

УДК 556.537

А. Ю. СИДОРЧУК 

ЗАВИСИМОСТЬ ПАРАМЕТРОВ РЕЧНЫХ ИЗЛУЧИН ОТ КРУПНОМАСШТАБНЫХ ТУРБУЛЕНТНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ

Причины, влияющие на размеры речных излучин, до сих пор полностью не выяснены. Большинство исследователей считает, что длина шага и радиус изгиба излучин приблизительно пропорциональны корню квадратному из расхода воды реки. Относительно влияния других характеристик потока на параметры меандр общего мнения нет, так как до сих пор само происхождение речных излучин не получило объяснения. В последнее время преобладает точка зрения, что извилистость заложена в самой структуре речного потока, что изгибы струй потока первичны и что только в результате их наличия появляются поперечная циркуляция, неравномерность скоростного поля и иные вторичные явления, которые хотя и поддерживают существование изгиба потока, но не являются его первопричиной. М. А. Великанов, Н. И. Маккавеев полагают, что в большинстве своем формы руслового рельефа связаны с макромасштабными турбулентными образованиями, т. е. являются отпечатками макровихрей на размываемом ложе потока. В настоящей статье мы попытаемся показать, что и образование речных излучин связано с проявлением в геометрии русла турбулентных вихрей максимально возможных для данного потока размеров. Для этого запишем уравнения для плотности кинетической энергии осредненного турбулентного движения

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial E_s}{\partial t} = \bar{u}\bar{X} - Dis_1 \quad (1)$$

и для средней плотности кинетической энергии пульсационного движения

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial E_t}{\partial t} = -Dis_2 + A \quad (2)$$

для случая равномерного движения (т. е. пренебрегая инерционными членами) [3, ч. 1]. Здесь E_s — кинетическая энергия осредненного движения; u — средняя скорость; X — массовая сила; Dis_1 — диссипация энергии осредненного движения за счет турбулентной вязкости; ρ — плотность воды; E_t — кинетическая энергия турбулентных пульсаций; Dis_2 — диссипация турбулентной энергии; A — слагаемое, описывающее обмен энергией между осредненным и пульсационным движениями. Учитывая гипотезу о “каскадном процессе” передачи энергии в иерархии турбулентных вихрей, уравнение (1) интерпретируется как изменение кинетической энергии потока в зависимости от вклада массовых сил (uX) и перехода энергии к крупномасштабным возмущениям (Dis_1). Уравнение (2) описывает баланс турбулентной энергии крупномасштабных вихрей, определяемый поступлением энергии от осредненного движения (A) и перехода энергии к возмущениям меньшего порядка (Dis_2). Отсюда видно и несложно доказывается, что $A = Dis_1$, тогда для установившегося движения ($\frac{\partial}{\partial t} = 0$) получаем:

$$\bar{u}\bar{X} = Dis_2 \quad (3)$$

Для речного потока массовая сила X есть составляющая силы тяжести gI , где g — ускорение силы тяжести; I — уклон. Диссипация энергии крупномасштабных возмущений, согласно второй гипотезе подобия Колмогорова [3, ч. 2], однозначно определяется соотношением E_t и характерного линейного масштаба турбулентности λ . Из соображений размерности устанавливается [3, ч. 1] единственная связь в виде

$$Dis_2 = k \frac{E_t^{3/2}}{\lambda} \quad (4)$$

и тогда из (3) и (4) получаем

$$\lambda = k \frac{E_t^{3/2}}{\bar{u} g I} \quad (5)$$

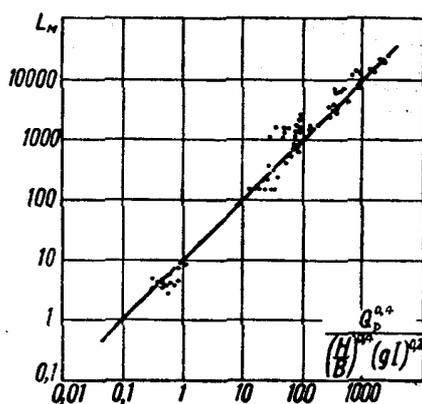
Коэффициент k определяется степенью сопротивления потоку русла, в дальнейшем для простоты полагается постоянным. Если характерные размеры меандр (радиус кривизны R и шаг меандр L) подчиняются зависимости (5), то связь извилин потока с крупномасштабными возмущениями будет доказана. Перепишем (5) в виде, принятом для гидроморфологических формул. Для этого предположим, что средние скорости течения и скорости пульсаций u' в крупномасштаб-

ных возмущениях одного порядка $\frac{E_t^{3/2}}{\bar{u}} \cong \bar{u}^2$.

Заменяя u через Q_p/BH , где Q_p — руслоформирующий расход воды; B — ширина и H — глубина русла, и вводя хорошо проверенную [4] связь $L=k_1B$, получим

$$L = k_2 \frac{Q_p^{0.4}}{\left(\frac{H}{B}\right)^{0.4} (gI)^{0.2}} \quad (6)$$

На рисунке приведен график зависимости (6) по материалам, собранным из трудов различных авторов для излучин рек Австралии, Индии, США и микрорек в экспериментальных русловых лотках. Разброс точек объясняется неоднозначностью выбираемой исследователями величины руслоформирующего расхода, тем, что B и H не осреднялись по руслу, а определялись в закрепленных створах и неучетом различий в сопротивляемости русел. Тем не менее, связь достаточно хорошая, чтобы оценить достоверность предложенной формулы. Отсюда следует,



что турбулентные вихри крупного масштаба и определяют геометрию извилистого русла.

Связь значений длины шага излучины (1), вычисленных по формуле автора и замеренных различными исследователями в натуре и лаборатории

В заключение отметим, что зависимость (6) весьма близка к большинству эмпирических формул, связывающих размеры меандр с характеристиками потока [1]. Получает объяснение и обратная зависимость размеров меандр с коэффициентом устойчивости русла K_c , которая отмечается в работах [2, 5]. Ведь относительная глубина растет с увеличением стабильности K_c русла. Если принять $K_c \sim H/B$, то (6) будет иметь вид:

$$L = k_2 \frac{Q_p^{0.4}}{K_c^{0.4} (gI)^{0.2}} \quad (7)$$

что при $Q_p = \text{const}$ близко соответствует экспериментальной зависимости $L = \frac{1}{\sqrt{K_c}}$ в работе [2].

Таким образом, размеры излучин в основном зависят от величины руслоформирующего расхода воды, степени стабильности русла. Сравнительно второстепенным является влияние на размеры излучин уклона. Поэтому экспериментаторы не всегда улавливают его влияние, и во многих эмпирических формулах уклон не участвует.

ЛИТЕРАТУРА

1. Антроповский В. И. Гидроморфологические зависимости и их дальнейшее развитие. "Тр. ГГИ", вып. 169. Л., 1963.
2. Маккавеев Н. И., Хмелева Н. В., Гун Гоюань. Свободные меандры. В сб.: "Экспериментальная геоморфология", вып. 2. Изд-во МГУ, 1969.
3. . Монин А. С., Яглом А. М. Статистиче-

ская гидромеханика, чч. 1—2. М., “Наука”, 1965—1967.

4. Leopold L. B., Wolman M. G. River meanders. “Bull. Geol. Soc. Amer.”, 1970, vol. 96, No. 1.
5. Schumm S.A, River Metamorphosis “J. Hyd. Div. Proc. Amer. Soc. Civ., Eng.”, 1969, vol. 95, No. 1.

Поступила в редакцию 12 апреля 1974 г.

Аспирант кафедры геоморфологии. Представлено к печати проф. Н. И. Маккавеевым