



Модель эволюции русловых систем при изменениях климата и характера землепользования

Базовыми уравнениями для моделирования эволюции русловой сети являются уравнения сохранения (баланса) для наносов (1) и уравнение деформации русла (2):

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

$$W \frac{\partial Z}{\partial t} = -\frac{\partial Q_s}{\partial X} + M_b D_b + C_w q_w \quad (2)$$

Здесь Q_s - расход наносов, $Q_s = Q^* C$, Q - расход воды; C - средняя концентрация наносов в русле; X - продольная координата; Z - отметка дна русла; t - время; q_w - модуль расхода воды распределенного притока; C_w - средняя концентрация наносов в распределенном притоке; M_0 - интенсивность взмыва наносов со дна русла; W - ширина русла; D_b - высота берегов; M_b - интенсивность взмыва наносов с берегов; V_f - гидравлическая крупность в турбулентном потоке.

Первый член в левой части уравнения (1) характеризует баланс наносов по длине потока, второй член - накопление наносов в толще потока. Первый член в правой части уравнения (1) описывает боковой приток наносов, второй и третий - взмыв наносов со дна и берегов русла, четвертый - аккумуляцию наносов. Уравнение (2) описывает изменение минимальной отметки дна русла (левая часть) под влиянием изменения расхода наносов по длине русла, поступления наносов с берегов и водосбора (правая часть). Уравнение (1) при некоторых упрощениях допускает аналитическое решение, в общем виде уравнения (1)-(2) решаются численно.

Уравнения (1)-(2) достаточно универсальны для их применения во всех звеньях гидрографической сети и в различных природных обстановках. Хотя эти уравнения одномерны, они допускают представление сети водотоков на поверхности в виде направленного древовидного графа с расчетом баланса наносов и деформаций русла вдоль ребер графа и применения модели смешения в вершинах. При этом учитывается боковой приток воды и наносов, то есть вводится в схему расчета вся площадь водосбора. С помощью этого же члена уравнений производится учет масштабного эффекта при изменении физического размера водотока первого порядка и элементарного водосбора.

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 et al., 1991), 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:

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

Здесь U - средняя скорость потока; S - уклон свободной поверхности воды; P - содержание наносов рассматриваемой фракции в донных грунтах; k_e - коэффициент эродированности грунтов, величина которого 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):

Исследование эволюции русловой сети при изменении климата (что влияет в первую очередь на приток воды с водосбора) и характера землепользования (что влияет на приток наносов) проводится в ряд этапов: 1) строится граф русловой сети и для каждого отрезка русла определяются гидравлико-морфометрические характеристики ширина, глубина, уклон русла, состав донных наносов; 2) уравнения (1)-(2) решаются для современных условий на этой сети и путем оптимизации по известным параметрам (например, мутности потока) подбираются величины k_e и V_{st} ; 3) реконструируются (или прогнозируются) климатические параметры и интенсивность землепользования, для них проводится расчет стока наносов, изменения состава донных наносов и деформации русел для всей речной сети. Приводится пример подобного расчета для системы водотоков Среднерусской возвышенности для периода интенсивного землепользования.