

© О.Н. МЕЛЬНИКОВА, Е.В. ПЛЕТНЕВА,
член-корреспондент РАН Л.Н. РЫКУНОВ

ФИЗИЧЕСКИЙ МЕХАНИЗМ ОБРАЗОВАНИЯ РЕЧНЫХ ИЗЛУЧИН

1. Обычно результаты расчетов русловой эрозии весьма противоречивы и редко достоверно описывают реальную картину. В настоящее время убытки от неверных расчетов велики во всех странах. Причина — отсутствие в основе существующих методик прогноза адекватной физической модели образования гряд на дне потока и формирования русел рек в паводок.

Экспериментальные и натурные исследования образования гряд на дне потока позволили нам предложить физический механизм этого явления [1]. Основные положения этой модели заключаются в следующем:

при натекании воды на препятствие на дне или при постепенном изменении скорости течения вдоль оси потока (например, при изменении глубины в этом направлении) на поверхности воды возникает волна, бегущая вверх по потоку с фазовой скоростью, равной скорости потока, из-за чего гребень такой стационарной волны "застывает" неподвижно;

при постоянном расходе воды в прямом канале под гребнем волны скорость потока меньше, чем под впадиной; в области торможения (от впадины до гребня) при увеличении динамического давления и действии сил вязкости в придонном погранслое может возникнуть противоток и образоваться вихрь;

из-за неравенства скорости течения в верхней и нижней точках вихря существует разность давления: вихрь поднимается вверх, унося донные частицы, захваченные вращающейся массой воды; в месте отрыва вихрей образуется промоина на дне;

поднимаясь вверх, вихрь вовлекает во вращение окружающую жидкость, в результате чего интенсивность вихря падает, а частицы, унесенные со дна, выпадают; ниже по течению от зоны отрыва насыпается гряда (чем дальше от зоны отрыва, тем выше гряда);

стационарная волна усиливается на сформированных ею грядах и при достижении критической крутизны волны A_1/λ_1 (A — амплитуда, λ — длина волны) распадается на более длинные волны λ_2, λ_3 ($\lambda_1 < \lambda_2 < \lambda_3$), имеющие трехмерную структуру и ту же фазовую скорость; эти волны формируют гряды в соответствии с механизмом, изложенном выше; продольные и поперечные размеры волн и гряд совпадают.

Длина волн и гряд до и после распада определяется отношением ширины потока B к его глубине H и числом Фруда $Fr = U(gH)^{-1/2}$, где U — максимальная в поперечном сечении скорость потока, g — ускорение силы тяжести.

Дальнейшие исследования показали, что образование речных излучин в паводок непосредственно связано с формированием гряд на дне потока: в паводок формируются трехмерные гряды длиной в десятки и сотни глубин потока, с гребнями, расположенными в шахматном порядке. При малых расходах в межень поток обгибает эти гряды, образуя излучины, шаг которых равен длине гряд.

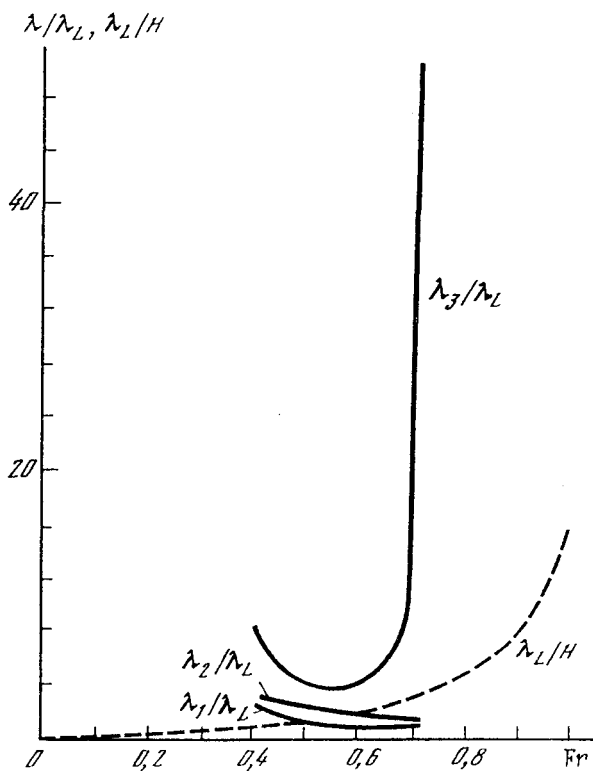


Рис. 1

2. Для проверки этой гипотезы в первую очередь была получена экспериментальная зависимость параметров трехмерных гряд, формирующихся после распада волн, от числа Фруда $\lambda_1(Fr)$, $\lambda_2(Fr)$, $\lambda_3(Fr)$. Экспериментальная установка подробно описана в [2]. На рис. 1 приведены полученные данные для потока с отношением $V/H = 20$. Длины волн нормированы на длину волны λ_L , соответствующей дисперсионному соотношению линейного волнового уравнения для данного числа Фруда.

Для всех чисел Фруда выполняется условие распада: $K_1 = K_2 + K_3$, где $K_i = 2\pi/\lambda_i$ – волновое число.

Спектральный анализ записи отклонений поверхности воды и дна от невозмущенного уровня показал, что волна (гряда) максимальной длины имеет максимальную амплитуду.

При увеличении числа Фруда значения λ_1 и λ_2 сближаются и стремятся к единому пределу λ_L , а длина волны (гряды) максимальной амплитуды стремится при этом к бесконечности. Таким образом, для достаточно больших чисел Фруда распад волн не происходит, а длина волны определяется линейным волновым уравнением.

