

БАЛАНС НАНОСОВ В ЭРОЗИОННО-РУСЛОВЫХ СИСТЕМАХ¹*Географический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва; fluvial05@gmail.com***Введение**

Основы теории единого эрозионно-аккумулятивного процесса заложены Н.И. Макавеевым [1]. При этом было рассмотрено сочетание общего и частного в эрозионно-аккумулятивном процессе с большим вниманием к чертам различия в проявлении этого процесса в разных звеньях сети водотоков. Дальнейшее развитие учения Н.И. Макавеева шло как по пути углубления анализа особенностей проявлений эрозионно-аккумулятивного процесса в отдельных частях эрозионно-аккумулятивного комплекса, в разных природных и техногенных обстановках, так и по пути синтеза этих представлений [2, 3]. В предлагаемой статье такой синтез проводится на основе исследования уравнения баланса наносов для значимых частей эрозионно-аккумулятивного комплекса и эрозионно-русловой системы (ЭРС) в целом.

Основные подходы к описанию баланса наносов в ЭРС

Эрозионно-русловые системы [4] обладают фрактальными свойствами [5], т. е. при изменении масштаба рассмотрения системы ее основные геометрические и динамические характеристики изменяются в некотором смысле самоподобно [6]. В самом крупном масштабе различаются микроструйки воды на склоне во время дождя или снеготаяния. В русле каждой такой микроструи происходят процессы эрозии, транспорта и аккумуляции наносов, и к ней примыкают микросклоны, с которых в русло осуществляется боковой рассредоточенный приток воды и/или наносов. Структура эрозии, транспорта и аккумуляции наносов в пределах микросклонов остается вне масштаба рассмотрения явления. В мелком масштабе ЭРС представлена речным бассейном с речной сетью и водосбором. В руслах рек происходят процессы эрозии, транспорта и аккумуляции наносов, с примыкающей к данному отрезку русла водосборной площади поступают вода и/или наносы. Структура эрозии, транспорта и аккумуляции наносов в пределах такой водосборной площади также остается вне масштаба рассмотрения явления.

В результате ЭРС любого размера может быть представлена в виде древа водотоков с примыкающими к ним участками водосбора (склонами). Такая геометрия допускает применение для моделирования изменений транспорта наносов и деформаций русла одномерной модели баланса наносов по длине русел водотоков и модели смещения в узлах слияния. При этом рассчитывается боковой приток воды и наносов с примыкающих участков водосбора, то есть в одномерной модели учитывается вся площадь водосбора. С помощью этого же члена уравнений производится учет масштабного эффекта при изменении физического размера водотока первого порядка и элементарного водосбора.

Баланс наносов в водном потоке может быть записан в одномерной аппроксимации для некоторого участка потока длиной ΔX и шириной W :

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ для ведущих научных школ (НШ-1010.2014.5).

$$\frac{\Delta T}{\Delta X} + \frac{\Delta V}{\Delta X \Delta t} = T_L W + EW - AW. \quad (1)$$

Здесь $T=CQ$ – расход наносов ($\text{м}^3 \text{с}^{-1}$) как произведение расхода воды Q на общую концентрацию C наносов всех видов; X – продольная координата (м); T_L ($\text{м} \text{с}^{-1}$) – удельный расход наносов, поступающих в поток с водосбора на единицу ширины W (м) на участке ΔX ; E – скорость размыва дна потока ($\text{м} \text{с}^{-1}$); A – скорость аккумуляции наносов в русле и на пойме ($\text{м} \text{с}^{-1}$); V – объем наносов, находящихся в движении (м^3); t – время.

В левой части уравнения (1) записан баланс наносов по длине потока (первый член) и во времени (второй член). В правой части уравнения записаны главные процессы, влияющие на баланс наносов, по порядку: 1) приток наносов с водосбора, 2) эрозия, 3) аккумуляция. Физический смысл этих процессов ясен из их названий. Приток наносов с водосбора (удельный, на единицу площади потока) обычно определяется концентрацией наносов в притоке C_L , а также расходом воды Q_L (или модулем стока воды M) с площади F примыкающего к руслу водосбора:

$$T_L = C_L \frac{Q_L}{W \Delta X} = C_L \frac{MF}{W \Delta X} = C_L \frac{\Delta Q}{W \Delta X}. \quad (2)$$

