

НАУЧНЫЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 551.435.13

© 1996 г.

Н.И. АЛЕКСЕЕВСКИЙ

ТРАНСФОРМАЦИЯ СТОКА НАНОСОВ  
В ЭРОЗИОННО-АККУМУЛЯТИВНЫХ СИСТЕМАХ

Закономерности трансформации стока наносов в пределах различных эрозионно-аккумулятивных систем изучены недостаточно. Изменение характеристик потока вещества и энергии в их пределах оценивается по результатам сопоставления входных и выходных характеристик. Под влиянием внутренних механизмов, присущих каждой природной системе, эти характеристики изменяются или сохраняются неизменными. В частности, изменяется сток наносов. Одновременно изменяется и состояние системы, преобразующей потоки вещества и энергии.

На входе эрозионно-аккумулятивной системы зададим некоторую функцию  $X(t - \tau)$ , отвечающую колебаниям  $R$ . Трансформация этой функции (рис. 1) по длине системы в другую функцию  $Y(t)$  происходит, по А. Ховарду [1], в соответствии с уравнением:

$$Y(t) = \lambda \int_0^{\infty} X(t - \tau) \exp(-\lambda\tau) d\tau$$

где  $\lambda$  – характерная частота поступления сигнала  $X$  на вход системы;  $t - \tau$  – время запаздывания реакции стока наносов на нижней границе при изменении верхнего граничного условия. В общем случае  $X(t - \tau)$  и  $Y(t)$  не совпадают по фазе колебаний и амплитудным значениям. Соотношение амплитуд колебаний стока  $A/a$  на границах системы и сдвиг колебаний по фазе зависит от функции отклика  $\beta$  (рис. 2). При малых значениях  $\beta$  изменение  $X$  практически не влияет на вариацию характеристик сигнала  $Y$ . Это отвечает реакции системы поток – русло на высокочастотные колебания стока наносов. Максимальной частотой отличаются его меженные колебания, которые испытывают минимальное влияние со стороны системы и вызывают малые изменения ее составляющих элементов. При переходе к паводочным или половодным условиям формирования стока наносов на верхней границе системы поток – русло, которые имеют существенно меньшую частоту проявления, обнаруживается более масштабная трансформация стока. Часть транспортируемых наносов переходит в состав речных отложений, что сказывается на

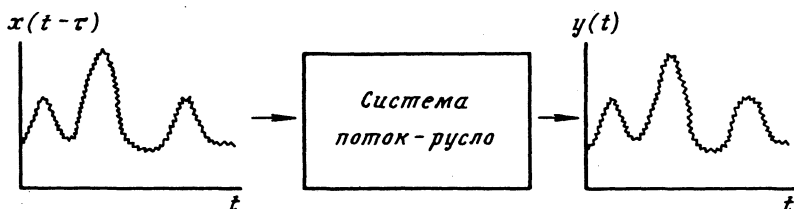


Рис. 1. Влияние системы поток – русло на временное несоответствие параметров стока наносов на границах системы

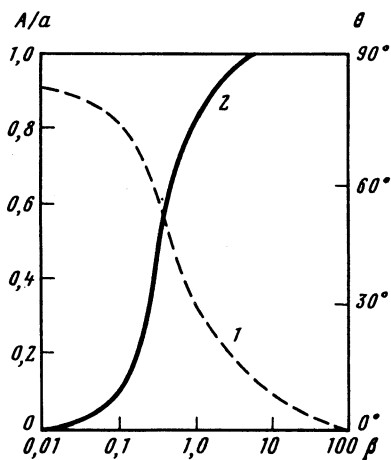


Рис. 2

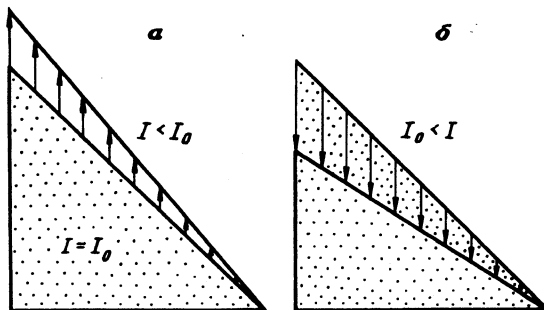


Рис. 3

Рис. 2. Соотношение между функцией отклика линейной системы  $\beta$ , смещением фаз колебаний  $\theta$  входных и выходных характеристик стока наносов (1) и отношением их амплитуд  $A/a$  (2) на входе (A) и выходе (a) системы (2)