3. Из приведенных на рис. 1 данных следует, что для чисел Фруда, превышающих значение 0,55, происходит быстрый рост длины волны максимальной амплитуды λ_3 , величина которой может составить десятки и сотни глубин потока. Такой же порядок величин имеют обычно и шаги излучин на реках.

Известно, что излучины на реках формируются в паводок при так называемых руслоформирующих расходах воды. Анализ натуральных данных показывает, что на

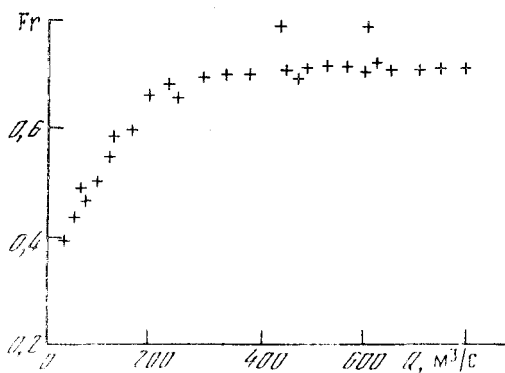


Рис. 2

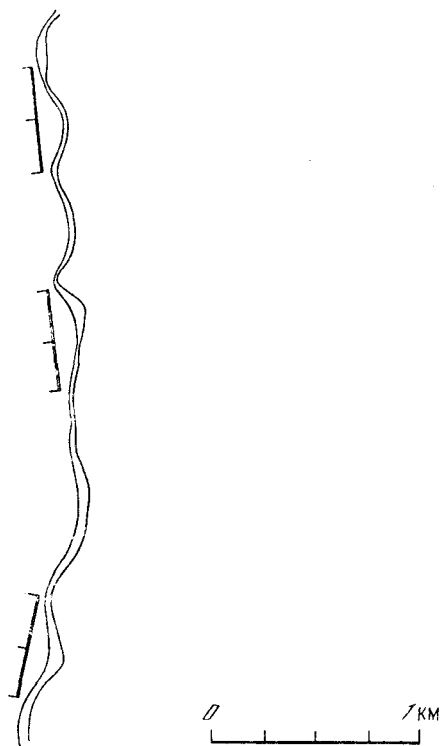


Рис. 3

меандрирующих реках при увеличении расхода воды Q растет и соответствующее число Фруда. На таких реках руслоформирующим расходам воды соответствуют максимальные значения чисел Фруда.

На рис. 2 представлена зависимость числа Фруда от расхода воды на одном из участков реки Бзыбь (село Дисирхва). На графике приведены данные, собранные за 10 лет. В соответствии с этими данными число Фруда является однозначной монотонно возрастающей функцией расхода воды, неизменной за рассматриваемый период времени. По-видимому, функция $Fr(Q)$ может измениться при перестройке долины реки.

Расходы на реках в паводок колеблются в широком интервале значений. Пиковые величины расходов существуют очень недолго — от нескольких часов до нескольких суток. Руслоформирующие расходы, с которыми связывают возможные переформирования русла, относятся к расходам с малой повторяемостью. Пиковые расходы на реке Бзыбь колеблются от 250 до 900 m^3/c , соответствующие числа Фруда меняются от 0,67 до 0,85.

Средняя величина пиковых расходов за рассматриваемый период времени составила около 375 m^3/c при глубине потока 2,65 м, ширине — 53 м. Соответствующее число Фруда равно 0,71. Отметим, что отношение ширины реки к глубине равно в этом случае 20, т.е. не отличается от отношения B/H экспериментального потока, для которого получены зависимости параметров трехмерных гряд от числа Фруда, приведенные на рис. 1. В соответствии с экспериментальными данными для числа Фруда 0,71 длина волны (гряды) максимальной амплитуды $\lambda_3 = 3,65 \cdot H \cdot 50$, $\lambda_3 = 500$ м ($\lambda_L = 3,65H$). На рис. 3 показан участок реки Бзыбь, для которого были получены приведенные данные. Характерный шаг излучин, как следует из рис. 3,

примерно равен 500 м, т.е. практически совпадает с оценкой, полученной на основе экспериментальных данных.

Анализ натурных данных, проведенный для ряда рек (р. Нышма, приток реки Туры, р. Рилито-Грик, Аризона и др.), показал, что наблюдаемый шаг излучин близок длине максимальной по амплитуде трехмерной гряды, образующейся при том же числе Фруда и том же отношении V/H в лабораторном потоке. Это позволяет предположить, что предложенный физический механизм образования излучин рек верно описывает реально наблюдаемый процесс.

Таким образом, проведенное экспериментальное исследование позволило установить физическую модель, адекватно описывающую процесс образования речных излучин. Найденные в экспериментах зависимости длин гряд максимальной амплитуды от числа Фруда могут быть использованы в практических расчетах русловой эрозии для соответствующих значений чисел Фруда и отношения V/H .

В заключение благодарим Н.Н. Виноградову и Н.В. Хмелеву за любезно предоставленные данные наблюдений характеристик потока на реке Бзыбь.

Московский государственный университет
им. М.В. Ломоносова

Поступило
30 III 1992

ЛИТЕРАТУРА

1. Мельникова О.Н., Петров В.П. – ДАН, 1989, т. 304, № 4, с. 832–835.
2. Мельникова О.Н., Пыркин Ю.Г. – Изв. АН СССР. ФАО, 1990, т. 26, № 8, с. 888–891.