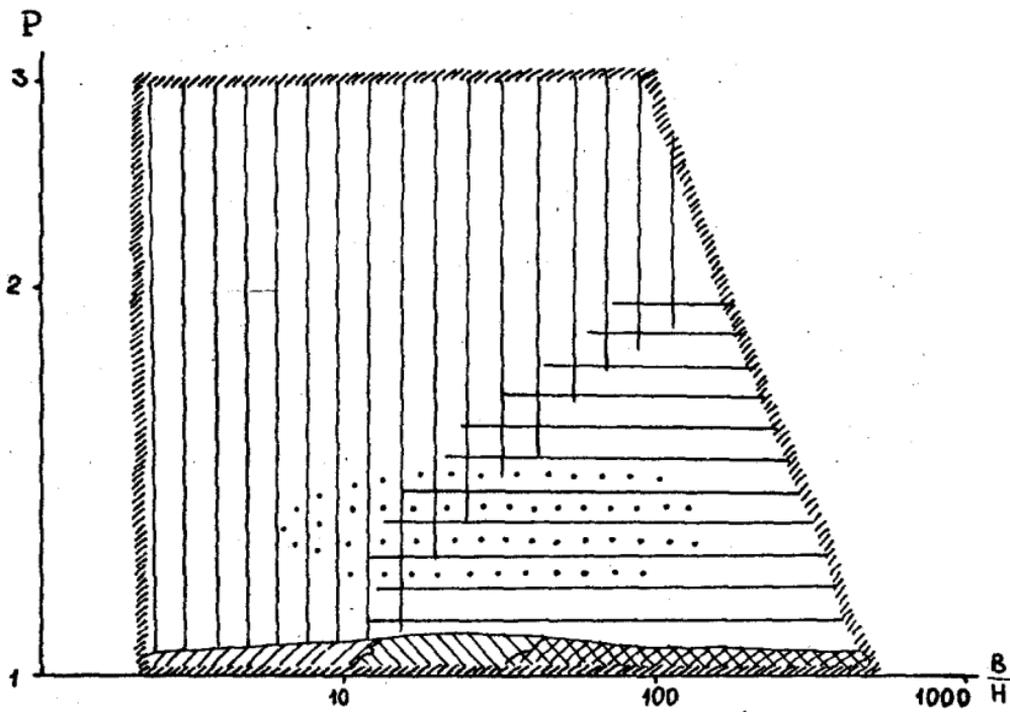


Рис. 1. Диапазон возможного изменения морфологии речного русла при неизменных расходе воды, уклоне дна долины и шероховатости русла. Области существования морфологических типов русла: 1 - прямолинейного с ленточными грядами; 2 - прямолинейного с побочными; 3 - прямолинейного с осередками; 4 - меандрирующего; 5 - разветвленно-извилистого; 6 - с пойменной многорукавностью; 7 - границы области изменения морфологии русла при заданных условиях  $Q = 100 \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $I_0 = 0,0003$ ,  $n = 0,02$ .

ский тип русла начал восстанавливаться, и к 1978 г. русло реки снова стало узким и однорукавным /но еще малоизвилистым/ Lewin, Bradley, Masklin, 1983/. Даже в нижних бьефах гидроузлов, несмотря на значительную перестройку руслового рельефа, морфологический тип русла чаще всего не изменяется. Так, в нижнем бьефе Новосибирской ГЭС на Оби в пределах 10-километрового участка глубиной эрозии русло осталось многорукавным, хотя на некоторых участках произошло усложнение существующих, а на других образование новых узлов разветвлений /Чалов, 1979/. Лишь в результате очень значительных изменений стока воды и наносов или ландшафта водосбора морфологический тип русла конкретной реки кардинально меняется.

Столь же консервативны во времени средние за характерный период многолетней изменчивости стока размеры отдельных элементов русла или даже русловых микроформ.

Противоречие между динамичностью морфологии речного русла, бесконечным количеством возможных сочетаний геометрических характеристик элементов руслового рельефа с одной стороны и большой устойчивостью морфологии русла и консервативностью размеров основных его геометрических параметров с другой объясняется наличием большого количества природных факторов, контролирующих эти морфологические параметры русла.

В рамках существующих представлений о связях между морфологией речного русла и определяющими ее природными факторами можно предложить определенную последовательность уменьшения числа степеней свободы системы "поток-русло", т.е. расчета размеров основных геометрических характеристик русла и его элементов.

Из таблицы I следует, что несмотря на существование обратных связей - взаимозависимости переменных из числа геометрических характеристик русла, во всех расчетных формулах присутствуют переменные из числа внешних факторов руслового процесса. И количество информации об этих факторах должно увеличиваться по мере уменьшения числа степеней свободы системы и устранения неопределенности в морфологии элементов руслового рельефа. Как видно из рис.2, количество внешних природных факторов, необходимых для устранения неопределенности состояния системы "поток-русло", увеличивается приблизительно втрое быстрее, чем умень-

Таблица 1. Факторы руслового процесса, необходимые для расчета морфологических элементов речного русла

Зависимые переменные /из числа морфологических элементов русла/	Расчетные формулы /нумерация по обзору Сидорчука, Михинова, 1985/	Независимые переменные	
		морфологические элементы русла	факторы руслового процесса
$L_T$ $h_T$	2.39; 2.40; 2.49	В, Н, Р	$d, b, \rho_s, \rho_w,$ гидрограф, $t^\circ, Q, I_0, S$
Р $H_m$	4.95; 4.129 4.69; 4.112	В, Н, $h_T$ $L_T$	$d, b, \rho_s, \rho_w,$ гидрограф, $t^\circ, Q, I_0, S, H_T, T$ инж.-геол. свойства грунтов берега
Н	формула расхода воды	В, Р, $h_T, L_T$	
В	гидролого-морфометрические зависимости	-	то же плюс ландшафт водосбора, гидрологический режим потока, история развития долины

Примечание:  $d$  - средний диаметр донных грунтов,  $b$  - среднеквадратическое отклонение /сортированность донных грунтов/,  $\rho_s$  и  $\rho_w$  - плотности донных грунтов и воды,  $S$  - концентрация взвешенных наносов,  $H_T$  - высота берега,  $t^\circ$  - температура воды,  $T$  - время развития излучин.

