

В. Н. Голосов, А. Ю. Сидорчук, Р. С. Чалов
Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова
Эрозионно-русловые системы: теория, методология, практика¹

V. N. Golosov, A. Yu. Sidorchuck, R. S. Chalov
Moscow State University

Erosion and channel systems: theory, methodology, practice

Воздействие водных потоков, временных и постоянных, склоновых и русловых (в оврагах, балках, реках) на поверхности суши, перемещение ими вещества и энергии по длине гидрографической сети, накопление наносов по пути их переноса и, как конечный результат, в устьях рек являющихся основным механизмом эрозионно-аккумулятивных процессов – эрозии почв, овражной (линейной) эрозии, русловых процессов, представляющих собой главный фактор денудации материков, формирование флювиального рельефа, накопления рыхлых отложений. С ними сопоставимы, но регионально ограничены эоловые процессы, которые доминируют в аридных регионах, и ледниковой экзарации в высокогорьях. Эрозионно-аккумулятивные процессы отражают взаимодействие двух сред – водных потоков и подстилающего их литогенного материала (почвы, грунта, отложений), из которых первая находится в движении, вторая – либо в квазистатичном состоянии, либо приходит в движение под влияние первой. При этом все водные потоки в пределах водосборных бассейнов, начиная от первичных склоновых, возникающих при таянии снега или при выпадении стокоформирующих дождей, и вплоть до устьев рек, представляют собой единую эрозионно-русловую систему. Соответственно единую систему образуют и все разновидности эрозионно-аккумулятивных процессов (рис. 1).

На тесную взаимосвязь всех видов эрозионно-аккумулятивных процессов в пределах речного бассейна впервые обратил внимание В.В. Докучаев [2], который связал проблему заиления малых рек Европейской части России, возникшую во второй половине XIX века с усилением водно-эрозионных процессов и развитием оврагов на пахотных землях в этот период. Основы представлений о эрозионно-русловых системах были заложены Н. И. Маккавеевым в монографии «Русло реки и эрозия в ее бассейне» [3], в которой впервые с единых методологических позиций была рассмотрена работа всех водных потоков на земной поверхности. В этой и последующих работах Н.И. Маккавеевым, а затем его учениками и последователями были обоснованы и сформулированы девять общих законов, составляющих сущность учения о едином эрозионно-аккумулятивном процессе и определяющих их развитие во всех звеньях сети водных потоков. Наиболее значимыми среди них являются законы автоматического регулирования транспортирующей способности потоков, дискретности (впервые сформулированного Н.Е. Кондратьевым [4]) и континуальности [5] развития на

¹ Выполнено по планам НИР (ГЗ) научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева и кафедры гидрологии суши МГУ имени М.В. Ломоносова

разных структурных уровнях и во времени проявления эрозионных и русловых процессов. Их универсальность обусловлена применимостью при изучении отрыва частиц грунта перемещения, переотложения и аккумуляции наносов в потоках различной глубины, начиная от склоновых и заканчивая крупными реками и их устьями.

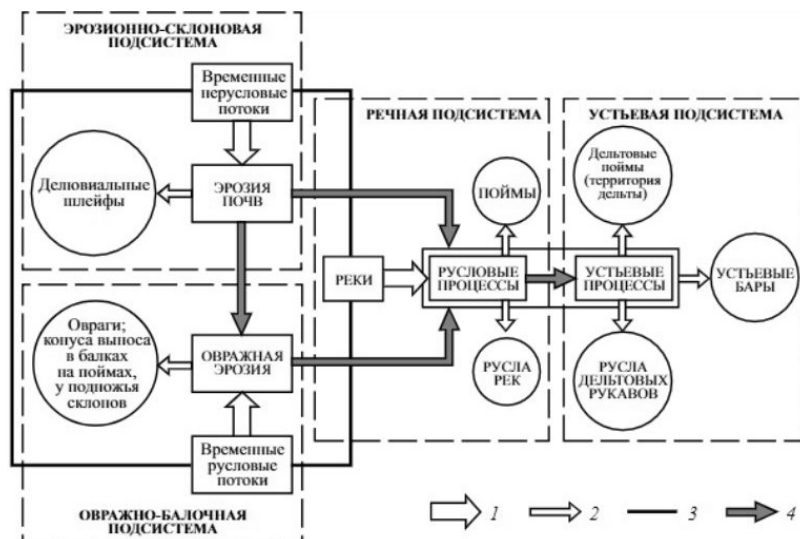


Рис.1. Структура эрозионно-русловой системы и эрозионно-аккумулятивных процессов: связь водных потоков (1), создаваемых ими форм рельефа (2), направленного перемещения воды (3) и наносов (4) [1],