Рис. 3. Реакция эрозионно-аккумулятивной системы на увеличение (a) или уменьшение (б) стока наносов на ее верхней границе.

$I$  – уклон водной поверхности,  $I_0$  – "устойчивый" уклон. Изменения площади треугольника соответствуют изменениям объема речных отложений

соответствии  $X$  и  $Y$  изменениям состояния природной системы. Возможны и противоположные процессы продольного нарастания стока транспортируемого материала и уменьшения объема отложений в пределах большего или меньшего протяжения рек.

В основе влияния системы поток – русло на изменение стока наносов лежит принцип Лешателье [2]. Он объясняет смену характера взаимодействия между компонентами системы при изменении внешних условий. Направленность этих взаимодействий отвечает восстановлению существовавших ранее условий переноса наносов. Такая реакция позволяет системе сохранить индивидуальные черты при характерном изменении объема речных отложений (рис. 3) и некотором новом соотношении между гидравлическими и морфометрическими характеристиками потока и русла [1, 3]. В физическом соотношении она описывается процессами выравнивания транспортирующей способности  $R_{тр}$  по длине участка реки, влияющими на изменение уклона дна и водной поверхности  $I = \Delta H/\Delta x$ , где  $\Delta H$  – падение уровня воды,  $\Delta x$  – длина участка реки. Уклон  $I_0$ , при котором вдоль потока соблюдается условие  $R = R_{тр}$ , называется "устойчивым" и в общем случае не совпадает с величиной  $I$ . Из анализа этого условия можно получить, что:

$$I_0 = kQ_{\phi}^{k_1} R_p^{k_2}, \quad (1)$$

где  $Q_{\phi}$  и  $R_p$  – характерные расходы воды и наносов. Эмпирические коэффициенты индивидуальны для разных рек и зависят от конкретных факторов развития системы поток – русло. На устьевом участке Терека, например,  $k = 15 \cdot 10^{-5}$ ;  $k_1 = -1$ ;  $k_2 = 0,75$ . Увеличение  $R_p$  (или уменьшение  $Q_{ор}$ ) приводит к возрастанию  $I_0$  и возникновению условия  $I_0 > I$ . Восстановление утраченного равенства между фактическим стоком наносов и транспортирующей способностью потока осуществляется вследствие возникновения в системе процессов, способных увеличить  $I$  до значения  $I_0$ . Аккумулятивные процессы (рис. 3) вызывают накопление наносов, наиболее мощное на верхней границе системы, и увеличение  $I$ . Возрастание уклонов в конечном итоге приводит к равенству  $I_0 = I$ , которое восстановилось при изменении объема речных отложений на величину  $\Delta W_0 > 0$ . При уменьшении  $R_p$  и увеличении  $Q_{ор}$  (рис. 3) восстановление взаимодействий в системе руслового потока осуществляется на фоне протекания эрозионных процессов в русле реки, уменьшения падения уровней воды и уклонов  $I$ . Достижение условия  $I_0 = 0$  означает

восстановление первоначальных условий переноса наносов при изменении объема речных отложений на величину  $\Delta W_0 < 0$ .

