

31. Belyaev V., Wallbrink P., Golosov V. et al. A comparison of direct measurement, USLE and caesium-137 based methods for evaluating soil redistribution from severe sheet and ephemeral gully erosion, Stavropol region, southern European Russia // *Geomorphology*. 2005. № 1. P. 173–193.

Московский государственный университет  
Географический факультет

Поступила в редакцию  
09.04.2007

## A QUANTITATIVE ASSESSMENT OF DEPOSITS' REDISTRIBUTION IN THE UPPER LINKS OF FLUVIAL NETWORK: ACHIEVEMENTS AND PROBLEMS

V.N. GOLOSOV

S u m m a r y

The main results of late decades in the field of deposits' redistribution analysis are basically the development of Makkaveyev's concept of single erosion-accumulation process. There are four primal lines of investigation: field monitoring of the small catch basins; an eliciting of deposits' redistribution dynamics by radionuclides' and other markers' concentration in soil; paleogeomorphologic investigations; integrated investigations of erosion-accumulation intensiveness within small catch basins. The simultaneous using of several approaches in concrete area investigation of erosion and accumulation rates is strongly recommended.

УДК 551.435.13→551.312.3

© 2008 г. Н.И. АЛЕКСЕЕВСКИЙ, К.М. БЕРКОВИЧ, Р.С. ЧАЛОВ

## ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ СООТНОШЕНИЯ ЭРОЗИИ И АККУМУЛЯЦИИ В РЕЧНЫХ РУСЛАХ<sup>1</sup>

Реки и продуцируемые ими русловые процессы составляют нижнее звено в единой системе: склоновые нерусловые потоки, производящие плоскостную эрозию почв и грунтов – временные русловые потоки, осуществляющие линейную (овражную) эрозию – реки и русловые процессы. Это основополагающее положение теории единого эрозионно-аккумулятивного процесса, созданной Н.И. Маккавеевым [1]. К его обоснованию он подошел, изучая русловые процессы на реках, которые он рассматривал “как элемент географической среды и как составную часть гидрографической сети суши” (с. 3). Совмещая географический и инженерный подходы к их исследованию и решению водохозяйственных, в первую очередь, путевых задач, Н.И. Маккавеев сделал вывод, что “развитие реки только тогда может быть правильно понято, если оно рассматривается в неразрывной связи с процессами развития потоков, составляющих верхние звенья” (с. 32).

Сформулировав общие законы и предложив модели развития всей системы эрозионно-аккумулятивных процессов, так и каждого ее звена, Н.И. Маккавеев главное внимание в своем научном творчестве уделил работе рек. При этом русловые процессы как нижнее, завершающее звено в цепочке явлений, обусловленных воздействием стока на земную поверхность, он трактовал как процессы, которые “в основном определяются взаимодействием движущейся воды, *перемещаемых водой наносов* (выделено авт.) и слагающих ложе потоков грунтов” [1, с. 137]. Как и процессы в других звеньях, русловые процессы представляют собой “совокупность ... явлений (отрыв, смыв, аккумуляция, осаждение, сортировка и обработка материала), рассматриваемых в пространстве и

<sup>1</sup> Выполнено при поддержке РФФИ (проект 06-05-64295) и гранту Президента РФ для поддержки ведущих научных школ (проект НШ-790.2008.5).

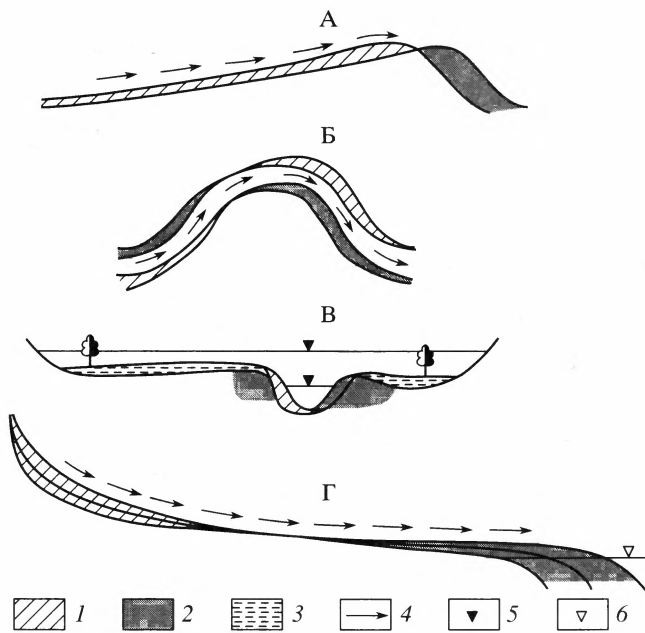


Рис. 1. Формы проявления закона взаимосвязи и сопряженности эрозии и аккумуляции наносов: А – при формировании гряд в русле, Б – при развитии форм русла (излучин), В – при образовании и развитии поймы, Г – при формировании продольного профиля реки 1 – размыв берегов и дна русла, 2 – аккумуляция русловых наносов, 3 – аккумуляция наносов на поверхности поймы, 4 – направление перемещения потоком наносов, 5 – уровни воды в реке, 6 – уровень приемного бассейна (моря)

верховой пологий склон размывается, а низовой крутой представляет собой место их накопления. При этом последние выходят из транзита до тех пор, пока не окажутся в зоне смыва на верховом склоне гряды (рис. 1, А). Речные острова смещаются вдоль реки за счет размыва их оголовков и роста косы в устье; излучины смещаются вследствие синхронного размыва вогнутого (внешнего) берега и аккумуляции наносов у выпуклого (внутреннего) (рис. 1, Б). В результате, "... формы русла можно рассматривать как одну из форм перемещения твердого вещества текущей водой ...", а "скопления наносов, образующие такие формы, как луки меандр, перекаты, гряды, обычно перемещаются вниз по течению, т.е. являются одним из видов твердого стока реки" [1, с. 139]. Это казалось бы аксиоматичное положение было впервые более полвека тому назад обосновано Н.И. Маккавеевым и с тех пор прочно вошло в наши представления о работе рек, составляя один из общих законов эрозионно-аккумулятивных процессов в целом и русловых процессов, в частности. Перемещение реками огромного количества твердого материала, врезание рек в земную поверхность или направленная аккумуляция наносов сопровождаются накоплением аллювиальных толщ. Их образование связано с формированием пойм, основу которых составляют обсыхающие в межень и закрепляющиеся растительностью прирусловые отмели (побочни, осередки, косы) (рис. 1, В).