шается число степеней свободы.

Таблица 1 и рисунок 2 определяют принцип корректности руслового анализа, согласно которому для достижения необходимой точности расчета геометрии речного русла необходимо знание соответствующего количества внешних факторов руслового процесса. Располагая информацией о 9 факторах руслового процесса, возможно рассчитать размеры элементов форм внутрируслового рельефа. Для определения характеристики формы живого сечения русла и его извилистости необходимо уже порядка 20 внешних факторов. Полную

## ФАКТОРЫ

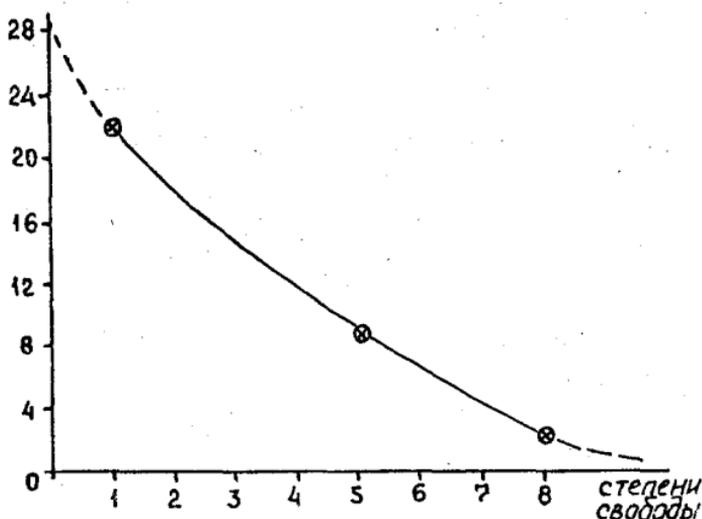


Рис. 2. Соотношение числа степеней свободы системы "поток-русло" и известных внешних природных факторов.

морфологическую характеристику русла только теоретическим путем в настоящее время дать невозможно. Для определения важнейшего геометрического параметра русла — ширины  $B$  приходится для конкретных ландшафтно-геоморфологических условий создавать эмпирические гидролого-морфометрические зависимости /что резко увеличивает число фактически привлекаемых природных факторов/.

Из этого принципа, в частности, вытекает, что невозможно рассчитать с необходимой для практики точностью размеры речного русла, оперируя только обычными в гидролого-морфометрическом анализе величинами  $Q$ ,  $I$  и  $d$ . Иллюстрацией сказанному является то многообразие расчетных размеров проектируемого канала переброски "Сибирь — Средняя Азия", полученных для одних и тех же расходов воды по морфометрическим зависимостям разных авторов.

При этом полностью упускается из виду стохастическая природа формирования руслового рельефа. Русловой рельеф представляет собой отражение в размываемом ложе вихревых структур потока, но только тех из них, которые при взаимодействии с руслом на начальном этапе развиваются быстрее, чем другие, а затем становятся стабильнее других. При этом отображении непрерывного широкополосного спектра структур потока возникает хотя и полнуполос-

ный, но также непрерывный спектр русловых структур. И каждая русловая форма образует кластер и описывается не одним характерным размером, а некоторой кривой распределения размеров.

Наличие для каждого морфологического элемента русла подобной кривой распределения делает русловой анализ в общем случае неоднозначным даже при полном учете всех природных факторов /что затруднительно, ибо многие из них также имеют вероятностную природу/. В общем случае можно оценить только параметры кривых распределения морфометрических характеристик русла.

Подобный вывод о принципиальной неоднозначности руслового анализа не означает, что практическое использование его невозможно. В каждом конкретном случае в практике хозяйственного использования речных русел требуется знание значений морфометрических элементов русла некоторой заданной обеспеченности. В настоящее время возникает целое направление руслового анализа, в рамках которого основное внимание уделяется формулировке принципов стохастического описания взаимодействия в системе "поток-русло".

#### Литература

Великанов М.А. Русловой процесс. М.: Физматгиз, 1958, 396 с.

Гришанин К.В. Динамика русловых потоков. Л.: Гидрометеиздат, 1979, 312 с.

Сидорчук А.Ю., Михинов А.Е. Морфология и динамика руслового рельефа. - В кн.: "Гидрология суши", т.5. /Итоги науки и техники, ВИНТИ АН СССР/. М.: 1985, с. 5-160.

Чалов Р.С. Географические исследования русловых процессов. М.: изд-во Моск. ун-та, 1979, 234 с.

Lewin J. Initiation of bed form and meanders in coarse grained sediment. - Bull. Geol. Soc. Amer., 1976, 57, n 2, p. 281-285.

Lewin J., Bradley S.B., Macklin M.G. Historical valley alluviation in mid-Wales. - Geol. J., 1983, 18, n 4, p. 331-350.