Накопление наносов в пределах природных систем и последующая "сработка" запасов речных отложений объясняет одну из причин продольного изменения стока наносов. Поступившие на верхнюю границу системы минеральные частицы могут на длительное время исключаться из системы продольного перемещения, что вызывает несовпадение функций  $X$  и  $Y$  на границах системы. Время их пребывания на участке реки многократно превышает время транзитного переноса частиц вдоль потока. Оно численно равно времени приспособления (релаксации) системы поток – русло к изменению  $R_p$  и  $Q_{ор}$ . Величина времени релаксации зависит от многих факторов и может быть установлена на основе разработок А. Ховарда [1]. Допуская геометрическую схематизацию объема накопления или размыва отложений, легко показать, что

$$\Delta W_0 / B = L^2 (I_2 - I_1) / 2, \quad (2)$$

где  $B$  – ширина русла,  $L$  – характерный линейный размер системы, в пределах которой уклон изменяется от  $I_1$  до  $I_2$ . Изменение объема отложений является причиной продольного изменения расхода наносов. При условии  $R \approx I^n Q^m d^{-p}$  получаем, что

$$\Delta R / B \approx (I_2^n - I_1^n) q^m d_{50}^p$$

где  $q$  – удельный расход воды,  $d_{50}$  – средний диаметр русловых отложений. А. Ховард [1] принимает  $n = 2,0$ ;  $m = 1,8$ ;  $p = 0$ . В общем случае время релаксации  $T_p = \Delta W_0 / \Delta R$ , и

$$T_p = L^2 d_{50}^{1/n} Z / (q^{m/n} R_2^{1-1/n}). \quad (3)$$

Здесь принято, что расход воды и диаметр наносов не изменяется по длине  $L$ , а также, что:

$$Z = \left[ (\rho_*^{1/n} - 1) \rho_*^{1-1/n} \right] / (\rho_* - 1), \quad (4)$$

причем  $\rho_* = R_2 / R_1$ . Если причиной изменения объема отложений является изменение стока воды, то:

$$Z = (\rho_*^{m/n} - 1) / (\rho_*^m - 1) \quad (5)$$

и  $\rho_* = q_2 - q_1$ . Из уравнения (3) следует, что между временем релаксации и характерным линейным размером существует однозначная связь. Чем больше эрозионно-аккумулятивная система, тем длительнее приспособление этой системы к возмущениям стока воды и наносов на ее верхней границе. На величину  $T_p$  заметное влияние оказывают масштабы изменения стока наносов и диаметр речных отложений. Чем сильнее выражено изменение стока наносов и больше диаметр отложений, тем больше  $T_p$ . Отсюда вытекает условие выбора времени запаздывания ( $\tau$ ) соответственных колебаний стока наносов на границах природных систем. Если  $\tau = T_p$ , то  $X(t)$  трансформируется в  $Y(t + T_p)$  на участке реки длиной  $L$ . Соответственные значения этих функций разделены интервалом времени  $\tau = T_p$ .

Более сложный характер имеет проблема определения  $\tau$  для систем водотоков различных порядков  $N$ , поскольку удельный расход воды, диаметр русловых отложений и характерная длина являются функцией  $N$ . Увеличение  $N$  вдоль речной сети означает возрастание времени, необходимого для адекватной реакции этой сложной эрозионно-аккумулятивной системы на внешние возмущения определяющих факторов. Одновременно увеличивается временной шаг, разделяющий соответственные колебания стока наносов на границах природной системы.

Этот результат можно получить при анализе изменения времени релаксации в водных потоках различного порядка. Предположим, что в существующей речной сети имеются водотоки 4, 9 и 14-го порядка. Их длина задается по Н.А. Ржаницину [4] и колеблется от 2,3 до 950 км. Средняя величина удельных расходов воды получена при обобщении данных по европейской части России и прилегающих стран [5]. Она изменяется от 0,22 до 7,14 м<sup>2</sup>/с (таблица). При увеличении порядка рек происходит в общем случае уменьшение среднего

**Зависимость времени приспособления системы поток – русло в различных звеньях речной сети от вариации стока наносов на ее верхней границе**