Возможно поступление грунтов с водосбора или берегов русла без существенного увеличения расхода воды (например, за счет оползней), тогда боковой приток необходимо рассчитывать по объему V_L таких грунтов:

$$T_L = \frac{V_L}{W \Delta t \Delta X}. \quad (3)$$

Скорость эрозии (с единицы площади русла) определяется концентрацией активных частиц в верхнем слое размываемого дна C_0 и средней вертикальной скоростью этих активных частиц U_1 (если использовать терминологию А.В. Караушева [7], то мутностью и скоростью “взмыва”):

$$E = U_1 C_0. \quad (4)$$

Скорость аккумуляции наносов некоторой крупности определяется средней скоростью осаждения частиц наносов в турбулентном потоке V_f и средней концентрацией наносов i -той фракции в потоке. Соответственно, интенсивность общей аккумуляции есть сумма интенсивностей частных:

$$A = \sum A_i = \sum C_i V_{fi}. \quad (5)$$

Для некоторых фракций при заданной интенсивности турбулентности скорость осаждения частиц мала и аккумуляцией таких частиц пренебрегают.

Баланс наносов на участках ЭРС разных типов

Соотношение величин эрозии и аккумуляции определяет тип эрозионно-русовой системы на данном ее участке. Наиболее сложный случай описывается полной версией уравнения (1), когда невозможно пренебречь ни одним его членом. Активный обмен наносами происходит между наносонесущим потоком и грунтами смоченного периметра, значительное количество наносов поступает с притоком. Обычно такой тип участка ЭРС характерен для эродированных склонов со сложным микрорельефом, с разреженным или отсутствующим растительным покровом. Боковой приток наносов может осуществляться и при отсутствии потока воды за счет ударного воздействия капель дождя. Существенный вклад в транспорт наносов может давать размыв берегов эрозионных борозд. Характерна большая пространственно-временная неоднородность

процессов эрозии и аккумуляции с локальными очагами эрозии и локальными же очагами аккумуляции размытого грунта. Геоморфологическим результатом функционирования такой системы является понижение отметок водораздельных поверхностей и верхних частей склонов, что обычно именуется эрозией почв.

Довольно часто в уравнении (1) можно пренебречь изменением во времени концентрации наносов. Тогда уравнение в частных производных (1) преобразуется в обыкновенное дифференциальное уравнение

$$\frac{dQC}{dX} = WT_L + EW - W \sum C_i V_{fi}, \quad (6)$$

которое имеет аналитическое решение относительно расхода наносов i -той фракции в основном потоке:

$$(QC_i)_2 = (QC_i)_1 \exp\left(-\frac{V_{fi}}{UD} \Delta X\right) + \frac{UD}{V_{fi}} (WT_{Li} + WE_i) \left[1 - \exp\left(-\frac{V_{fi}}{UD} \Delta X\right)\right]. \quad (7)$$

Это уравнение показывает, что расход наносов в конце участка русла длиной ΔX складывается в определенной пропорции из наносов, поступающих по руслу в начало участка, постепенно оседающих (первый член в правой части (7)), и наносов, поступающих в поток при размыве дна, берегов русла и водосбора. Эта пропорция определяется комплексом $\frac{UD}{V_{fi}}$, который представляет собой длину пути ΔL , где полностью оседают наносы i -той фракции при скорости потока U и глубине D .

Многие ЭРС формируются высокоэнергетическими потоками, где в условиях значительной турбулентности скорость осаждения наносов мала и длина пути ΔL существенно больше ΔX . Тогда

$$\frac{dQC}{dX} = T_L + EW, \quad (8)$$

и для суммы всех фракций

$$\sum_{i=1}^N (QC_i)_2 = \sum_{i=1}^N (QC_i)_1 + \sum_{i=1}^N \Delta X (T_{Li} W + E_i W). \quad (9)$$

Такой тип баланса наносов характерен для эрозионных борозд на крутых склонах, оврагов в активной стадии развития и для горных рек, размывающих тонкодисперсные породы. При отсутствии (или незначительности) бокового притока подобные объекты часто используются для определения скорости эрозии по балансу наносов и эмпирической зависимости скорости эрозии от гидравлических характеристик потока (рис. 1). Обычно такие зависимости можно аппроксимировать выражением

$$\frac{1}{W} \frac{\Delta QC}{\Delta X} = E = K_e f(U, D) S. \quad (10)$$

Здесь S – уклон, $f(U, D)$ – некоторая функция гидравлических характеристик потока, K_e – эрозионный коэффициент, который зависит от литологических свойств размываемого грунта (с учетом влияния растительности при наличии таковой). Так как уклон – это изменение отметок дна Z по длине, а скорость эрозии – это изменение отметок дна во времени, то выражение (11) записывается в виде

$$\frac{\partial Z}{\partial t} = -K_e f(U, D) \frac{\partial Z}{\partial X}. \quad (11)$$