Реки, протекающие в областях распространения легкоразмываемых пород, имеют широкопойменные слабоустойчивые русла, отличающиеся интенсивными деформациями. Наряду с транспортом наносов в руслах происходит их консервация в формирующихся пойменных массивах и поступление новых их порций при размыве пойменных берегов. В результате происходит постоянный массообмен между потоком наносов, русловыми отложениями и отложениями поймы (рис. 2). При этом на пойме при ее затоплении в многоводную фазу режима происходит отложение взвешенных наносов, которые образуют

времени, во взаимосвязи с определяющими факторами" [1, с. 83], но проявляющимися на реках, характеризующихся своими особенностями и закономерностями развития, в том числе из-за огромных различий в размерах водных потоков и величинах стока наносов. Таким образом, эрозия, транспорт (перемещение) и аккумуляция наносов, составляя сущность эрозионно-аккумулятивных процессов, определяют механизм их проявлений в руслах рек, причем именно "в реках сопряженность эрозионных и аккумулятивных процессов проявляется наиболее наглядно. Трудно найти реку без аллювия" [2, с. 14]. На любой реке можно встретить интенсивно размываемые берега и недавно образовавшиеся аккумулятивные прирусловые отмели. Перемещение речными потоками относительно крупных наносов (донных, влекомых) осуществляется в виде движения аккумулятивных гряд, у которых

пойменную фацию аллювия; при размыве поймы эти отложения вновь служат источником взвешенных наносов. Таким образом, “скопления пойменного аллювия являются ... одной из форм, в которой осуществляется твердый сток реки” [1, с. 236].

В процессе врезания реки отложения поймы переходят в категорию отложений террас, что генетически отличает их от пойменных, формирующихся в результате горизонтальных русловых деформаций. Отложения высокой поймы и террас служат источником наносов при размыве потоком их уступов.

Во врезанном русле, где горизонтальные русловые деформации ограничены трудно размываемыми горными породами, в которых оно формируется, накопление наносов выражено слабо, т.к. здесь происходит в основном их транзит, количество донных наносов невелико и поток нередко непосредственно контактирует с коренным ложем. В таких условиях размыв пойменных и террасовых берегов может практически полностью нейтрализовать накопление аллювиальных толщ. Следствием этого является фрагментарность, маломощность или вообще местами отсутствие аллювия в долинах рек с врезанным руслом.

Реки осуществляют перенос вещества на расстояния, соизмеримые, по образному выражению Н.И. Маккавеева, с поперечником (Амазонка) или половиной поперечника материков (крупнейшие реки Европы, Азии, Африки). При этом благодаря образованию и развитию форм русла, аллювиальных форм руслового рельефа и поймы дифференциация по длине реки зон эрозии, транспорта и аккумуляции обычно не проявляется, и на всем ее протяжении происходит многократное переотложение перемещаемого материала, аккумуляция части наносов в русле и на пойме, вплоть до их консервации и образования аллювиальных толщ. Систематическое накопление наносов свойственно нижнему течению рек (рис. 1, Г), где регрессивная аккумуляция является следствием их устьевого удлинения, колебаний уровня моря (базиса эрозии) или тектонических прогибов земной коры. Такая аккумуляция наносов реками прослеживается в течение вековых и геологических отрезков времени, и на ее фоне периодические русловые деформации обуславливают многолетние или сезонные размывы и намывы берегов и дна рек. Наоборот, в среднем и особенно в верхнем течении рек на фоне сложно переплетающихся в пространственно-временном проявлении процессов эрозии, транспорта и аккумуляции наносов в течение геологического времени происходит преимущественное направленное их врезание, т.е. здесь над другими составляющими единого процесса преобладает эрозия.

Характерно, что, формулируя спустя 20 лет после выхода своей знаменитой книги “Русло реки и эрозия в ее бассейне” общие и универсальные законы русловых (и в целом эрозионно-аккумулятивных) процессов [3], Н.И. Маккавеев назвал только три из них. Однако анализ книги и последующих работ Н.И. Маккавеева позволяет считать, что им было установлено семь таких законов (они рассмотрены в статье [4], помещенной в настоящем номере журнала) и среди них – закон сопряженности эрозии, транспорта и аккумуляции наносов.

Сопряженность эрозии и аккумуляции лежит в основе русловых процессов. В зависимости от соотношения между ними находится интенсивность и направленность обмена твердым веществом между транзитным потоком наносов и речными отложениями

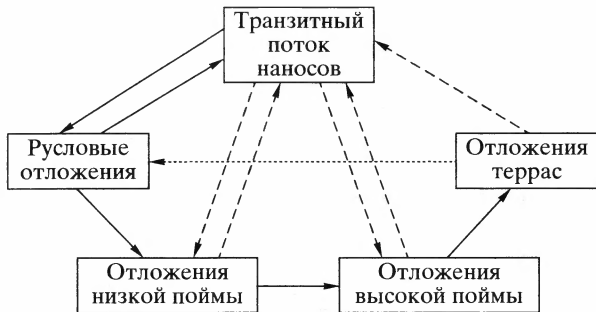


Рис. 2. Схема массообмена в реках между потоком и речными отложениями (по [7] с изменениями и уточнениями) Сплошные и пунктирные линии – большая или меньшая вероятность массообмена. Точечная линия – опосредованный массообмен или одностороннее направление перемещения наносов

ми разного возраста в речной долине. Взаимная связь эрозии и аккумуляции наносов объясняет формирование, развитие и эволюцию флювиальных форм рельефа от гряд в русле до речных долин. Особенно ярко она проявляется в речных руслах на разных структурных (масштабных) уровнях развития русловых процессов: в динамике продольного профиля реки, формировании морфологически однородных участков, эволюции и смещении форм русла и форм руслового рельефа, отрыве, перемещении и остановке отдельных частиц наносов [1, 5]. Соотношение эрозии и аккумуляции определяет каждый из этих видов русловых деформаций, но в каждом из них носит специфический характер, отличаясь по скорости процессов, значимости отдельных факторов в их развитии и пространственно-временным масштабам проявления.

