

## ЭРОЗИОННО-РУСЛОВЫЕ СИСТЕМЫ, ИХ СТРУКТУРА, САМОРЕГУЛИРОВАНИЕ И ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ<sup>1</sup>

### Введение

Вся совокупность процессов смыва и размыва почв, горных пород и отложений, перемещения, переотложения и накопления наносов водными потоками составляет комплекс эрозионно-аккумулятивных процессов, отдельные звенья которых тесно связаны между собой и зависят друг от друга. Сток воды, сток и транспорт наносов при этом выступают в качестве активных факторов процессов, литогенная основа – как важнейшая пассивная составляющая взаимодействия потоков с подстилающей поверхностью, сопротивляющаяся размыву слагающих ее грунтов; рельеф и почвенно-растительный покров представляет собой фон, контролирующий деятельность водных потоков по отрыву частиц грунта, их перемещению и накоплению. В итоге эрозионно-аккумулятивные процессы отражают взаимодействие водных потоков с поверхностью суши, составляя главнейший и наиболее мощный агент ее денудации.

Вся совокупность эрозионно-аккумулятивных процессов состоит из трех взаимосвязанных и последовательно расположенных звеньев, соответствующих определенным типам водных потоков [1]: 1) временным нерусловым, осуществляющим плоскостную эрозию на склонах (эрозию почв); 2) временным русловым, обуславливающим линейную (овражную) эрозию; 3) постоянным русловым (рекам), взаимодействие которых с грунтами, слагающими ложе – дно и берега приводит к их размыву (эрозии), транспорту и аккумуляции наносов, определяет развитие самих русел, форм руслового рельефа, их сезонные, многолетние и вековые изменения [2, 3]. Водные потоки, подстилающая поверхность, на которую они воздействуют, эрозионно-аккумулятивные процессы, являющиеся следствием взаимодействия двух сред, из которых одна находится постоянно в движении, другая – относительно стабильна, и создаваемые ими формы рельефа образуют эрозионно-русловые системы (ЭРС). Основы учения об эрозионно-русловых системах были заложены в середине XX столетия трудами Н.И. Маккавеева, в первую очередь его книгой “Русло реки и эрозия в ее бассейне” [1], уже название которой отражает его суть. Эта книга предвосхитила на десятилетия признание единства всех флювиальных (эрозионно-аккумулятивных) процессов как в отечественной, так и в зарубежной литературе [4]. В обобщенном виде концепция ЭРС изложена в ряде публикаций [5–7]. Задача настоящей статьи – показать взаимосвязь между звеньями сети водных потоков и продуцируемых ими эрозионно-аккумулятивных процессов, проявляющихся в саморегулировании всей системы, общие и специфические особенности и морфологическое единство и подобие (при масштабных изменениях) форм рельефа как результата взаимодействия потоков с подстилающей поверхностью.

### Структура и функционирование ЭРС

Эрозионно-русловые системы (ЭРС) функционируют в пределах водосборных бассейнов и состоят из ЭРС разных рангов, соответствующих водосборам от элементарного склонового до бассейна крупнейшей реки, каждая из которых представляет

---

<sup>1</sup> Работа выполнена по программе Президента РФ для поддержки ведущих научных школ (проект НШ-79.2012.5) и при финансовой поддержке РФФИ (проект № 12-05-00348).

Доложено на Всероссийской научной конференции “Самоорганизация в эрозионно-русловых системах и динамике речных долин” с участием иностранных ученых (г. Томск, ИМКЭС СО РАН, 3–5 июля 2012 г.).

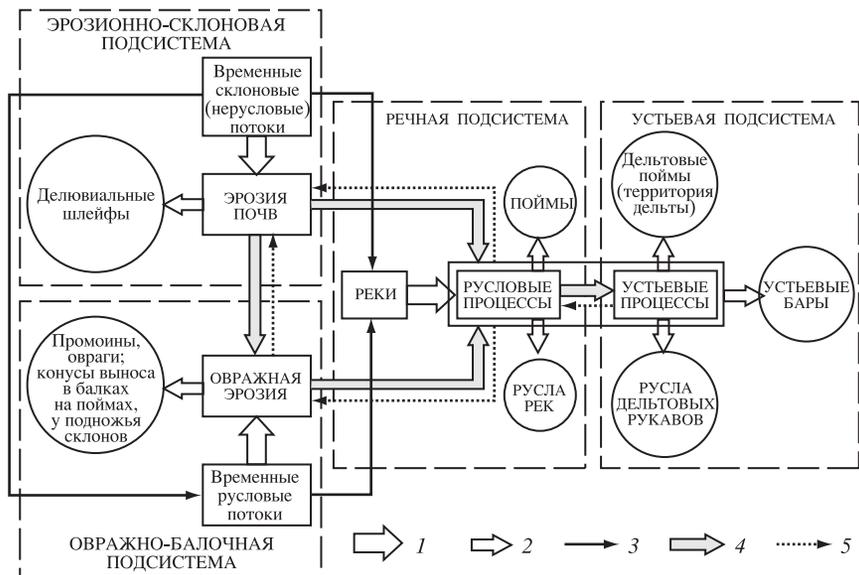


Рис. 1. Структура эрозионно-русловой системы и эрозионно-аккумулятивных процессов  
 Прямые связи: 1 – потоков с процессами разных типов, 2 – процессов и создаваемых ими форм рельефа;  
 направления перемещения: 3 – воды, 4 – наносов; 5 – обратные связи между процессами [3, 5, 6 с добавлениями]