Порядок реки, $i$	Удельный расход воды $q_2$ , $\text{м}^3/\text{с}$	Длина водотока $L$ при $N = \text{const}$ , км	Диаметр наносов $d_{50}$ мм	Расходы наносов		$\frac{R_2}{R_1}$	$Z$	$x_i \cdot 10^{-6}$	$\frac{x_{i+1}}{x_i}$
				$R_2$ , кг/с	$R_1$ , кг/с				
4	0,22	2,3	0,65	12	24	0,5	0,14	0,021	–
9	1,12	47,0	0,40	324	628	0,5	0,14	0,31	14,8
14	7,14	250,0	0,30	10 700	21 400	0,5	0,14	3,6	11,6
4	0,22	2,3	0,65	12	6	2	0,58	0,085	–
9	1,12	47,0	0,40	324	162	2	0,58	0,13	15,0
14	7,14	950,0	0,30	10 700	5350	2	0,58	1,47	11,5

диаметра русловых отложений. Это объясняет принятую закономерность уменьшения  $d_{50}$  от 0,65 мм ( $N = 4$ ) до 0,30 мм ( $N = 14$ ). Для каждой реки принимается гипотеза об уменьшении среднего расхода наносов в два раза ( $R_2/R_1 = 0,5$ ) или аналогичного его увеличения ( $R_2/R_1 = 2$ ). С учетом замечаний к уравнению (3) и значений коэффициентов  $n$ ,  $m$  и  $p$ , принятых по А. Ховарду [1], рассчитываются параметры  $Z$  и  $x = (L^2 d_{50}^{1/n} Z) / (q_2^{m/n} R_2^{1-1/n})$ .

Величина времени релаксации  $T_p$  пропорциональна  $x$ , а соотношение  $x_{L+1}/x_i$  дает представление о зависимости  $T_p$  от размера (порядка) рек.

Из таблицы видно, что при увеличении  $N$  от 4 до 14 продолжительность перемещения начального возмущения стока наносов (при уменьшении  $Z = 0,14$  или увеличении  $Z = 0,58$ ) возрастает более, чем в 10 раз. Следовательно, естественные и антропогенные факторы изменения стока наносов вызывают различную реакцию в верхнем, среднем и нижнем звеньях речных систем. Крупномасштабное изменение расхода наносов способно вывести систему поток – русло в низовьях реки из состояния динамического равновесия на длительное время. Отсюда следует и другой важный вывод. Чем крупнее водный поток и больше изменение стока наносов на верхней границе участка реки, тем больше время добегания начального возмущения стока наносов до нижней границы системы. Для ручейковой сети на откосах насыпных дорог оно равно нескольким минутам. Увеличение площади водосбора от 0,005 до 9000 км<sup>2</sup> приводит к возрастанию  $T_p$  от нескольких месяцев до нескольких тысяч лет [1]. Эти оценки показывают, что уже для относительно малых рек резкое изменение условий формирования наносов способно вызвать такие колебания стока на нижней границе участка реки, которые в полной мере можно оценить по истечению длительного времени, соизмеримого с временем релаксации. При меньших интервалах времени вариация гидрологических характеристик как трендовый процесс практически не выражена и проявляется лишь при значительном осреднении данных наблюдений. Такая реакция стока наносов на нерегулярное внешнее воздействие, пространственно удаленное от замыкающего створа, отражает существенную инерционность большой массы наносов, поступающей в речную сеть и смещающейся в направлении уклона русла.

Вариации стока наносов обусловлены протеканием на водосборах, в долинах рек и их руслах комплексов природных процессов. Важнейшими стокоформирующими процессами являются плоскостной смыв, овражная и русловая эрозия, оползни и т.д. Существенное влияние на колебания стока оказывает и хозяйственная деятельность человека. Перечисленные и другие процессы вызывают регулярное или нерегулярное изменение стока наносов; в нем оказываются представленными составляющие разной частоты проявления. Частотный спектр колебаний стока наносов включает высоко-, средне- и низкочастотные флуктуации. Высоко- и среднечастотные возмущения характеристик стока затушевывают трендовые явления уменьшения или увеличения интенсивности транспорта наносов, связанные с менее регулярными, но мощными по своему воздействию определяющими факторами. В зависимости от времени осреднения характеристик стока наносов существует меньшая или большая вероятность учета влияния нерегулярных факторов на количество транспортируемого материала в речной сети. Она изменяется

в ее различных звеньях, отличается по величине для коротких и протяженных участков реки.