Вместе с тем закон сопряженности эрозии и аккумуляции относится к числу базовых в теории русловых процессов. Он находится в основе ряда других законов, определяя специфику их проявления. Недаром Н.И. Маккавеев придавал большое значение единству составляющих эрозионно-аккумулятивного процесса и формам его проявления в речных руслах [6]. Нарушение сопряженности обуславливает трансформацию продольного профиля реки, изменение морфодинамического типа русла, смыв, преобразование или формирование новых гряд.

### Эрозионно-аккумулятивные процессы

Поскольку русловые процессы – взаимодействие потока воды и наносов с руслом, в ходе которого изменяется их состояние, то эрозия и аккумуляция являются формой, в которой проявляются русловые деформации, т.е. изменения во времени пространственного положения форм флювиального рельефа. Взаимосвязь эрозии и аккумуляции прослеживается на разных структурных морфологических уровнях как по длине рек (продольный профиль, морфологически однородные участки, формы русла и руслового рельефа), так и по ширине речных долин (в поперечном сечении речной долины, ее пониженной части – пойма + русло, в поперечном сечении русла и т.д.).

Связь между русловыми деформациями, эрозией и аккумуляцией устанавливается уравнением баланса и дисбаланса стока наносов на участке реки большей или меньшей длины. Эти уравнения учитывают многообразие форм проявления русловых процессов, соотношение эрозии и аккумуляции через изменение транзитного потока наносов и объема речных отложений, включая русловые, пойменные (высокой и низкой поймы) и террасовые. Для бесприточного участка любой реки уравнение баланса речных наносов имеет вид:

$$\Delta W = W_2 - W_1, \quad (1)$$

где  $W_2$  и  $W_1$  – сток речных наносов на нижней и верхней границах участка водотока,  $\Delta W$  – результирующая баланса [7]. Возможны три варианта соотношений между входящими и выходящими составляющими потока наносов:  $W_2 > W_1$ ,  $W_2 < W_1$  и  $W_2 = W_1$ . Они соответствуют трем возможным неравенствам:  $\Delta W > 0$ ,  $\Delta W < 0$ ,  $\Delta W = 0$ , которые указывают на характер изменения стока наносов, но не раскрывают причин увеличения, уменьшения стока наносов или его неизменности по длине участка реки. При отсутствии притоков, гравитационного и эолового механизмов поступления минеральных частиц на участок реки появление результирующей баланса речных наносов однозначно связано с изменением объема речных отложений  $\Delta W_0$ , поскольку

$$\Delta W = -\Delta W_0. \quad (2)$$

Из (2) следует, что сопоставляемые величины равны по абсолютной величине и отличаются по знаку. Продольному увеличению стока наносов соответствует уменьшение объема речных отложений и наоборот. При неизменности стока наносов стабильны также объемы русловых ( $W_a$ ) отложений, отложений высокой ( $W_n$ ), низкой ( $W_n$ ) поймы и террас ( $W_k$ ). Если сумма их частных объемов равна

$$W_0 = (W_a, W_n, W_n, W_k), \quad (3)$$

то изменение объема русловых отложений соответствует вертикальным, а объема пойменных и террасовых отложений – горизонтальным деформациям [8].

Результирующая баланса возникает как следствие воздействия различных процессов на изменение стока наносов. Внешние процессы (по отношению к участку реки) определяют величину ( $W_1$ ), режим поступления наносов к верхней границе участка и с его местного литосбора. Внутренние процессы способны изменить  $W_1$  до значений  $W_2$  вследствие изменения объема речных отложений  $W_0$ . Для учета суммарного влияния этих процессов целесообразно анализировать уравнение дисбаланса наносов (результирующей баланса наносов). Оно вскрывает причины возникновения условия  $\Delta W \neq 0$ :

$$\Delta W = \sum_{i=1}^P W_i - \sum_{j=1}^S W_j, \quad (4)$$

где  $W_i$  и  $W_j$  – частные вклады  $i$ -х внешних и  $j$ -х внутренних процессов в формирование результирующей баланса наносов. Если уравнение (1) справедливо для любых эрозионно-аккумулятивных систем вследствие универсальности закона сохранения вещества, то (4) характеризует многообразие процессов изменения стока наносов.

Набор процессов, учитываемых в правой части уравнения (4), зависит от положения участка реки в пределах речной сети и типа водных потоков. В верховьях как равнинных, так и горных рек в спектр определяющих факторов в основном входят эрозионные и разнообразные склоновые (гравитационные) процессы. Их интенсивность влияет на знак результирующей баланса и в общем случае является функцией природных условий стокообразования. Верховья рек являются областями продольного нарастания характеристик стока и, следовательно, для них более типично увеличение стока наносов по длине рек, т.е. условие  $\Delta W > 0$ . Оно означает, что объем горных пород и русловых отложений здесь уменьшается ( $\Delta W_0 < 0$ ). В среднем течении рек, где долины заметно расширяются и уменьшается значимость склоновых процессов, основные закономерности изменения стока наносов на бесприточных участках водотоков связаны с эрозией и аккумуляцией, определяющих горизонтальные и вертикальные деформации русла. Размыт отложений означает, что  $\Delta W_0 < 0$ , их накопление возникает при условии  $\Delta W_0 > 0$ . В среднем течении равнинных рек величина  $\Delta W_0$  обычно знакопеременна и равновесие между объемами эрозии и аккумуляции достигается за некоторый характерный период времени  $T$ . В нижнем течении рек роль эрозионно-аккумулятивных процессов в изменении стока наносов оказывается основной, поскольку влияние других факторов незначительно. Главная особенность трансформации стока наносов в низовьях рек – продольное уменьшение стока наносов, при котором  $\Delta W < 0$ ,  $\Delta W_0 > 0$ . Одновременно (на всех участках) возможен поперечный дисбаланс наносов, соответствующий местным русловым деформациям на уровне форм русла и крупных форм руслового рельефа (перекатов).