Процессы эрозии, транспорта и аккумуляции наносов неразрывны во времени и пространстве, и только преобладание одного из них в конкретный момент времени вне зависимости от масштаба проявлений определяет его доминирование в пределах конкретного участка ЭРС. На основе оценки баланса наносов участки ЭРС могут быть отнесены к эрозионным или аккумулятивным. Отнесение ЭРС разного ранга выше данного створа к эрозионной или аккумулятивной может определяться также по величине коэффициента доставки – отношения объема эрозии выше данного створа к величине транспорта наносов в данном створе.

Отличительной особенностью временных потоков, формирующихся в различных звеньях флювиальной сети – от склонов междуречий до русел постоянных водотоков, является зависимость их эродирующей и транспортирующей способности от ландшафтно-климатических факторов, что существенно затрудняет количественные оценки объемов наносов, переносимых ими в единицу времени. Разработанные в лаборатории эрозии почв и русловых процессов им. Н.И Маккавеева на основе экспериментальных и

полевых исследований зависимости и модели позволяют учитывать взаимовлияние различных факторов и проводить расчёты темпов смыва почв и скоростей овражных размывов для условий различных агроландшафтных зон умеренного пояса, а также других регионов мира [1,7]. В исследованиях динамики изменений темпов эрозии и аккумуляции значительный прогресс был достигнут благодаря совместному использованию цезия-137 глобального и Чернобыльского происхождения для датировок отложений в зонах аккумуляции малых водосборов, технология применения которого продолжает совершенствоваться [8, 9].

Количественные оценки темпов смыва, размыва и аккумуляции, полученные с использованием набора традиционных и современных методов, позволяющих в сочетании с проведением крупномасштабного картографирования определить баланс наносов для малых водосборов в различные интервалы времени за период интенсивного землепользования и тем самым оценить долю материала, сносимого с пахотных склонов и доставляемого временными водотоками в русла постоянных водотоков [1].

Для рек равнин умеренного климатического пояса, протекающих в зоне интенсивного сельскохозяйственного освоения, склоновый смыв и овражная эрозия являются основными источниками поступления наносов бассейнового происхождения, главным образом взвешенных. В лесостепной зоне бассейновая составляющая стока наносов (следствие эрозии почв) достигает 80% от суммарного стока наносов. В конце XIX–XX веках это приводило к массовому заилению и деградации малых рек, обмеление охватывало даже средние и отчасти большие реки, причём для них в этом явлении важным фактором были выносы материала из активно развивающихся оврагов. Мощность слоя наносов, смытых со склонов за агрикультурный период и накопившихся в руслах рек закономерно убывает при увеличении порядка реки (её размеров, водности, мощности потока): на Дону в 10-25 км от истока она составила 6-12 см, в 25-50 км – 1-6 см, в 50-100 км – 0,9-1,6 см и в 100-200 км - <1 см; на Сура соответственно 2,15, 0,15, 0,08 и 0,07 см; на Ветлуге – 1,1, 0,07, 0,04 и 0,035 см (Дон и Сура – лесостепь, Вятка – лесная зона, но леса сведены, преобладает пашня, Ветлуга – лес). Таким образом, самые малые реки играют роль своеобразного буфера между водосбором и более крупными реками, т.к. только после их заиления процесс распространяется на реки более высоких порядков.

Заилению и деградации русел рек способствует поступление в них с продуктами смыва почв биогенных и химически растворённых веществ. Концентрация в речной воде фосфора – наиболее важного биогенного элемента (отношение его валовой массы к объёму стока воды) возрастает от 0,1-5,13 мг/л в лесной зоне до 127,0 мг/л в бассейне р. Кумы на юге ЕТР [10]. Биогенное загрязнение способствует развитию водной растительности и росту шероховатости русла, что, в свою очередь, приводит к снижению транспортирующей способности потока и аккумуляции наносов даже при их неизменном поступлении с площади водосбора.