собой совокупность частных подсистем: эрозионно-склоновой, овражно-балочной, речной и устьевой (рис. 1). Выделение последней возможно в тех ЭРС, которые замыкаются на приемном водоеме и которые характеризуются последовательным рассредоточением стока, абсолютным преобладанием аккумулятивных процессов и влиянием на поток и сами процессы явлений, связанных с приемным водоемом (сгоны и нагоны, для устьев рек, впадающих в моря – также приливы и отливы, вдольбереговые течения и т. д.). С другой стороны, понижение ранга ЭРС может сопровождаться редуцированием ее структуры – выпадением тех или иных ее элементов (подсистем); то же происходит в определенных природных условиях. Например, на низменных плоских равнинах отсутствует овражно-балочная подсистема, речная выпадает в бессточных областях и т. д.

Главными следствиями воздействия временных нерусловых потоков на склон являются понижение его отметок, формирование делювиальных шлейфов у их подножия и вынос части материала смыва и размыва почв и грунтов в овражно-балочную сеть и реки. Овражная эрозия как следствие работы временных русловых потоков расчленяет поверхность, создает условия для увеличения уклонов склонов (или вообще приводит к их возникновению) и, следовательно, для активизации эрозии нерусловыми потоками. Она приводит к образованию оврагов как отрицательных форм флювиального рельефа, имеющих свое русло, склоны, борта, формирует конуса выноса в балках, на поймах рек и у подножия склонов, являющих их базисом эрозии, или поставляет материал размыва в реки. Благодаря склоновой и овражной эрозии в реках формируется бассейновая составляющая стока наносов, создающая большую часть взвешенных наносов. Вместе с тем в этих подсистемах (склоново-эрозионной и овражно-балочной) деятельность водных потоков, смыв и размыв почв и грунтов, перемещение ими смытого материала осуществляются на короткие расстояния, причем по длине склона или оврага достаточно четко выделяются зоны размыва/смыва почвы, транспорта материала размыва/смыва (а в оврагах – также и поступившего с их бортов) и его аккумуляции.

Речные подсистемы только у ручьев и самих малых рек оказываются соизмеримы с эрозионно-склоновыми и овражно-балочными. Постоянные водотоки низких по-

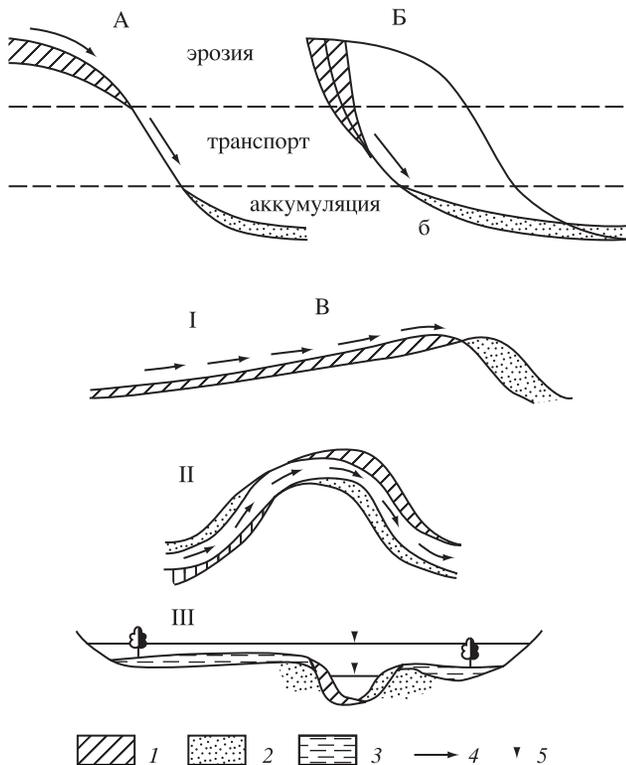


Рис. 2. Соотношение зон эрозии, транспорта и аккумуляции наносов: А – на склонах, Б – в оврагах, В – в реках (I – при смещении грядовых форм руслового рельефа, II – при развитии излучины, III – при формировании поймы)

Зоны: 1 – размыва, 2 – аккумуляции наносов; 3 – аккумуляция наносов на пойме; 4 – перемещение потоком наносов; 5 – уровни воды в реке

рядков (первого–второго) находятся в прямом контакте со своими водосборами, принимая значительную (а во многих случаях – основную) часть смываемого с их площади материала. По мере увеличения порядка реки эта связь становится все более опосредованной. Большие и крупнейшие реки осуществляют перенос вещества на расстояния, соизмеримые с шириной поперечника или половины поперечника материков. При этом за счет размыва дна и берегов реки практически полностью формируется сток влекомых наносов (некоторая его часть может формироваться из овражных выносов, а также, особенно в горах, обвальными процессами) и определенная часть стока взвешенных наносов – благодаря размыву пойменных берегов, в строении которых принимает участие пойменная супесчано-суглинисто-глинистая фация аллювия, и подмыву коренных берегов, сложенных выветрелыми или пластичными породами.