Единство эрозии и аккумуляции в теории русловых процессов связано с общим механизмом этих процессов, определяемым законом автоматического выравнивания транспортирующей способности потока  $W_{тр}$ . В его основе находится соотношение между стоком речных наносов  $W$  и  $W_{тр}$ . Существуют “некоторые общие особенности развития русловых систем, зависящие от двух свойств русловых потоков...: а) способности потока переносить твердый материал и б) свойства потока выравнивать удельную транспортирующую способность по длине русловой системы”, сущность которого “заключается в том, что в местах, где транспортирующая способность относительно мала, происходит или замедление эрозии или аккумуляция, продолжающиеся до тех пор, пока не установится такой уклон, при котором транспортирующая способность потока на данном участке сравняется с транспортирующей способностью потока на вышележащем участке” [1, с. 51].

В свободных условиях развития русловых деформаций и в зависимости от соотношения между  $W$  и  $W_{тр}$  объем речных отложений возрастает или уменьшается. Если  $W_{тр} < W$ , то поток избыточно “нагружен” наносами, их часть, соответствующая разнице  $W - W_{тр}$ , аккумулируется, что приводит к увеличению объема русловых отложений

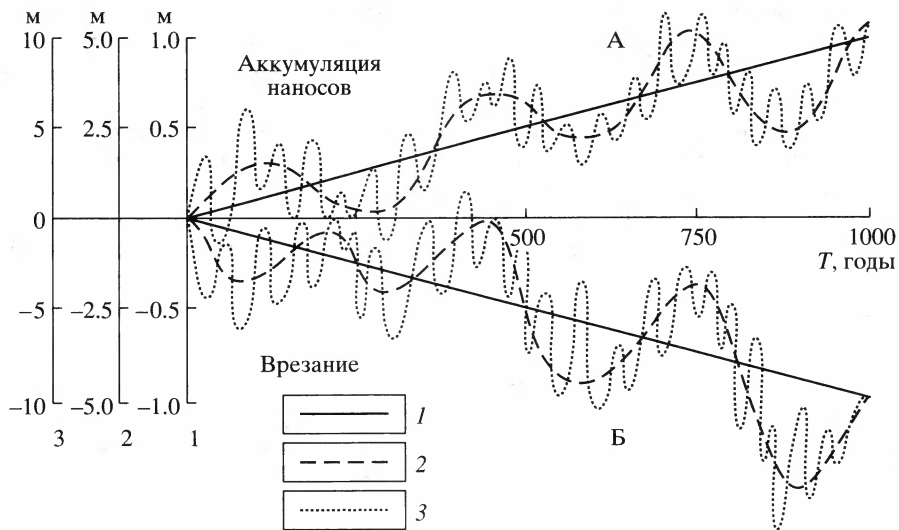


Рис. 3. Соотношение во времени  $T$  общих направленных (1), периодических местных вертикальных деформаций, связанных с развитием форм русла (2) и текущих знакопеременных деформаций, обусловленных смещением грядовых форм руслового рельефа (3): А – при направленной аккумуляции наносов, Б – при врезании реки. Каждая вертикальная шкала (1–3) – отметки дна относительно условного “0” при различных видах вертикальных деформаций

на участке реки, повышению отметок дна. При условии дальнейшего увеличения транспортирующей способности потока (в сужении русла реки, при увеличении расхода воды вследствие боковой приточности и т.п.) оказывается, что  $W_{тр} > W$ . В соответствии с принципом Ле-Шетелье, который действует и в эрозионно-аккумулятивных системах, взаимодействия между элементами системы в этом случае направлены на уменьшение  $W_{тр}$  и увеличение стока наносов. Единственной формой реализации такого взаимодействия является эрозия. Она приводит к местному понижению отметок дна, уменьшению уклона дна и водной поверхности, транспортирующей способности потока. Одновременно уменьшается объем русловых отложений и растет сток наносов руслового происхождения. Таким образом, возникает “волнообразное” чередование по длине реки зон эрозии и аккумуляции, обусловленное четковидностью долины реки (чередованием сужений и расширений), изменением гидравлических характеристик потока в пределах форм русла (например, на излучинах и в разветвлениях русла) и, наконец, в связи с формированием грядовых форм руслового рельефа как отражения турбулентной структуры потока. Проявлением этой закономерности является практически повсеместное чередование плесов и перекатов на равнинных реках. Н.И. Маккавеев считал, что наличие таких зон наряду с разномасштабными по длине реки изменениями транспортирующей способности потока обусловлено неравномерностью стока по длине реки и во времени, изменениями концентрации и крупности наносов, поступающих в русло реки [1]. Устойчивость плес-перекатной формы чередования зон эрозии и аккумуляции поддерживается гидравлической структурой потока, временем существования и размерами макровихрей турбулентного потока и обратным воздействием на них самих форм руслового рельефа (закон ограниченности морфологических комплексов М.А. Великанова–Н.И. Маккавеева: “русловые формы относительно устойчивы и, следовательно, типичны, если они возбуждают процессы, соответствующие их возобновлению” [6, с. 12]).

