



А.Ю.Сидорчук

(Московский университет)

Использование уравнения баланса наносов для исследования эрозионно-аккумулятивных процессов в склоновой эрозионной рытвине

Баланс наносов в водотоках описывается общим уравнением

$$\frac{\partial Q_s}{\partial X} = C_w q_w + M_0 W + M_b D - C V_f W \quad (1),$$

которое выводится из уравнения неразрывности потока и вещества (Войнич-Сяноженский, 1972)

Здесь X (м) и t (с) продольная координата и время; $Q_s = QC$ - объемный расход взвешенных наносов; Q - расход воды ($\text{м}^3/\text{с}$); C - средняя по глубине потока объемная концентрация наносов; C_w - концентрация наносов в боковом притоке; q_w - удельный расход воды в боковом притоке ($\text{м}^2/\text{с}$); M_0 - интенсивность взмыва наносов со дна ($\text{м}/\text{с}$); M_b - интенсивность взмыва наносов с берегов русла ($\text{м}/\text{с}$); W - ширина потока (м); D - глубина потока (м); V_f - гидравлическая крупность частиц наносов в турбулентном потоке ($\text{м}/\text{с}$).

Интенсивность взмыва наносов со дна равна произведению придонной объемной мутности потока C_b на придонную вертикальную скорость U_v : $M_0 = C_b U_v$. Согласно Россинскому и Дебольскому (1986), придонная вертикальная скорость частиц пропорциональна средней скорости потока. Придонная мутность является мерой вероятности отрыва частиц ото дна, которая по Г.Эйнштейну (1942) есть функция отношения касательного напряжения на дне потока и его критического значения, при котором начинается отрыв частиц наносов: $C_b = F(\tau/\tau_{cr})$. Исследования размыва рыхлых почв показывают (Nearing, 1990), что функция $F(\tau/\tau_{cr})$ может быть степенного вида, и интенсивность взмыва наносов определяется произведением донного касательного напряжения в степени m на среднюю скорость потока:

$$M_0 = k_e U (DS)^m \quad (2).$$

Здесь U - средняя скорость потока; S - уклон свободной поверхности воды; k_e - коэффициент эродируемости грунтов. Величина этого коэффициента определяется критическим касательным напряжением τ_{cr} .

Турбулентные пульсации вертикальной скорости потока приводят к положительной вертикальной асимметрии в движении частиц наносов и, как следствие, к уменьшению их гидравлической крупности V_f . В первом приближении это явление можно описать формулой Хванга (1983):

$$V_f = V_{st} / \left\{ 1 + 0,5 \left[\frac{U}{(9,0V_{st})^2} \right] \right\} \quad (3)$$

Здесь V_{st} - гидравлическая крупность соответствующих частиц в стоячей воде (стоксовая скорость). Интенсивность вертикальных турбулентных пульсаций в формуле (4) записана согласно А.В.Караушеву (1977).

Для исследования эрозионно-аккумулятивных процессов в склоновой рытвине применяется следующая оптимизационная методика подбора величин $k_э$ и V_{st} .

1. Уравнение (1) решается относительно концентрации наносов в нижнем створе при условии отсутствия бокового притока:

$$C_i = C_{i-1} \exp\left(-\frac{V_f W}{Q}(\Delta x)\right) + \frac{1,22 * 0,45^{m-1} k_e * Q_i^{1+0,45(m-1)} S^m}{V_f W} \left[1 - \exp\left(-\frac{V_f W}{Q}(\Delta x)\right) \right]$$

(4)

Индекс i определяет изменение мутности на отрезке Δx от x_{i-1} до x_i .

2. С помощью оптимизационной процедуры Поуэлла [Абе,1990] производится перебор значений величин $k_э$ и V_f для выявления таких их значений, чтобы сумма из N квадратов разностей измеренных величин концентрации наносов в нижнем створе C_{if} и вычисленных C_{ic} по формуле (4) была минимальна:

$$\sum_{i=1}^N (C_{ic} - C_{if})^2 \rightarrow \min \quad (5)$$

В ходе полевых работ 1996 г на левом склоне долины р.Протвы на Сатинском стационаре МГУ были проведены измерения баланса наносов в малой эрозионной рытвине, выработанной в покровных суглинках на склоне длиной 13 м и крутизной 0,17-0,18. Подобраны такие значения величин $k_э$ и V_{st} , чтобы реализовалось условие (5). Коэффициент эродируемости $k_э$ составил 1,21

10^{-3} 1/м, а стоксова гидравлическая крупность $V_{st} - 8,2 \cdot 10^{-4}$ м/с. Эти значения близки к величинам, полученным при аналогичных экспериментах на суглинках в оврагах Австралии.