Обратная связь речной подсистемы с эрозионно-склоновой и овражно-балочной менее значима, чем прямая. Она сказывается либо на протяжении очень длительных отрезков времени (вплоть до геологических) вследствие медленного направленного врезания рек, либо благодаря подмыву берегов, активизирующему линейные размывы на них (овражную эрозию) и способствующему увеличению уклонов склонов.

Другим отличием в функционировании речной подсистемы от предыдущих является отсутствие продольной дифференциации зон эрозии, транспорта и аккумуляции наносов (рис. 2), образование и эволюция аккумулятивных форм руслового рельефа, развитие на их основе, благодаря закреплению растительностью прирусловых отмелей, форм русла, многократное переотложение перемещаемого твердого материала, формирование поймы и аллювиальных отложений. При этом в пределах одной формы руслового рельефа, формы русла и поперечника дна долины (пойма+русло) наблюдаются все три составляющие процесса, да и само смещение и развитие их происходит вследствие одновременного проявления эрозии, транспорта и аккумуляции наносов в их пределах.

Лишь при рассмотрении реки в целом на уровне ее продольного профиля можно условно выделять зоны преимущественного (но не абсолютного) преобладания процессов врезания реки (верховья, если здесь не происходит заиления русла), перемещения наносов (хотя оно сопровождается развитием аккумулятивных форм руслового рельефа и поймы при очень медленных направленных вертикальных деформациях

того или иного знака) и аккумуляции наносов. Систематическое накопление наносов в нижнем течении рек представляет собой регрессивную аккумуляцию как следствие их устьевого удлинения, колебания уровня моря (базиса эрозии) или тектонических прогибов земной коры. Она проявляется на протяжении вековых и геологических отрезков времени, но на ее фоне происходят периодические русловые деформации, обуславливаемые размывами и намывами берегов и дна рек в многолетнем, сезонном и текущем временных масштабах [8]. В этом отношении устьевая подсистема, как правило, образует область направленной аккумуляции наносов, которая, в обратной связи, влияет на направленность вертикальных деформаций в нижнем течении реки. Исключения из этого представляют участки рек со скальным руслом, которые наносы проходят транзитом из-за стеснения русла и, как следствие, очень больших скоростей течения (зачастую вне зависимости от уклона реки), горные реки с порожиисто-водопадным руслом и некоторые участки равнинных рек с врезанным руслом при пересечении горных массивов или возвышенностей.

Функционирование эрозионно-русловых систем (ЭРС) связано с действием общих законов эрозионно-аккумулятивных процессов. Единство и неразрывность эрозии, транспорта и аккумуляции наносов как составных частей эрозионно-аккумулятивных процессов на склонах, в оврагах и в реках, взаимосвязь и взаимообусловленность этих процессов в различных звеньях (подсистемах) ЭРС – два наиболее общих закона, составляющие методологическую основу теории эрозионно-русловых систем, установленных Н.И. Маккавеевым [1]. Сущность эрозионно-аккумулятивных процессов в разных звеньях сети водных потоков и, соответственно, во всех подсистемах ЭРС отражают еще пять универсальных законов также установленных Н.И. Маккавеевым, проявляющихся как в системах самого большого ранга (бассейнах крупнейших рек), так и в элементарных водосборах, соответствующих ЭРС самого низкого ранга: нелинейности связей, факторной относительности, взаимной обусловленности потока и подстилающей поверхности (русла), ограниченности морфологических комплексов и автоматического выравнивания транспортирующей способности потоков, определяющего саморегулирование эрозионно-аккумулятивных процессов (полный их анализ был дан нами в специальных работах [3, 9]). Кроме того, можно говорить о законе временной и пространственной дискретности и континуальности эрозионно-аккумулятивных процессов, в наиболее полном виде рассмотренных для речных русел [3, 10, 11]. Он проявляется в специфике развития процессов на разных структурных уровнях, на разных участках склона, оврага или балки, на морфологических однородных участках реки, в ее верхнем, среднем и нижнем течении, в устьевой области и по-разному во времени в зависимости от сезона, фаз режима, вероятности пересыхания или отсутствия стока, с одной стороны, в непрерывности потоков и поля отметок склона, днаща оврага или дна русла, во временной непрерывности и возобновлении заданной направленности развития после периода прекращения стока, частичного обсыхания или резкого снижения активности процесса, с другой. Структурная организация (дискретность) русловых процессов показана на рис. 3. Применительно к склоновым эрозионно-аккумулятивным процессам и овражной эрозии она проявляется в ручейковой сетке, образовании промоин, их превращении в овраги, различиях в формировании русла оврага на разных его участках и на конусе выноса и т.д. Однако схемы дискретности-континуальности для них требуют еще специальной проработки и здесь не приводятся.