Уравнение (11) показывает, что геолого-геоморфологические факторы – уклон местности и литология грунтов – являются весьма существенными для процесса

эрозии. Именно через уклон реализуется связь процесса эрозийного рельефообразования с рельефом, так как величина уклона определяет скорость эрозии, а эрозия изменяет уклон. Гидролого-гидравлические факторы эрозии выражены через функцию $f(U, D)$, довольно часто она представляет собой удельный расход воды q – произведение скорости потока U на его глубину D (рис. 1).

Большое распространение имеют ЭРС, где в среднем на участке ΔX расход наносов в русле не меняется, эрозия наносов на смоченном периметре в среднем равна их аккумуляции, а наносы, поступающие с притоком с водосбора, аккумулируются вне русла или проходят транзитом. Такой тип участка эрозийно-руслевой системы характерен для средних и больших рек с некоторым равновесием размыва и осаждения руслообразующих наносов (с концентрацией C_R). Тогда уравнение (1) представляется в виде

$$E = C_R V_{JR}. \quad (12)$$

Его решением будет

$$C_R = \frac{E}{V_{JR}}. \quad (13)$$

Формула (13) является базовой для расчета транспортирующей способности рек и применяется многими исследователями. Для расчета транспортирующей способности имеется значительное количество формул, которые отличаются видом зависимости для скорости эрозии $E = k_e f(U, D) S$. К примеру, для рек с песчаным аллювием применима формула Россинского–Кузьмина [8], которая имеет вид:

$$C_R = 0.024 \frac{U^3}{V_{JR} D} = 0.47 \frac{US}{\lambda V_{JR}}. \quad (14)$$

Здесь λ – гидравлическое сопротивление. Скорость эрозии (в $\text{кг}/(\text{м}^2 \text{ с})$) тогда составляет

$$E = 0.024 \frac{U^3}{D} = 0.47 \frac{US}{\lambda}. \quad (15)$$

Это означает, что в равнинных реках с песчаным аллювием с каждого квадратного метра дна за сутки взмывается около 2–4 т наносов, т.е. более 1–2 м в слое. Такую же интенсивность имеет компенсирующая эту эрозию аккумуляция наносов. При этом средняя мутность (для среднего песка) обычно не превышает $1 \text{ кг}/\text{м}^3$, причем наносы в основном сосредоточены в придонном слое. Только близкий к нулю баланс наносов по длине рек с песчаным аллювием поддерживает хрупкое равновесие и динамическое

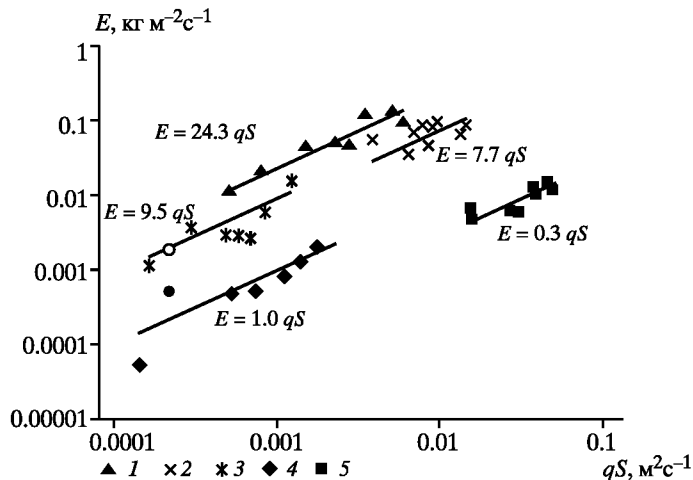


Рис. 1. Зависимость скорости эрозии E от гидравлических характеристик потока (удельного расхода q и уклона S) в эрозийных бороздах на склонах оврага Брук Крик, Австралия (1, 2), лёссовых холмов Баллантрэ, Новая Зеландия (3, 4), долины р. Протвы (5). Различия в значениях эрозийного коэффициента обусловлены разным сцеплением размываемого грунта

кую стабильность речных русел, нарушение этого равновесия приводит к быстрым и масштабным переформированиям русел.