Земледельческое освоение равнинных территорий и активизация в связи с этим склоново-эрозионных процессов сопровождалось резким сокращением грунтового питания рек вследствие увеличения поверхностного стока, что, в свою очередь, стимулировало усиление смыва почв. В лесостепной и степной зонах ЕТР период массовой распашки земель совпал по времени с увеличением повторяемости летних засух, что ещё в большей мере способствовало отмиранию и быстрому заилению ручьёв первых порядков. В лесной зоне вырубка лесов привела к понижению уровня грунтовых вод, что явилось дополнительным фактором деградации малых рек.

На рубеже XX-XIX веков сначала как следствие массового выполнения противоэрозионных мероприятий, а затем в связи с изменением системы землепользования в новых социально-экономических условиях, вывозом пашни из сельскохозяйственного оборота и её трансформации в другие уголья (залежь, пастбища, сенокосы) произошло снижение интенсивности (вплоть до полного затухания) эрозионных процессов. Эрозионный эффект происшедших изменений для территории России проявился в снижении ежегодного смыва со склонов в ЕТР на 40%, в Сибири – на 56% по отношению к 1990-м годам. При сокращении пахотных земель и рубки лесов, уменьшении поступления продуктов смыва в реки на фоне общего увлажнения территории наметилась тенденция естественного восстановления малых рек. Однако этот процесс гораздо в большей мере растянут во времени относительно начала повышения увлажнённости территории и снижения площади пахотных земель, т.к. этому препятствуют заполнившие русла толщи наносов, смытых со склонов междуречий.

Несмотря на имеющийся высокий потенциал вероятности достижения предельной густоты оврагов при хозяйственном освоении территорий конец XX–начало XXI века характеризуется заметным снижением нового оврагообразования и активности роста уже существующих оврагов по тем же причинам, что и снижение эрозии почв на склонах. Однако «центр тяжести» в этом процессе переместился на развитие техногенных оврагов на урбанизированных территориях, при строительстве коммуникаций, в регионах горнодобывающей промышленности, явившись достаточно мощным дополнительным фактором негативного воздействия на малые и отчасти средние реки на этих территориях.

Изучение трансформации эрозионно-русловых систем под воздействием антропогенных изменений и на фоне климатических флуктуаций имеет большое прикладное значение. Происходящее в настоящее время постепенное восстановление площадей пахотных земель в лесостепной и отчасти степной зон, а также значительные изменения в наборе высеваемых сельскохозяйственных культур, требует проведения количественных оценок смыва почвы на пашне, учитывающих данных изменения, а также потепление климата. Выполненные расчёты, дополненные полевыми оценками изменений темпов аккумуляции в днищах долин первых порядков, позволили выявить тренд сокращения потерь почвы за счёт смыва на большей части пахотных земель, за исключением юга степной зоны, где произошло увели-

чение темпов смыва, компенсируемое пока сокращением площади пашни по сравнению с началом 1990-х годов [11, 12].

Оценки путей латеральной миграции загрязняющих веществ и выявление участков их накопления загрязняющих веществ, выпадающих из атмосферы после локальных и глобальных техногенных аварий, вносимых в почву совместно с удобрениями, накапливаемых в хвостохранилищах в местах добычи полезных ископаемых и т.д., базируется на закономерностях проявления эрозионно-аккумулятивных процессов. В частности, установлены особенности перераспределения цезия-137 в речных бассейнах центра Европейской части России, в наибольшей мере загрязнённых после аварии на Чернобыльской АЭС [13].

Речное звено (подсистема) в эрозионно-русловых системах наиболее многообразно по проявлению эрозионно-аккумулятивных(русловых) процессов, определяясь огромным диапазоном водоносности рек, различиями водного режима рек, стоком наносов, кинетичностью потоков, геолого-геоморфологическими условиями формирования и устойчивостью русел, зависящей от крупности руслообразующих наносов, аллювиальных отложений и уклонов рек (рис. 2). Сложные сочетания этих факторов определяют, с одной стороны, формирование русел горных, полугорных и равнинных рек, врезанных и широкопойменных, с разными морфодинамическими типами – относительно прямолинейных, меандрирующих, разветвлённых на рукава, а с другой, направленность и темпы вертикальных русловых деформаций (врезание – глубинную эрозию или аккумуляцию наносов), приводящую к постоянным, хотя и очень медленным трансформациям продольных профилей рек. Естественные и антропогенно обусловленные изменения водности рек и стока наносов приводят к изменениям параметров форм русла, смене морфодинамического типа русла, темпов и направленности вертикальных русловых деформаций.