### **Руслоформирующая деятельность временных (склоновых, овражно-балочных) и постоянных потоков**

Общим для всех типов потоков в их взаимодействии с подстилающей поверхностью и формах проявления эрозионно-аккумулятивных процессов является образование русел от первичных, эфемерных элементарных линейных углублений на склонах (ручейки дождевой или талой воды), оврагов на разных стадиях развития с

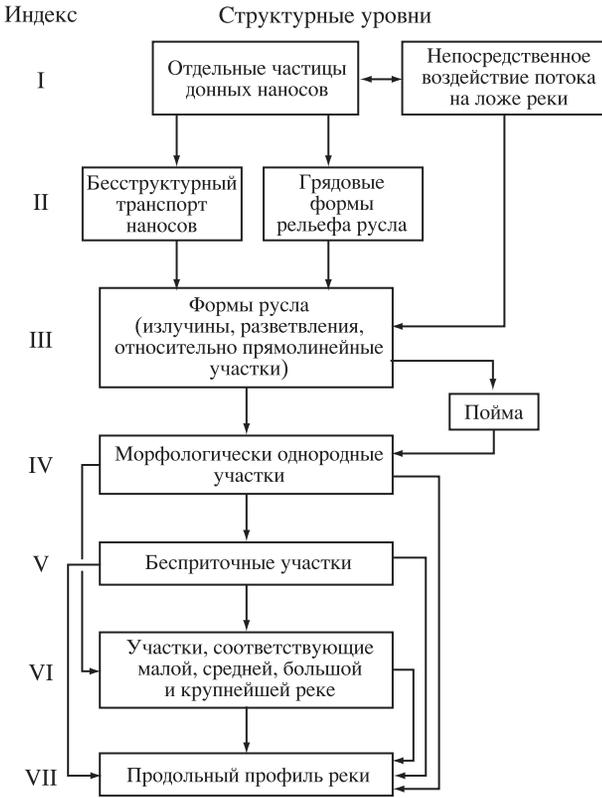


Рис. 3. Схема дискретности русловых процессов на реках и взаимодействие между структурными уровнями их проявления [3, с упрощениями]

же  $P\%$  за период весеннего половодья, т/га;  $b$  – коэффициент, учитывающий влияние агротехнического фона за предшествующий год на смыв почвы;  $k$  – коэффициент, учитывающий крутизну склона). В модели, разработанной в США [14], эрозия на склонах делится на межручейковый смыв и ручейковый размыв, причем вклад межручейкового смыва в масштабах склона принимается незначительным; поэтому основу модели составляет учет ручейкового смыва. Ручейковый размыв (ручейковая эродированность почвы) входит в гидрофизическую модель эрозии, разрабатываемую под руководством Г.А. Ларионова [15]; им же механизм ручейковой эрозии как основа эрозии почв изучается в гидравлических лотках.

Однако рисунок сети русел ручейков непостоянен в текущем масштабе времени, в том числе из-за размывов бортиков между ними. На сельскохозяйственных землях возникающие русловые бороздки заравниваются при обработке почвы (вместе с тем они создаются искусственно при распашке) или быстро заполняются наносами. На склонах с естественной растительностью ручейковая сеть постоянно изменяется под влияниями заторов в руслах ручейков, деятельности землероев, динамики растительности, а главное, вследствие горизонтальных деформаций самих русел, т.е. благодаря русловым процессам в них. Кроме того, при увлечении стока возможно образование потоков, затопляющих и без того узкие пространства между руслами ручейков, их промывы, а саму поверхность склона, покрытого текущей водой, можно рассматривать как аналог поймы реки во время половодья. Если учесть, что в абсолютном выражении ширина поймы достигает нескольких десятков километров на крупнейших реках (на нижней Оби превышает 50 км, будучи расчлененной многочисленными пойменными

руслами, занимающими все их днище или его большую часть, если образовались характерные формы русла (как правило, это – врезанные излучины, реже – разветвления, прорванные излучины) [12], русел в оврагах, имеющих постоянный водоток (если они врезались до водоупорного пласта горных пород) и, наконец, русел самых малых–малых–средних–больших и, в конечном счете, крупнейших рек. То обстоятельство, что склоновые потоки любого генезиса, по существу, представляют собой сеть ручейков (микро-, ультрамикро-ручейков), учтено во многих моделях для расчета смыва почв и склонов. Так, в модели ГГИ [13] для определения объемов смыва  $M = h_{p\%}^n \cdot abk$ , где параметры  $a$ ,  $n$  зависят от типа ручейковой сети на склоне, агротехнического фона и типа почвы (другие обозначения:  $h_{p\%}$  – слой стока за период весеннего половодья заданной вероятности превышения  $P\%$ ;  $M$  – модуль стока наносов той