Если поток, формирующий эрозионно-русловую систему, практически не производит эрозии ложа, баланс наносов описывается уравнением

$$\frac{dQC}{dX} = T_L W - W \sum C_i V_{fi}, \quad (16)$$

и изменение расхода наносов по длине определяется осаждением наносов и их притоком с водосбора (часто пренебрежимо малого):

$$\begin{aligned} (QC_i)_2 &= (QC_i)_1 \exp\left(-\frac{V_{fi}}{UD} \Delta X\right) + \frac{UD}{V_{fi}} T_{Li} W \left[1 - \exp\left(-\frac{V_{fi}}{UD} \Delta X\right)\right] \approx \\ &\approx (QC_i)_1 \exp\left(-\frac{V_{fi}}{UD} \Delta X\right). \end{aligned} \quad (17)$$

Такой тип характерен для заросших растительностью днищ ложбин и балок, речных пойм и устьевых баров. Преобладание аккумуляции характерно для расширений речных долин и в дельтах рек. На участках ЭРС аккумулятивного типа многие линейные характеристики аккумулятивных форм рельефа определяются комплексом $\frac{UD}{V_{fi}}$, который представляет собой длину пути ΔL , где полностью оседают наносы i -той фракции при скорости потока U и глубине D . Длиной ΔL определяется характерная ширина прирусловых валов на пойме и в целом ширина приподнятой части прирусловой поймы, длина зон заиления в водохранилищах, размеры устьевых баров в дельтах рек и т. п.

Возможна ситуация, когда и эрозия, и аккумуляция наносов для данного участка потока пренебрежимо малы. Для натуральных потоков такой тип достаточно редкий, но для искусственных каналов именно этот режим часто закладывается в проект. В таком случае все компоненты уравнения баланса наносов на бесприточном участке равны нулю:

$$Q \frac{dC}{dX} = EW = W \sum C_i V_{fi} = 0, \quad (18)$$

а расход наносов и мутность воды не меняются по длине потока.

По знаку суммарного баланса наносов участки ЭРС делятся на эрозионные, динамически стабильные и аккумулятивные (рис. 2). Эти названия, конечно, отражают преобладающие процессы рельефообразования в системах. Эрозионные участки ЭРС, расположенные выше линии равенства эрозии и аккумуляции на рис. 2, характеризуются положительным балансом наносов. Это преимущественно эрозионные борозды и молодые овраги, а также реки с высокоэнергетическими потоками и обильным поступлением продуктов эрозии из русла и/или с водосбора. В таких системах увеличение стока наносов по длине происходит за счет увеличения мутности потока, что приводит к увеличению модуля стока наносов M кг/(м² с) с увеличением площади водосбора рек. Такой тип изменения стока наносов был впервые выделен Дедковым и Мозжериным [9].

Ниже линии равенства эрозии и аккумуляции расположены аккумулятивные участки ЭРС с отрицательным балансом наносов. В верхних частях ЭРС таким балансом обычно характеризуются области уменьшения уклонов и увеличения шероховатости подстилающей поверхности. Это нижние части распахиваемых склонов, заросшие растительностью ложбины и балки, русла некоторых ручьев и малых рек, а также поймы рек. Аккумуляция наносов на этих элементах ЭРС приводит к уменьшению мутности потока и модуля стока наносов M кг/(м² с) с увеличением площади водосбора. Отрицательный баланс наносов

характерен для устьевых областей рек и дельт, а также для расширений речных долин. К повышенной аккумуляции приводит и избыточное (над транспортирующей способностью потока) поступление наносов с водосбора (со склонов).

Как уже отмечалось, динамическая стабильность – суммарное равенство “эрозия + боковой приток + аккумуляция наносов” – характерна для русел средних и больших рек. Здесь наблюдаются в основном сезонные перестроения русел при изменении объемов стока воды и наносов. Для участков ЭРС таких типов существенные изменения продольных профилей связаны с многолетними изменениями климата или техногенными факторами.

