



А.Ю.Сидорчук (Московский Университет)

### Единство эрозионно-аккумулятивного процесса в сети водотоков.

Основы теории единого эрозионно-аккумулятивного процесса заложены Н.И. Маккавеевым. При этом было рассмотрено сочетание общего и частного в эрозионно-аккумулятивный процессе, с большим вниманием к чертам различия в проявлении этого процесса в различных звеньях сети водотоков. Дальнейшее развитие учения Н.И. Маккавеева шло как по пути дальнейшего углубления анализа различий проявлений эрозионно-аккумулятивного процесса в частях эрозионно-аккумулятивного комплекса, в разных природных и техногенных обстановках, так и по пути синтеза этих представлений. Обобщающие географические работы велись при разработке понятий об устойчивости и уязвимости эрозионно-аккумулятивных комплексов по отношению к естественным изменениям среды и к техногенной нагрузке, при оценке роли эрозионно-аккумулятивных процессов в изменении качества среды обитания, в первую очередь, человека, в ходе взаимодействия природы и общества. В то же время происходило уточнение механизма единого эрозионно-аккумулятивного процесса на основе анализа баланса наносов во всем эрозионно-аккумулятивном комплексе или в его значимых частях. Возникает необходимость подведения формальной базы под обобщающие разработки по всем этим направлениям.

В качестве базовых для теории единого эрозионно-аккумулятивного процесса могут быть предложены уравнения сохранения (баланса) для наносов (1) и уравнение деформации русла (2):

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

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

Здесь  $Q_s$  - расход наносов,  $Q_s = Q^* C$ ,  $Q$  - расход воды;  $C$  - средняя концентрация наносов в русле;  $X$  - продольная координата;  $t$  - 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. Характеристики потока воды, описываемые уравнениями движения и неразрывности для взвесенесущей жидкости, а также

геометрия русловой сети и эрозионные параметры грунтов должны быть заданы или предварительно рассчитаны.

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.

Для описания эрозии и аккумуляции почв на склонах необходимо применение уравнения (1) в его полной форме. Процессы нерусловой эрозии (разбрызгивание почвы каплями дождя, смыв рассредоточенным плоскостным потоком) кумулятивно описываются как боковой приток для частного водосбора, примыкающему к каждому из ребер графа сети эрозионных борозд на склоне. Увеличение эродирующей и транспортирующей способности склоновых потоков при их турбулизации каплями дождя может быть учтено при назначении коэффициента эродируемости грунта и гидравлической крупности частиц в турбулентном потоке.

Формирование оврагов обычно проходит в две стадии: 1) быстрой попятной эрозии и увеличения длины оврага; и 2) медленного расширения днища и выполаживания бортов оврага и превращение его в балку. Для первой стадии уравнение (1) может быть упрощено за счет пренебрежения членами, описывающими боковой приток и аккумуляцию наносов, однако для описания второй стадии необходимо учитывать все члены уравнения (1). Для описания овражной эрозии уравнения (1)-(2)

должны быть дополнены уравнениями механики грунтов для учета склоновых процессов.

Для расчета русловых переформирований в реках обычно предполагается нулевой баланс взмыва наносов со дна и их аккумуляции:  $M_0 = CV_f$ . На этом предположении основаны формулы для расчета концентрации наносов Замарина:

$$C = 0,022 \left( \frac{U}{V_f} \right)^{1,5} \sqrt{DS}; \quad \text{Гостунского:} \quad C = 3300 \frac{U^3}{C_0^3 DV_f}; \quad \text{Россинского-Кузьмина:}$$

$$C = 0,024 \frac{U^3}{DV_f} \text{ и ряд других. Здесь } C_0 \text{ - коэффициент Шези, } U \text{ - средняя скорость}$$

течения,  $D$  - глубина потока,  $S$  - уклон. Однако в дальнейшем при расчете русловых переформирований формулы этого типа подставляются в уравнение деформации (2),

$$\text{где баланс наносов не предполагается нулевым: } \frac{\partial Z}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial X} (kU^4).$$

В результате возникает парадокс: при увеличении скоростей вниз по течению всегда происходит размыв, сколь малы не были бы скорости потока; и при уменьшении скоростей вниз по течению всегда происходит аккумуляция, сколь велики не были бы скорости потока. Наличие парадокса означает, что при расчете переформирований русел рек также необходимо использование полной формы уравнения (1).

При описании аккумуляции на пойме, в речной дельте или в водохранилище часто также используются упрощенные формы уравнения (1), в которых пренебрегают членами, описывающими взмыв наносов. Это вполне оправдано для обстановок со скоростями течения меньше неразмывающих. Однако в большинстве случаев даже в областях преимущественной аккумуляции временная изменчивость гидравлических характеристик потока приводит к местным размывам, и появляется необходимость учета всех членов уравнения (1).

Следует заметить, что течения в руслах рек, на их поймах и в водохранилищах обычно имеют двухмерный и трехмерный характер, поэтому в таких случаях следует использовать неосредненную версию уравнения (1).

Таким образом даже весьма неполный анализ механизма эрозии и аккумуляции в различных звеньях эрозионно - аккумулятивного комплекса показывает, что уравнения баланса наносов (1) и деформации (2) являются универсальными и базовыми для всего комплекса.