протоками, то же можно сказать о Волго-Ахтубинской пойме шириной около 40 км), а на малых реках отношение ширины поймы к ширине меженного русла составляет более 300, аналогия дна долины реки во время половодья (паводочного периода на реках Дальнего Востока) и склоновых нерусловых потоков (ручейки+пространства между ними) становится вполне очевидной. Еще большее сходство обнаруживается при сравнении ручейковой сети на склоне со сложно разветвленным руслом крупнейшей реки, руслом реки, выходящей из гор в предгорья, представляющей собой сеть многочисленных проток среди аллювиального поля, меняющих свое положение после прохождения каждого паводка (рис. 4). Аналогичная картина наблюдается на зандровых полях ниже концов ледников, на подгорных наклонных равнинах, образованных слившимися конусами выноса рек, часто с селевым режимом. Переплетение русел ручейков из-за их постоянной миграции, разрушения бортиков, перераспределение стока при возникновении заторов и местных скоплений наносов обуславливает временный характер концентрации потока в одном из них, снижение вероятности их превращения в промоины и далее промоин в овраги.

Следствием эфемерности существования русел ручейков на склонах и площадного их влияния на смыв почв и грунтов является отнесение ручейковой эрозии к плоскостной (склоновой) эрозии. Однако каждый ручеек, создавая элементарное линейное эрозионное углубление русла, вытянутое вдоль склона, обуславливает концентрацию в нем потока, рост его скорости (по формуле Шези  $V = C\sqrt{hI}$ , где  $h$  – глубина потока,  $I$  – уклон,  $C$  – коэффициент, зависящий от шероховатости русла), активизацию размыва ( $W_{тр} = AQ^mI$ ,

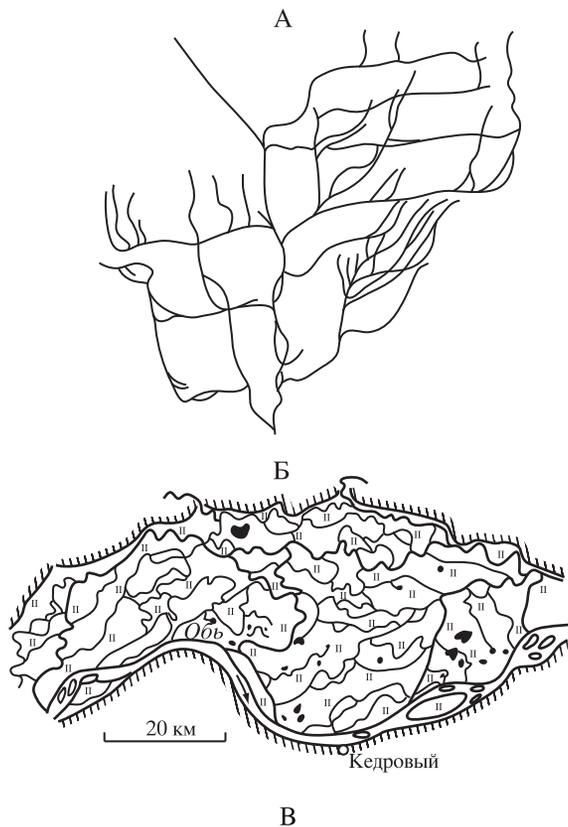


Рис. 4. Рисунок русловой сети: А – микроручейков на склоне при поперечной вспашке (по Л.Ф. Литвину [16]), Б – крупнейшей реки со сложноразветвленным руслом (р. Обь в нижнем течении) [3], В – реки при выходе из гор в предгорья (Исландия). Фото Haukar Snorrason



Рис. 5. Единая система русел в эрозионно-русловых системах

ручeyков на склонах до крупнейших рек. Н.И. Алексеевский и Р.Р. Муракаев [18, 19], также рассматривая временные и русловые потоки как единую сеть потоков на земной поверхности, разработали методику определения относительных размеров потоков в их соподчиненности в зависимости от максимального расхода воды и водосборной площади. Но если ручейковая сеть на склонах формирует временные эфемерные русловые образования, то уже русло оврага – это квазиустойчивая форма, развивающаяся по законам русловых процессов, но, в отличие от рек, всегда с абсолютным преобладанием вертикальных деформаций отрицательного знака (врезания).

### Саморегулирование эрозионно-аккумулятивных процессов в ЭРС

Трансформация эрозионного русла склонового ручейка в русло промоины, а затем оврага представляет собой отражение закона автоматического выравнивания транспортирующей способности потока, обуславливающего саморегулирование овражно-балочной подсистемы ЭРС и ее связь со склоново-эрозионной подсистемой. Этот закон проявляется в развитии всех эрозионно-аккумулятивных процессов, определяя их физическую сущность. Его основу составляет соотношение транспортирующей способности потока  $W_{тр}$  и фактического расхода наносов  $W$ . Если  $W_{тр} > W$  поток размывает подстилающую поверхность (ручейковая бороздина на склоне превращается в промоину, промоина в овраг, происходит его углубление; на реках преобладает врезание), сток наносов возрастает, что проявляется в балансе наносов на участке склона (оврага, русла реки):

где  $W_{тр}$  – транспортирующая способность потока,  $Q$  – расход воды,  $m > 1$ , обычно  $\sim 2$ ) и, как следствие, дальнейшее увеличение глубины ( $Q \approx hb_p V$ ), водности потока и стока наносов. Поэтому ручейковая глубинная эрозия на склонах представляет собой потенциальную возможность развития овражной эрозии, которую, в свою очередь, можно рассматривать как самовозбуждающийся процесс [1, 2].