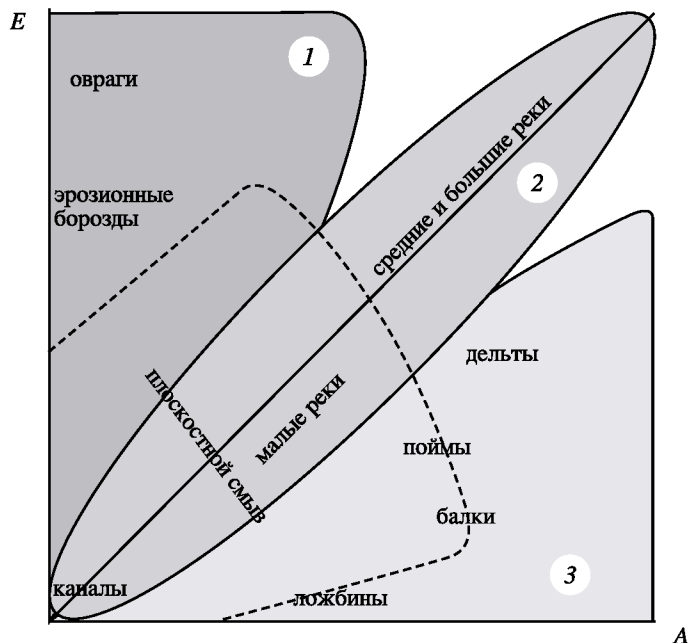


Рис. 2. Типизация участков эрозионно-русловых систем по балансу наносов (соотношению скоростей эрозии E и аккумуляции A)
 Участки: 1 – ЭРС эрозионного типа с положительным балансом наносов, 2 – динамически стабильные ЭРС с нулевым суммарным балансом наносов, 3 – ЭРС аккумулятивного типа с отрицательным балансом наносов

Баланс наносов в ЭРС в целом

Часто рассматривается баланс наносов во всей ЭРС (в среднем для всего водосбора за некоторый период времени) от истоков водотоков до устья (или некоторого замыкающего створа). Тогда уравнение баланса наносов можно записать в безразмерном виде, через т.н. коэффициент доставки, который представляет собой отношение транспорта наносов в замыкающем створе к суммарной эрозии на водосборе

$$\frac{T}{\sum E} = K_d = 1 - \frac{\sum A}{\sum E}. \quad (19)$$

Коэффициент доставки меньше или равен единице, но не бывает меньше нуля, так как суммарная аккумуляция на водосборе не может быть больше суммарной эрозии. Непрерывность поля коэффициентов доставки для самых разных ЭРС не дает возможность найти здесь критерий разделения ЭРС в целом на разные типы. В предельных случаях такая определенность имеется. При полном отсутствии аккумуляции коэффициент доставки равен 1, при полной аккумуляции продуктов эрозии в пределах ЭРС коэффициент доставки равен нулю. Полностью эрозионные ЭРС достаточно часто реализуются на небольших водосборах с высокоэнергетическими потоками, практически полностью аккумулятивные могут реализоваться в бассейнах крупных равнинных рек. Эмпирические данные показывают, что в целом с увеличением бассейна реки коэффициент доставки уменьшается, как на многих реках бассейна Дона (рис. 3), хотя имеются реки, по длине которых коэффициент доставки увеличивается (например, Северский Донец). Можно предложить наиболее простой критерий для разделения ЭРС в

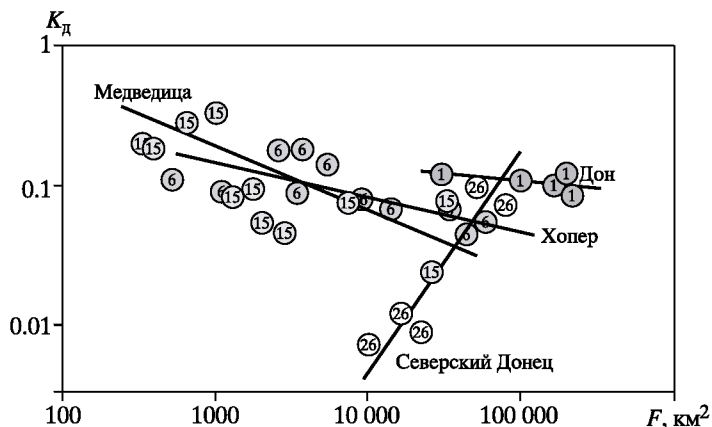


Рис. 3. Изменение коэффициента доставки K_d для ЭРС (в целом) с разной площадью водосбора F в бассейне р. Дон (1 – Дон, 6 – Хопёр, 15 – Медведица, 26 – Северский Донец)

целом на два основных типа: если в пределах водосбора аккумулируется более половины эродируемых наносов ($K_d < 0.5$), то ЭРС относится к аккумулятивному типу, половина и менее ($K_d \geq 0.5$) – к эрозионному типу. На Русской равнине преобладают ЭРС аккумулятивного типа, только для самых малых рек (с площадью водосбора $< 50 \text{ км}^2$) коэффициенты доставки могут быть более 0.5 [10, 11].