Колебания стока наносов определенной частоты на входе эрозионно-аккумулятивных систем с различной скоростью перемещаются к их нижней границе. Максимальная скорость передачи возмущения стока наносов  $V_R$  характерна для высокочастотных флуктуаций. Для относительно коротких участков рек ее величина коррелируется с величиной скорости движения водного потока. Минимальные скорости распространения возмущений показательны для низкочастотных составляющих стока наносов. Волна изменения стока влекомого наносов, связанная с поступлением в поток большого количества грубо-обломочного материала, например в результате прохождения селя, схода оползня, перемещается вдоль русла со скоростью нескольких метров в год.

Изменение  $V_R$  для различных составляющих стока наносов сопровождается трансформацией амплитудных характеристик начального возмущения. Степень трансформации зависит от изменения размеров природных эрозионно-аккумулятивных систем, в пределах которых исследуется перенос наносов. Сравнение колебаний стока наносов во времени в микроручейковой сети на склонах и в овражно-балочной сети обнаруживает их частичное или полное соответствие. Оно практически отсутствует уже в системах малых постоянных водотоков, что связано с регулирующей функцией водосбора. Чем больше площадь водосбора, тем меньше вероятность совпадения высокочастотных колебаний стока наносов в смежных (по размеру) системах транспорта воды и наносов. Для других частотных составляющих стока наносов такое совпадение возможно при большом фазовом отклонении соответственных колебаний на входе и выходе из системы. Период времени, разделяющий эти колебания, численно равен времени релаксации  $T_p$ , зависит от величины характерной скорости  $V_R$ , линейных размеров участка реки  $L$ . Поскольку скорость  $V_R = L/T_p$  [6, 7], то отсюда вытекает необходимость учета редукции стока по длине эрозионно-аккумулятивных систем. От этого зависит выбор пространственных и временных масштабов процесса формирования и перемещения наносов, для которых выполняется закон сохранения литогенного материала.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Howard A.D.* Equilibrium and time scales in geomorphology: application to sand-bed alluvium streams // *Earth. Surf. Proc. and Landforms*. 1982. V. 7. № 4. С. 303–325.
2. *Гришанин К.В.* Динамика русловых потоков. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 311 с.
3. *Михайлов В.Н., Rogov M.M., Чистяков А.А.* Речные дельты. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 280 с.
4. *Ржаницын Н.А.* Морфологические и гидрологические закономерности строения речной сети. Л.: Гидрометеиздат, 1960. 238 с.
5. *Алексеевский Н.И., Гайкович А.Б.* К расчету стока влекомого наносов на неизученных реках в период межени // *Метеорология и гидрология*. 1987. № 8. С. 96–102.
6. *Дегтярев Г.М., Иванов-Ростовцев А.Г., Копыто Л.Г., Любченко О.А.* О взаимосвязи пространственно-временных характеристик гидродинамических процессов (на примере озер) // *Докл. АН СССР*. 1990. Т. 313. № 3. С. 574–577.
7. *Торнес Дж.Б., Брундсен Д.* Геоморфология и время. М.: Недра, 1981. 227 с.

Московский государственный университет  
Географический факультет

Поступила в редакцию  
15.05.95

#### SOLID RUNOFF TRANSFORMATION IN EROSIONAL-DEPOSITIONAL SYSTEMS

N.I. ALEKSEEVSKY

#### Summary

The paper describes modelling in the solid runoff changes within an erosional system which permits to recognise principal regularities in the changes; causes of the changes are discussed.