Изменения объема горных пород и речных отложений вследствие эрозии и аккумуляции прослеживаются в различных масштабах времени и структурных уровнях развития русловых процессов (рис. 3). В геологическом масштабе времени эти процессы приводят к деформациям продольного профиля рек и преобразованиям морфологии

речных долин. В историческом масштабе времени эрозионно-аккумулятивные процессы проявляются на участках рек, а объем горных пород и русловых отложений в пределах речных долин существенно не меняется. В многолетних масштабах времени изменения объема отложений, эрозии и аккумуляции наиболее четко выражены на участках формирования морфодинамических типов русла. В процессе горизонтальных деформаций уменьшается объем пойменных и, нередко, террасовых отложений. Одновременно возрастает объем русловых отложений и сток наносов. Однако смещение формы русла сопровождается увеличением объема пойменных отложений за счет перехода русловых отложений в состав русловой фации пойменных отложений. Объем этих отложений также увеличивается вследствие накопления транзитных фракций речных наносов на поверхности поймы. При прочих равных условиях, чем больше мутность речных вод, тем больше скорость повышения отметок поймы.

На фоне сезонной изменчивости стока наносов и транспортирующей способности русловых потоков чередование зон эрозии и аккумуляции наиболее ярко прослеживается в системе плес–перекат и по длине гряд, образующих иерархию форм руслового рельефа. Быстро изменяющаяся структура скоростного поля потока, отражающая внутрисезонную изменчивость стока наносов, скорости и глубины потока, возникновение, эволюцию и разрушение турбулентных вихревых образований, ответственна за наличие поперечной неоднородности эрозии и аккумуляции, преобладание процессов размыва и осаждения частиц. Накладываясь друг на друга, пространственно-временные изменения направленности вертикальных русловых деформаций разных уровней проявления обуславливают постоянные флуктуации отметок продольного профиля реки. Его направленные изменения в геологических масштабах времени сказываются только в виде общего тренда, на фоне которого происходят периодические, с разным временем и амплитудой колебания. Каждый из рассмотренных характерных временных масштабов проявления единства эрозии и аккумуляции отличают особые закономерности русловых процессов.

### Эволюция продольного профиля рек

Формирование продольного профиля в геологических и исторических масштабах времени отражает сложное сочетание эрозии и аккумуляции. Особенности эрозионно-аккумулятивных процессов соответствуют при этом формированию выработанного продольного профиля [1], в основе которого лежит условие равенства стока наносов транспортирующей способности потока, т.е.

$$W_i = W_{\text{тр}}, \quad (5)$$

где  $i$  – индекс произвольной точки на продольном профиле дна реки. Если заменить обе части (5) соответствующими уравнениями, скорость потока выразить по формуле Шези, в которой уклон характеризует продольное изменение отметок дна, то можно получить уравнение, описывающее выработанный продольный профиль реки при данных гидравлических условиях [1, 9–11]. Реальные выработанные продольные профили рек могут иметь разнообразную форму. Главное, что в каждой точке выполняется условие (5). Если в данный момент времени это условие не выполняется, то возникающие русловые процессы направлены на уменьшение или увеличение уклона реки на данном участке реки: при  $W > W_{\text{тр}}$  происходит аккумуляция, вследствие чего увеличиваются уклон и транспортирующая способность потока; при  $W < W_{\text{тр}}$  на участке реки доминирует эрозия, уменьшается продольный уклон и транспортирующая способность потока. В результате возникают предпосылки для достижения условия (5), которое соответствует выработанному продольному профилю реки при данном расходе воды. Поскольку при других расходах воды величина русловых деформаций, соответствующая формированию выработанного продольного профиля, отличается по величине, то для оценки результирующего влияния всех расходов воды на формирование отметок выработанного продольного профиля дна можно использовать специальную весовую функцию [9], напоминающую выражение, использованное

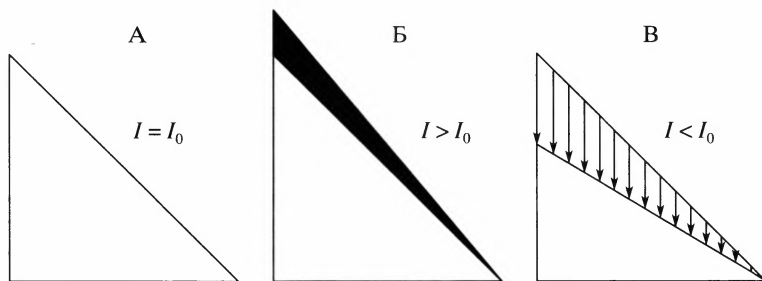


Рис. 4. Реакция стабильной системы “поток–русло” (А) на увеличение стока наносов (Б) или транспортирующей способности потока (В) [7]

Н.И. Маккавеевым для оценки руслоформирующих расходов воды  $Q_{\Phi}$  и имеющую аналогичный физический смысл: чем больше повторяемость некоторого расхода воды, тем больший вклад в формирование выработанного профиля дна (на данном участке реки) вносит этот расход и тем больше его руслоформирующее значение [1].

Если полагать, что эффект воздействия всего стока на формирование отметок продольного профиля дна эквивалентен воздействию одного  $Q_{\Phi}$ , то можно [7] определить “устойчивый” уклон, который соответствует равенству (5) для условий прохождения руслоформирующего расхода воды

$$I_0 = \frac{k_i R_{p_i}^m}{Q_{\Phi_i}^p}, \quad (6)$$

где  $R_{p_i}$  – сток наносов руслообразующих фракций,  $Q_{\Phi_i}^p$  – руслоформирующий расход воды. Эмпирические коэффициенты  $k$ ,  $m$ ,  $p$  индивидуальны для участков  $i$  каждой реки. Фактический уклон дна  $I$  в общем случае не равен  $I_0$ . Уменьшение  $R_p$  или увеличение руслоформирующего расхода воды  $Q_{\Phi}$  уменьшает “устойчивый” уклон (рис. 4). Восстановление утраченного соответствия между фактическим расходом наносов и транспортирующей способностью потока осуществляется путем трансгрессивной глубинной эрозии. Ее результатом является уменьшение фактического уклона дна до величины, равной  $I_0$ . За счет эрозии и уменьшения объема речных отложений на участке реки достигается условие (5). В противном случае (при природном или техногенном увеличении  $R_p$  или уменьшении величины  $Q_{\Phi}$  на  $i$ -том участке русла) развивается трансгрессивная аккумуляция. Она направлена на увеличение фактического уклона реки до величины  $I_0$ . Достижение их равенства означает выполнение условия (5) на фоне возросшего объема речных отложений. Таким образом, происходит автоматическое выравнивание транспортирующей способности потока по длине рек и формирование выработанного продольного профиля.

