А.Ю.Сидорчук
(Московский университет)

САМООРГАНИЗАЦИЯ РЕЛЬЕФА В СИСТЕМЕ "ПОТОК - РУСЛО"

Одной из наиболее сложных геоморфологических динамических систем является система "речной поток - размываемое русло". В этой системе отчетливо проявляются многие свойства систем: однородность в больших масштабах и дискретность в малых; повышенная устойчивость и наличие процессов, поддерживающих существующее состояние системы; элементы памяти и механизмы обратной связи. Эти свойства делают систему "поток - русло" самоуправляемой и самоорганизующейся.

Самоорганизация руслового рельефа происходит в ходе взаимодействия руслового потока с размываемым ложем. В потоке при движении воды по шероховатому ложу в поле силы тяжести из-за диссипации энергии возникают макромасштабные турбулентные вихри. Распределение скоростей потока в турбулентных вихрях характеризуется большой неравномерностью. Каждой паре вихрей соответствуют три области повышенных и две области пониженных скоростей. В областях пониженных скоростей (меньше неразмываемых) происходит аккумуляция наносов и образуются русловые формы. Эту неравномерность можно рассматривать как начальные возмущения гидравлических характеристик потока u, v - продольной и поперечной компонент скорости, ζ и z - отметок поверхности и дна потока. Хотя изотахи и отметки дна, определяемые цепочкой вихрей, имеют эллипсовидную форму, в первом приближении возмущения можно описать двумерной синусоидой:

$$
\begin{aligned}
u &= A \sin [k_2(x_2 - b/2)] \exp [k_1 i(x_1 - ct)] \\
v &= B \cos [k_2(x_2 - b/2)] \exp [k_1 i(x_1 - ct)] \\
\zeta &= Z \sin [k_2(x_2 - b/2)] \exp [k_1 i(x_1 - ct)] \\
z &= T \sin [k_2(x_2 - b/2)] \exp [k_1 i(x_1 - ct)]
\end{aligned}
\qquad (1)
$$

Здесь $k_1 = 2\pi/L_1$ и $k_2 = 2\pi/L_2$ - волновые числа в продольном и поперечном направлении, L_1 и L_2 - соответствующие длины волн, b - ширина потока, c - комплексная скорость развития возмущений.

Подстановка (1) в линеаризованную систему уравнений плановой гидравлики, учитывающих кривизну свободной поверхности и линий тока,

$$\frac{du}{dt} - (\alpha - 1)\frac{U}{H}\frac{d}{dt}(\zeta - z) + \alpha U\frac{du}{dx_1} + g\frac{d\zeta}{dx_1} + 2g\frac{Uu}{C_0^2H} - g\frac{U^2(\zeta - z)}{C_0^2H^2} + \beta HU^2\frac{d^3\zeta}{d^3x_1} = 0$$

$$\frac{dv}{dt} + \alpha U\frac{dv}{dx_1} + g\frac{d\zeta}{dx_2} - \alpha\gamma\frac{Uv}{H} + g\frac{Uv}{C_0^2H} + \beta HU^2\frac{d^3\zeta}{d^2x_1 d\, x_2} = 0 \qquad (2)$$

$$H\frac{du}{dx_1} + U\frac{d}{dx_1}(\zeta - z) + H\frac{dv}{dx_2} + \frac{d}{dt}(\zeta - z) = 0$$

$$\frac{dq_S}{du}\frac{du}{dx} + \frac{q_S}{U}\frac{dv}{dx_2} + \frac{dz}{dt} = 0$$

приводит к дисперсионному соотношению $c = f(k_1, k_2, U, H, C_0, \alpha, \beta, \gamma)$. Здесь U и H - скорость и глубина невозмущенного течения, C_0 - коэффициент Шези, $\alpha \sim 1{,}0$, $\beta \sim 1{,}4$, $\gamma \sim 0{,}1$. Решением дисперсионного соотношения служит непрерывный двумерный амплитудный спектр, на котором выделяются все структурные уровни руслового рельефа: ультрамикроформы, микроформы, мезоформы, макроформы, мегаформы. Соотношение длин волн русловых образований, соответствующих максимумам амплитудного спектра, и ширины русла определяет морфологический тип русла. Решение (2) создает теоретическую основу для дискретизации руслового рельефа и обоснования его континуальности.

По мере увеличения амплитуд русловых форм вступает в силу механизм обратной связи, и рельеф начинает воздействовать на поле скоростей и шероховатость русла. Развитие возмущений на этой стадии описывается нелинейными уравнениями плановой гидравлики, решение которых является теоретическим описанием самоорганизации руслового рельефа при взаимодействии руслового потока с размываемым ложем.