Возникновение оврага (на первых стадиях – промоины) уже само по себе представляет собой формирование русла; но, как и в ручейковой сети на склонах, это – эрозионное русло, образующееся вследствие врезания временного потока в поверхность склона. По мере развития оврага оно сохраняется только в его верхней части, тогда как в средней и нижней трансформируется в аналогичное рекам врезанное русло с аккумулятивными формами; последние формируются наиболее активно, если овраг вскрывает водосносный горизонт, и в его русле появляется постоянный водоток.

Таким образом, линейные ручейковые углубления на склонах, промоины, русла оврагов, временных водотоков в балках, постоянных водотоков в оврагах и балках и русла рек во всем их многообразии (врезанные, адаптированные, широкопойменные, скальные, различных морфодинамических типов и т.д.) представляют собой единую русловую сеть (рис. 5). Такой подход развивал еще Н.А. Ржаницын [17], предложивший порядковую структуру водотоков от элементарных

$W_{i+1} = W_i + \Delta W$ , где  $W_i$  – объем стока наносов в  $i$ -м и  $(i-1)$ -м створах,  $\Delta W$  – результирующая баланса. Если  $W_{тр} < W$ , происходит аккумуляция избыточного количества наносов, и тогда  $W_{i+1} = W_i - \Delta W$ . Таким образом, увеличение или уменьшение  $W$  через механизм саморегулирования взаимодействия потока и русла приводит к понижению или повышению отметок дна русла и, соответственно, увеличивает или уменьшает глубину вреза, а через нее – поступление твердого материала из выше расположенных ЭРС более низких рангов, что, в свою очередь, приводит к активизации или затуханию вертикальных деформаций. К аналогичным последствиям приводят изменения водности рек при сохранении неизменным стока наносов. При  $W = \text{const}$  увеличение  $Q_{ср}$  сопровождается ростом  $W_{тр}$ , вследствие чего возникает условие  $W_{тр} > W$  и поток будет углублять свое русло (ручья, оврага, реки); при снижении  $Q_{ср}$  создается условие  $W_{тр} < W$  и происходит аккумуляция наносов, заиление, вплоть до деградации русла. Поэтому саморегулирование в ЭРС обеспечивается водностью потока (количеством талой или дождевой воды, поступающей на склон; изменением водности по длине потоков от склоновых до крупнейших рек и ее рассредоточением в дельтах и на конусах выноса; переносом большего или меньшего количества наносов из одной подсистемы в другую, из ЭРС низких рангов в ЭРС все более высоких рангов и т.д.).

Нарушение баланса наносов и изменение транспортирующей способности потока происходит также в пределах отдельных форм русла. На излучинах, которые возникают из-за неустойчивости прямолинейного движения потока, благодаря дифференциации скоростного поля и циркуляционных течений возникает дефицит наносов в одних частях русла и избыток по отношению к  $W_{тр}$  в других, что определяет чередование по длине русла и в поперечном сечении зон размыва и аккумуляции наносов и является условием дальнейшего развития излучин. Этот эффект усиливается общим ростом  $W_{тр}$  на излучине вследствие местного увеличения дифференциации скоростного поля, кинетической энергии и мощности потока, которая пропорциональна кубу скорости потока [1, 18]. В результате усиливаются размывы русла (дна и берегов) в зоне ускорения течения и аккумуляция наносов у выпуклого берега в зоне замедления течения. Однако местные увеличения мощности потока и кинетической энергии происходят до определенного предела, определяемого одновременным ростом затрат энергии потока на преодоление гидравлических сопротивлений. При равенстве  $\Delta E_{кин} = I_{\Gamma}$  ( $\Delta E_{кин}$  – прирост кинетической энергии,  $I_{\Gamma}$  – гидравлический уклон как сумма потерь энергии потока, отнесенная к единице длины русла) излучина спрямляется или трансформируется из сегментной в петлеобразную, т.е. происходит разделение единой излучины на три сегментных, из которых две формируются на крыльях исходной, а одна наследует ее привершинную часть (рис. 6). В этом случае восстанавливается условие  $\Delta E_{кин} > I_{\Gamma}$  и