В реальных условиях существует большое разнообразие причин, приводящих к нарушению равенства (5) и форм адаптации системы поток–русло к новым условиям (спрямление рек и их устьевое удлинение, изменение базиса эрозии и др.). Формирование выработанного продольного профиля после гигантского увеличения стока наносов и уклона наблюдалось вследствие катастрофических обвала и селей, вызванных извержением вулкана на северо-западе США [12]: поток начал интенсивно врезаться, перерабатывая отложения с крупностью частиц до 120 мм; за 10 лет и на участке длиной более 10 км глубина врезания составила 20–30 м. Ниже по течению резко увеличился расход наносов по сравнению с транспортирующей способностью потока, и в соответствии с (6) здесь доминировала трансгрессивная аккумуляция, приведшая к увеличению уклонов до величины  $I_0$ , отметки дна реки повысились на 4 м. Аналогич-

ные процессы развиваются на р. Баксане (Северный Кавказ) после перекрытия реки селевым выносом из притока у г. Тырныауза в 2000 г.

Другой пример сочетания эрозии и аккумуляции при формировании продольного профиля дна – его трансформация ниже крупных водохранилищ – процесс, который был детально изучен Н.И. Маккаевым [13]. Вследствие перехвата наносов водохранилищем ниже плотины расход руслообразующих наносов резко снижается по сравнению с фоновыми условиями. Это нарушает равенство (5). Поскольку устойчивый уклон здесь оказывается меньше фактического, ниже плотины развивается глубинная эрозия в соответствии с законом автоматического выравнивания транспортирующей способности потока. Быстрое увеличение стока наносов, обусловленное размывом русловых отложений, происходит на первых 20–50 км нижнего бьефа. Во многих случаях оно настолько велико, что местная транспортирующая способность потока оказывается меньше стока наносов. В результате эрозия вниз по течению сменяется аккумуляцией наносов. Обе области – эрозии и аккумуляции продвигаются вниз по течению. Особенно ярко этот процесс проявляется на реках с песчаным составом влекомых наносов [14].

Еще один пример трансформации продольного профиля дна вследствие изменения соотношения эрозии и аккумуляции дает р. Ока. Из-за сведения лесов, распашки склонов водосбора, эрозии почв изменились величина, режим стока воды и наносов. Увеличение стока наносов в соответствии с законом автоматического выравнивания транспортирующей способности потока привело к тому, что на верхней Оке в начале XX в. происходила направленная аккумуляция наносов и повышались отметки дна: в 120 км от истока реки – со скоростью 1.5–2 см/год, в 250 км – 0.6 см/год [1]. Этот процесс, сопровождающийся ростом минимальных уровней воды, к началу 50-х гг. XX в. достиг г. Калуги (400 км от истока) [15]. На нижней Оке (580 км от истока) уровни понижались примерно с той же интенсивностью, что, возможно, связано с местным увеличением транспортирующей способности потока по сравнению со стоком руслообразующих наносов.

### **Эрозия и аккумуляция при развитии форм русла**

Характерным примером одновременного совместного проявления эрозии и аккумуляции является смещение всего русла с островами и излучинами в сторону одного из бортов долины. При этом формируется односторонняя пойма. В этом случае взаимосвязанные процессы размыва речных отложений и их накопления развиваются в продольном и поперечном направлении по отношению к оси долины, обуславливая направленные горизонтальные деформации.

Эрозия и аккумуляция определяют развитие русла того или иного морфодинамического типа. Их сочетание лежит в основе эволюции излучин, разветвлений и относительно прямолинейных участков рек, на что неоднократно указывал Н.И. Маккаев [1, 2, 6]. Наиболее устойчивыми типами русла являются излучины; для их существования характерно, что результирующая баланса наносов по их длине  $\Delta W \cong 0$ . Для сохранения прямолинейных очертаний русла необходимо несколько условий. Одним из них служит условие  $\Delta W > 0$ , т.е. по длине относительно прямолинейного участка реки транспортирующая способность потока превышает поступающий сток наносов. Для участков разветвленного русла в целом характерно условие  $\Delta W < 0$  [1, 7].

Развитие относительно прямолинейного русла, проходящего вдоль высокого коренного берега, является хорошо известным примером одновременного проявления эрозии и аккумуляции. Они часто прослеживаются на большом протяжении, если линия высокого берега ровная. Резко выступающие мысы берега, отклоняя поток от него, способствуют снижению транспортирующей способности по сравнению с величиной стока наносов. В результате прямолинейное русло сменяется серией излучин или разветвлениями.

Синхронность эрозии и аккумуляции характеризует развитие разветвлений. Это связано с тем, что по рукавам разветвлений быстро или медленно, но периодически происходит перераспределение стока воды. Так, в Дресвянском разветвлении верхней Оби ниже г. Камня-на-Оби перемещение главного течения из одного рукава в другой занимает около 60 лет; на Северной Двине эта периодичность составляет 10–20 лет. В результате в рукаве с увеличивающейся водностью доминирует размыв русловых от-

Дата, расход воды, м <sup>3</sup> /с	Расход наносов выше разветвления		Суммарный расход наносов в рукавах		Результирующая баланса наносов	
	взвешенных R, кг/с	влекомых G, кг/с	взвешенных $\Sigma R_p$ , кг/с	влекомых $\Sigma G_p$ , кг/с	взвешенных $\Delta R$ , кг/с	влекомых $\Delta G$ , кг/с
06.06, 34000	2400	1320	2400	500	0	-820
23.06, 24600	1740	850	2060	470	320	-380

ложений, тогда как в другом, водность которого уменьшается, – накопление наносов. Скорости аккумуляции/эрозии на последнем этапе перестройки разветвления равны, составляя 4–8 см/год.