Напротив, на островах Новой Зеландии в условиях холмистого и горного рельефа, преобладают ЭРС эрозионного типа и нередко коэффициенты доставки близки к 1 [12]. Для больших бассейнов равнинных рек ЭРС эрозионного типа не типичны, уникальным является бассейн Хуанхэ на Лёссовом плато Китая, где до проведения масштабных противоэрозионных мероприятий коэффициент доставки наносов приближался к 1 [13].

Заключение

Уравнение баланса наносов (1) является универсальным и базовым для всех типов эрозионно-руслowych систем самых разных размеров. Соотношения величин основных компонент этого уравнения – эрозии, аккумуляции и притока наносов с водосбора – являются вполне определенными количественными критериями для типизации участков ЭРС и отнесения их к эрозионным, динамически стабильным и аккумулятивным. В то же время отсутствует четкий критерий для типизации по балансу наносов большинства ЭРС, взятых в целом (от вершины до замыкающего створа). Вероятно, для этого необходимы дополнительные характеристики систем такие, как пространственные тренды в балансе наносов, соотношения площадей распространения эрозионных и аккумулятивных форм и т. п.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Маккавеев Н.И. Русло реки и эрозия в ее бассейне. М.: Изд-во АН СССР, 1955. 346 с.
2. Алексеевский Н.И., Чалов Р.С. Речные наносы и русловые деформации. М.: Изд-во МГУ, 1997. С. 170.
3. Алексеевский Н.И. Формирование и движение речных наносов. М.: Изд-во МГУ, 1998. С. 202.
4. Чалов Р.С. Н.И. Маккавеев и развитие теории эрозионно-руслowych систем // Маккавеевские чтения – 2003. М.: Изд-во МГУ, 2004. С. 5–11.
5. Сидорчук А.Ю. Фрактальная геометрия речных сетей // Геоморфология. 2014. № 1. С. 3–14.
6. Мандельброт Б. Фрактальная геометрия природы. М.: Изд. ИКИ, 2002. 665 с.
7. Караушев А.В. Теория и методы расчета речных наносов. Л.: Гидрометеоиздат, 1977. 272 с.
8. Россинский К.И., Кузьмин И.А. Балансовый метод расчета деформаций дна потока // Тр. Гидропроекта. 1964. Сб. 12. С. 265–271.
9. Дедков А.П., Мозжерин В.И. Эрозия и сток наносов на Земле. Казань: Изд-во КазГУ, 1984. 264 с.

10. *Голосов В.Н., Иванова Н.Н., Литвин Л.Ф. и др.* Трансформация стока наносов на водосборах малых рек Европейской части СССР // Совр. состояние малых рек СССР и пути их использования, сохранения и восстановления. Л.: Гидрометеоиздат, 1991. С. 96–103.
11. *Голосов В.Н., Иванова Н.Н., Литвин Л.Ф., Сидорчук А.Ю.* Баланс наносов в речных бассейнах рек Русской равнины // Геоморфология. 1992. № 4. С. 62–71.
12. *Сидорчук А.Ю.* Эрозионные и денудационные процессы в Новой Зеландии и формирование стока наносов // Эрозия почв и русловые процессы. 2008. Вып. 16. С. 32–73.
13. *Чалов Р.С., Шугуан Л., Алексеевский Н.И.* Сток наносов и русловые процессы на больших реках России и Китая. М.: Изд-во МГУ, 1999. С. 212.

Поступила в редакцию 29.04.2014

SEDIMENT BALANCE IN THE EROSION-DEPOSITION SYSTEMS

A.Ju. SIDORCHUK

Summary

The further development of the N.I. Makkaveev's theory of the unified erosion-deposition process is suggested. Manifestations of this process at different parts of the fluvial system (FS) were analyzed on the basis of the equation of sediment budget, which is universal and basic for all types of FS at different scales. The ratios of the values of the main terms in this equation: erosion, deposition and sediment flux from the catchment, are the explicit quantitative criteria for classification of the parts of FS and of their definition as erosional, dynamically stable or depositional, according to the sign of the sediment budget. It is proposed to define the overall FS type, from the head waters to a given cross-section, according to the delivery ratio.