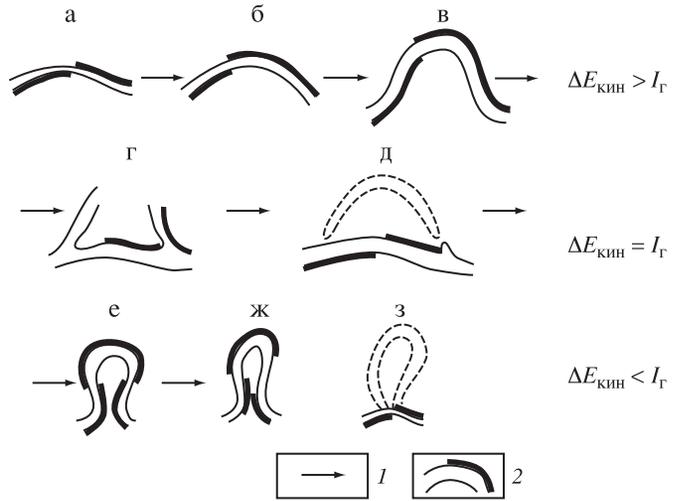


Рис. 6. Эволюция развития свободных излучин и соотношения  $\Delta E_{кин} \sim I_{\Gamma}$  на разных стадиях их развития  
Стадии развития: а, б, в – сегментные; г, д – прорванные; е, ж, з – петлеобразные.  
1 – пути эволюции, 2 – зоны размыва берегов

излучина продолжает развиваться, спрямляясь за счет размыва шейки при сближении вторичных излучин на крыльях.

Прямолинейное русло формируется при наличии дополнительных факторов, способствующих его закреплению [2, 3, 20, 21]. Наличие последнего необходимо, т.к. прямолинейное движение потока неустойчиво. Поэтому извилистая форма русла нехарактерна для ручейковой сети на склонах, потоки которых отличаются дефицитом наносов, особенно влекомых. Это не позволяет формироваться микропобочням, закрепляющим первоначальные изгибы потока, а возникающие быстро смещаются, способствуя разрушению бортиков ручейков, обеспечивая их миграцию на склоне и эфемерность существования самих русел.

В разветвленных руслах рассредоточение потока сопровождается снижением  $W_{тр}$ , вследствие чего в узлах разделения потока происходят местная аккумуляция наносов и образование крупных аккумуляционных форм руслового рельефа – перекаатов. Однако в каждом рукаве (протоке) возникает изгиб потока возле острова, происходят соответствующий рост его мощности и  $E_{кин}$  [22] и дальнейшее развитие разветвления, которое, подобно излучинам, проходит ряд стадий: углубления и повышения водности одних рукавов, обмеления других и т.д.

Другим фактором саморегулирования русел ручейков, ручьев, малых, средних и больших рек является зависимость параметров их форм и форм руслового рельефа (излучин, разветвлений, перекаатов, побочней, осередков) от характеристик стока воды и наносов. Например, параметры излучин зависят от расхода воды  $Q$  (руслоформирующего ими среднемаксимального), радиуса кривизны  $r = f(Q)$ , шага излучины  $L = f(Q)$  и т.д. [19, 20]. П.Н. Резников [23] установил связи удельной концентрации влекомых наносов  $s_{вл} = \frac{G}{Q}$  и удельной мощности  $P_{уд} = Q_{макс} I_d$  (здесь  $I_d$  – уклон дна долины), соответствующие областям существования русел того или иного типа или преимущественного развития (в % от длины участков русла) излучин того или иного типа. Наличие этих зависимостей (или связей) обуславливает трансформацию во времени формы русловых образований (увеличение/уменьшение их параметров) при увеличении или уменьшении водности потока или величины стока наносов, в т.ч. при антропогенном воздействии на реках (регулирование стока воды и перехват наносов водохранилищем, разработка русловых карьеров; рассредоточение стока на склонах и т.д.), вплоть до смены морфодинамического типа русла, т.е. происходит адаптация русла к изменяющимся условиям их формирования. Подобные изменения носят как направленный (если происходят вековые/тысячелетние повышения/понижения стока воды и наносов), так и периодический характер (при чередовании циклов повышенной или пониженной водности). Так, на Лене (выше устья р. Алдан) за 50 лет сопряженные разветвления в многоводный период, совпавший со стадией их переформирования, трансформировались за 15 лет в параллельно-рукавные, но затем, в последующее маловодье, восстановились сопряженные, но с развитием рукавов в противоположных частях русла.

## Заключение

Функционирование эрозионно-русловых систем осуществляется по общим законам эрозионно-аккумулятивных процессов и характеризуется формированием русел водотоков – элементарных эфемерных русел ручейковой сети на склонах, эрозионных русел промоин и оврагов в их верховьях и на ранних стадиях развития, русел временных и постоянных водотоков в оврагах и балках (последнее – при вскрытии водоносного горизонта), русел малых, средних, больших и крупнейших рек. Однако их руслоформирующая деятельность в каждом звене водных потоков и во всех подсистемах (эрозионно-склоновой, овражно-балочной, речной, устьевой) отличается своими специфическими особенностями, определяемыми водностью потоков, параметрами и