Наличие разветвлений отражает реакцию системы поток–русло на условие  $\Delta W < 0$  и  $W > W_{тр}$ . Накопление отложений на таких участках рек сопровождается местным увеличением уклонов, образованием систем водотоков, суммарная транспортирующая способность которых больше или равна стоку наносов, поступающему к вершине разветвления русла. При максимальных уровнях воды разветвление увеличивает сопротивление водному потоку, снижая его транспортирующую способность. В результате часть наносов переходит в состав речных отложений (таблица). На спаде уровней суммарная транспортирующая способность потоков воды в системе разветвления возрастает, что обеспечивает размыв речных отложений и повышенный вынос наносов за пределы разветвления. Наблюдения в Якутском разветвлении р. Лены показывают, что при высоких расходах воды результирующая баланса наносов отрицательная для влекомых наносов, причем темпы накопления наносов на участке реки сохраняются стабильными для всей фазы нарастания стока. Для взвешенных наносов результирующая баланса больше или равна нулю.

Аналогичные результаты были получены за многолетний период для Усть-Алданского разветвления (изменение объемов отложений) на основе совмещения планов русла в изобатах [17].

Сопряженность эрозии и аккумуляции наиболее ярко проявляется в развитии излучин, которое происходит вследствие размыва вогнутого берега при одновременном накоплении наносов у выпуклого берега. Темпы этих процессов существенно различаются для разных рек, колеблясь от <1 до десятков м/год. На нижней Оке в районе Рязани средняя скорость отступления вогнутых берегов в 1940–1990 гг. составляла 2.5 м/год. Это соответствовало уменьшению объема пойменных отложений на 19.5 тыс. м<sup>3</sup> с одной излучины. При этом ширина русла оставалась неизменной (220–230 м), а местами даже уменьшалась. По подсчетам А.А. Зайцева [18] на нижнем Вилюе размыв вогнутого террасового берега высотой 25–30 м, происходящий со скоростью 20–25 м/год, поставляет в русло ежегодно 1.1 млн. м<sup>3</sup> песка. На намываемом берегу наблюдалось расширение прирусловой отмели и ее зарастание, что характеризует увеличение объема пойменных отложений.

Скорости размыва и образования пойменных массивов не всегда соответствуют изменению объемов эрозии и аккумуляции на участках излучин. Скорости размыва излучин Оби выше г. Камня-на-Оби достигают 30 м/год. При этом часто размываются уступы правобережных песчаных надпойменных террас высотой до 50 м. Годовой объем материала, поступающего в русло от размыва вогнутого берега только одной такой излучины, составляет 3.5–4.0 млн. м<sup>3</sup> [19]. Ширина русла остается неизменной, т. к. на противоположном берегу формируется молодая пойма. Однако объем отложений в новообразованной пойме отличается от объема размыва отложений террас, поскольку часть этого объема пополнила сток речных наносов и объем русловых отложений.

Приведенные примеры подтверждают вывод Н.И. Маккавеева, “что между пойменным и русловым аллювием происходит постоянный обмен материалом, и что поймы являются источником их (наносов) пополнения” [1, с. 237].

## Эрозия и аккумуляция при смещении форм руслового рельефа

Движение грядовых форм руслового рельефа представляет собой типичную форму синхронного проявления эрозии и аккумуляции. Частицы, выносимые с верхового откоса гряды, отражают непрерывный результат размыва поверхностного слоя русловых отложений. Осаждение наносов в подвалье гряд, наоборот, отражает непрерывный процесс их аккумуляции. Результирующий эффект эрозии и аккумуляции в данном случае проявляется в перемещении формы руслового рельефа вдоль потока. На перекатных участках рек формируется сложная иерархия русловых форм [7, 10]. В зависимости от фазы водного режима, размера рек и скорости течения гряды разных типов, образующие эту иерархию, испытывают большее или меньшее влияние эрозионно-аккумулятивных процессов более высоких рангов. При увеличении расходов воды некоторые из этих русловых форм начинают смещаться медленнее, размываются потоком, другие – быстрее, поскольку их длина находится в соответствии с длиной пути перемещения отдельных частиц при данных гидравлических и гидрологических условиях. Изменение этих условий (увеличение или уменьшение расходов воды) приводит к изменению длины пути, появлению нового типа гряд, геометрические и динамические характеристики которых находятся в соответствии с длиной перемещения частиц наносов, образующих русловые формы.

Многолетние деформации руслового рельефа связаны с перемещением гряд, размеры которых соизмеримы с шириной русла. Интенсивность таких деформаций на реках близкого размера зависит от устойчивости их русла. Еще Н.И. Маккавеев [1] получил обратную зависимость скорости смещения перекатов  $C_n$  от устойчивости русла

(числа Лохтина Л)  $C_n = k \frac{Q_{\Phi}}{L}$ , впоследствии подтвержденную и уточненную на многих

реках, в т.ч. с применением других показателей устойчивости. Он же первым дал оценку стока влекомых наносов по скорости смещения перекатов (на примере Волги и Дона). На Оке в районе Рязани, где коэффициент стабильности Н.И. Маккавеева

$K_c = 100 \frac{d}{b_p l}$  ( $b_p$  – ширина русла,  $d$  – диаметр русловых отложений,  $l$  – уклон при сред-

немаксимальном расходе воды) равен 5–6, длина самых крупных гряд (перекатов) составляет 500–1000 м, высота – 0.5–1.5 м, скорость смещения 10–15 м/год. Ежегодный объем переотложенных наносов при движении такой гряды оценивается величиной порядка 3.5–4.0 тыс. м<sup>3</sup>. В то же время на верхней Оби коэффициент стабильности  $K_c$  не превышает 1. Движение осередков и побочней происходит здесь со скоростью до 500 м/год. Средний годовой объем переотложения русловых наносов в одной русловой форме составляет около 200 тыс. м<sup>3</sup>, а максимальный достигает почти 400 тыс. м<sup>3</sup>. Поскольку на поверхности дна находится от 2 до 5 таких русловых форм, то объем эрозии и аккумуляции в их пределах достигает 1 млн. м<sup>3</sup>/год.