формами русел, их соотношениями между собой, стоком наносов и другими характеристиками, позволяющими выделять соответствующие типы русловых процессов и морфодинамических типов русла. Единые формы проявления эрозионно-аккумулятивных процессов в виде русел разных размеров во всех звеньях водных потоков и структурных элементов ЭРС представляют собой, таким образом, наиболее значимое отражение механизма взаимодействия потоков с подстилающими грунтами. Саморегулирование ЭРС поэтому, в первую очередь, определяется русловым характером этого взаимодействия (саморазвитием возникающих русловых форм) и зависимостью параметров русел от водности потоков и стока наносов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Маккавеев Н.И.* Русло реки и эрозия в ее бассейне. М.: Изд-во АН СССР, 1955. 347 с.
2. *Маккавеев Н.И., Чалов Р.С.* Русловые процессы. М.: Изд-во МГУ, 1986. 264 с.
3. *Чалов Р.С.* Русловедение: теория, география, практика. Т. 1. Русловые процессы: факторы, механизмы, формы проявления и условия формирования речных русел. М.: Изд-во ЛКИ, 2008. 608 с.
4. *Сидорчук А.Ю.* Н.И. Маккавеев и пути развития геоморфологии // *Геоморфология*. 2012. № 2. С. 86–97.
5. *Чалов Р.С., Голосов В.Н., Сидорчук А.Ю.* Учение Н.И. Маккавеева о едином эрозионно-аккумулятивном процессе и теория эрозионно-русловых систем // *Геоморфология*. 2008. № 3. С. 6–14.
6. Работа водных и воздушных потоков на земной поверхности // *География, общество, окружающая среда*. Т. VI. Динамика и взаимодействие атмосферы и гидросферы. М.: Городец, 2004. С. 413–511.
7. Школа эрозии почв на водосборах и русловых процессах // *Географические научные школы Московского университета*. М.: Городец, 2008. С. 229–281.
8. *Алексеевский Н.И., Чалов Р.С.* Движение наносов и русловые процессы. М.: Изд-во МГУ, 1997. 166 с.
9. *Чалов Р.С.* Законы флювиальной геоморфологии // *Пробл. теоретической геоморфологии*. М.: Наука, 1988. С. 111–121.
10. *Кондратьев Н.Е.* О дискретности русловых процессов // *Пробл. русловых процессов*. Л.: Гидрометеиздат, 1964. С. 3–18.
11. *Сидорчук А.Ю.* Структура рельефа речного русла. СПб.: Гидрометеиздат, 1992. 126 с.
12. *Тарбеева А.М.* Морфология и динамика русел водотоков овражно-балочной сети и малых рек лесной зоны Европейской территории России: Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. М.: МГУ, 2007. 25 с.
13. Сток наносов, его изучение и географическое распределение. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 240 с.
14. *Ларионов Г.А., Добровольская Н.Г., Краснов С.Ф. и др.* Теоретико-эмпирическое уравнение фактора рельефа для статистической модели водной (дождевой) эрозии // *Эрозия почв и русловые процессы*. М.: Изд-во МГУ, 1998. Вып. 11. С. 25–44.
15. *Ларионов Г.А.* Истирание почвенных агрегатов в склоновых потоках // *Эрозия почв и русловые процессы*. М.: Изд-во МГУ, 2008. Вып. 16. С. 74–83.
16. *Литвин Л.Ф.* География эрозии почв сельскохозяйственных земель России. М.: Академкнига, 2002. 255 с.
17. *Ржаницын Н.А.* Морфологические и гидрологические закономерности строения речной сети. Л.: Гидрометеиздат, 1960. 240 с.
18. *Алексеевский Н.И., Муракаев Р.Р.* Сопряжение элементов системы временных и постоянных водотоков пределах водосбора // *Вестн. МГУ. Сер. 5. География*. 2012. № 1. С. 45–51.
19. *Муракаев Р.Р.* Структура временных и постоянных водотоков в речных бассейнах Центра ЕТР, Западной Сибири и Западного Тянь-Шаня: Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. М.: МГУ, 2012. 24 с.
20. *Чалов Р.С.* Русловедение: теория, география, практика. Т. 3. Морфодинамика речных русел. М.: Крассанд, 2011. 960 с.
21. *Чалов Р.С.* Географические исследования русловых процессов. М.: Изд-во МГУ, 1979. 232 с.

22. *Алексеевский Н.И., Чалов С.П.* Гидрологические функции разветвленного русла. М.: Геогр. ф-т МГУ, 2009. 240 с.
23. *Резников П.Н.* Сток наносов и его проявления в морфодинамике речных русел: Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. М.: МГУ, 2007. 24 с.

Московский государственный университет  
Географический факультет

Поступила в редакцию  
02.10.2012

## **EROSION-CHANNEL SYSTEMS, THEIR STRUCTURE, SELF-REGULATION AND FUNCTIONING**

**R.S. CHALOV**

### **S u m m a r y**

Erosion-channel system (ECS) is defined as a complex of water streams, erosion-accumulation processes acting within basins of different order and resulting landforms. The author showed that all components of ECS have characteristic features in all their members. The functioning and self-regulation of the ECS depend on the processes in the rills, ravine thalwegs, small, middle and large rivers, i.e. formation and development of the ephemeral and perennial watercourse channels have joint base but their morphological effects turn out different. The dependences of channel parameters on their water content, runoff, sediment budget, and transport capacity were established. These dependences lie in the base of the self-regulation of whole ECS and their members.