Такие же закономерности характерны для элементарной площадки речного дна, в пределах которой эрозия и аккумуляция проявляются в отрыве, перемещении, взвешивании и остановке движения отдельных частиц. При этом определяет механизм процесса соотношение между скоростью потока, неразмывающей скоростью, максимальной пульсационной составляющей скорости и гидравлической крупностью частиц. Преимущественный срыв и взвешивание частиц свидетельствует об эрозии и понижении отметок дна элементарной площадки, при преобладании осаждения – аккумуляция и повышение отметок дна.

Все эти разномасштабные в пространственном и временном проявлении процессы эрозии и аккумуляции накладываются друг на друга, создавая очень сложную картину формирования русла, поймы и речной долины, осуществляясь в одних случаях на протяжении геологических периодов, в других – перед глазами наблюдателя. Развиваясь разнонаправленно и сменяя знак направленности на разных морфологических структурных уровнях, они создают волнообразный по длине и во времени характер изменений отметок дна русла и продольного профиля реки.

Русловедческое наследие Н.И. Маккавеева многогранно. Нет такого раздела в теории русловых процессов, в котором он не проводил бы исследований или не высказал своей позиции, основанной не только на глубоком знании предмета, но и на проникновении в физическую сущность явления. Дать всесторонний анализ сделанного им в изучении русловых процессов, отразив последующее развитие созданного им географо-гидрологического направления, в отдельной статье не представляется возможным; поэтому авторы ограничились оценкой значимости применения на современном этапе наиболее общего закона русловых процессов – взаимосвязи эрозии, транспорта и аккумуляции наносов, представляющего собой краугольный камень всего учения о едином эрозионно-аккумулятивном процессе.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Маккавеев Н.И.* Русло реки и эрозия в ее бассейне. М.: Изд-во АН СССР, 1955. 346 с.
  2. *Маккавеев Н.И.* Некоторые особенности эрозионно-аккумулятивного процесса // Эрозия почв и русловые процессы. М.: Изд-во МГУ, 1981. Вып. 8. С. 5–17.
  3. *Маккавеев Н.И.* Общие закономерности эрозионно-русловых процессов // Тр. IV Всесоюз. гидрол. съезда. Л.: Гидрометеиздат, 1976. Т. 10. С. 8–12.
  4. *Чалов Р.С., Голосов В.Н., Сидорчук А.Ю.* Учение Н.И. Маккавеева о едином эрозионно-аккумулятивном процессе и теория эрозионно-русловых систем (к 100-летию со дня рождения Н.И. Маккавеева) // Геоморфология. 2008. № 3. С. 6–14.
  5. *Кондратьев Н.Е., Ляпин А.Н., Попов И.В. и др.* Русловой процесс. Л.: Гидрометеиздат, 1959. 372 с.
  6. *Маккавеев Н.И.* Русловой процесс как одно из проявлений эрозионно-аккумулятивного процесса // Докл. секции русловых процессов Науч. Совета “Комплексное использование и охрана водных ресурсов” ГКНТ. Вып. 1. Общие вопросы теории руслового процесса. Л.: Гидрометеиздат, 1986. С. 56–65.
  7. *Алексеевский Н.И.* Формирование и движение речных наносов. М.: Изд-во МГУ, 1998. 202 с.
  8. *Чалов Р.С.* Географические исследования русловых процессов. М.: Изд-во МГУ, 1979. 232 с.
  9. *Алексеевский Н.И., Михайлов В.Н., Сидорчук А.Ю.* Гидролого-морфометрическое обоснование оптимального регулирования русла в низовьях р. Терек // Вестн. МГУ. Сер. 5. География. 1985. № 4. С. 99–105.
  10. *Сидорчук А.Ю.* Структура рельефа речного русла. СПб.: Гидрометеиздат, 1992. 126 с.
  11. *Чалов Р.С.* Выработанный продольный профиль и направленные вертикальные деформации речных русел // Геоморфология. 1995. № 3. С. 18–24.
  12. *Simon A.* Energy, time and channel evolution in catastrophically disturbed fluvial system // *Geomorphology*. 1992. № 5. P. 345–372.
  13. *Маккавеев Н.И.* Воздействие крупного гидротехнического строительства на геоморфологические процессы в речных долинах // Геоморфология. 1970. № 2. С. 28–34.
  14. *Vabiński Z.* Wpływ zarząd na procesy korytowe rzek aluwialnych // *Bydgoszcz: Wyd. Akademii Bydgoskiej*. 2002. 185 s.
  15. *Беркович К.М.* Современная трансформация продольного профиля верхней Оки // Геоморфология. 1993. № 3. С. 43–49.
  16. *Алексеевский Н.И., Зайцев А.А., Чалов Р.С.* Баланс наносов, деформации и возможности регулирования разветвленного русла крупнейшей реки (на примере р. Лены у г. Якутска) // Тр. акад. водохоз. наук. 1996. Вып. 3. С. 90–108.
  17. *Ермакова А.С., Кирик О.М.* Морфология и перестроения русла на Усть-Алданском участке р. Лены // Геоморфология. 2006. № 2. С. 62–73.
  18. *Зайцев А.А.* Формирование свободных излучин на равнинных реках: Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. М.: МГУ, 1979. 24 с.
  19. *Брюханов В.Н.* Оценка стока наносов рек Алтая // Тр. Сиб. регион. НИГМИ. 2000. Вып. 102. С. 74–87.
- Московский государственный университет Поступила в редакцию  
 Географический факультет 09.04.2007

### SPACE-TIME RELATIONS OF EROSION AND ACCUMULATION IN THE RIVER CHANNELS

N.I. ALEKSEYEVSKY, K.M. BERKOVITCH, R.S. CHALOV

#### S u m m a r y

The Makkaveyevs' law of the interconnection between erosion, sediment transport and accumulation is analyzed. The recent development of this law is discussed. The characteristics of time-space correlations of erosion and accumulation are shown at different levels of channel processes: from longitudinal river profile to sand wave relief of river bed.