Рис. 2. Схема соотношения факторов русловых процессов на участке реки

В общем случае сток наносов W влияет на русловые процессы через соотношение между ним и транспортирующей способностью потока $W_{тр}$. При $W_{тр} = \text{const}$ увеличение стока наносов сопровождается их аккумуляцией ($W > W_{тр}$) и ростом объёма речных отложений, а уменьшение ($W < W_{тр}$) – размывом дна и берегов, сокращением объёма отложений. Это является причиной вертикальных (размыв/аккумуляция – понижение/повышение отметок дна) деформаций. Врезание реки приводит к углублению её долины и увеличению эрозионного расчленения бортов долин малых рек овражно-балочной сетью, усилением эрозии нерусловых потоков на склонах, что, в свою очередь, является причиной повышенного поступления наносов в русла рек из притоков, со склонов и в целом со всей площади речного водосбора. Чем больше река, тем опосредованнее связь между русловыми процессами и эрозионно-аккумулятивными процессами на склонах; вместе с тем сокращается доля бассейновой составляющей в стоке наносов и увеличивается сток наносов руслового происхождения, причём для руслообразующих наносов он становится абсолютно преобладающим.

Следствием транспорта наносов и их многократного переотложения в русле является его морфологическое строение. Транзитные наносы перемещаются только во взвеси и практически не участвуют в формировании самого русла, но оседают в местах устойчивой аккумуляции – в дельтах рек и на поймах. Руслообразующие наносы формируют в процессе перемещения грядовый рельеф дна, который при закреплении повышенных, обсыхающих в межень частей растительностью обуславливает формирование поймы (или пойменных островов) и, как следствие, образование излучин, разветвлений или относительно прямолинейного неразветвлённого русла и постоянные их деформации (переформирования). При высокой водности реки и большом стоке наносов, с одной стороны, и слабой устойчивости (неустойчивости) русла, с другой, возрастает при прочих равных условиях вероятность формирования и тем более сложно разветвленного русла.

Влияние эрозионных процессов на формирование стока наносов и русловой режим даже больших рек наглядно демонстрируют реки Северо-востока России с восточно-сибирским типом гидрографа. Половодье на них проходит в то время, когда почвы и грунты на водосборе и значительная часть русел рек сцементированы мерзлотой, смыкающейся с многолетне-мерзлыми отложениями. Склоновая эрозия при этом не развивается, а в руслах деятельность поток ограничивается узкой полосой постоянного талика. Сток наносов минимален, деформации русла сосредотачиваются стрежневой зоной, происходит размыв гребней перекатов. В летне-осенний паводочный период, когда наибольшей мощности достигает деятельный слой, смыв оттаявшего грунт максимален. Соответственно максимален сток наносов в реках – в это время проходит на реках, по местному выражению, «чёрная вода», перекаты мелеют; процессы аккумуляции существенно активизируются в дельтовых рукавах и на устьевых барах.

В горах сток наносов и морфодинамика русел часто определяется деятельностью селевых потоков.

Происходящие глобальные гидроклиматические изменения и антропогенные нарушения функционирования речных бассейнов, факторов русловых процессов и механические воздействия на сами реки приводят к морфологической трансформации русел, изменениям направленности и темпов вертикальных русловых деформаций, соотношениям W и $W_{тр}$. Естественное увеличение водности даже больших и крупнейших рек (Печора, Лена) привело к усложнению разветвлений, формированию прорванных излучин. Врезание русел Оби, Дона, Волги и других рек в нижних бьефах гидроузлов продолжается и через 60-70 лет после их создания [14], сопровождаясь изменениями не только параметров форм русел, но и их морфодинамического типа. Существенным техногенным фактором русловых процессов стали русловые карьеры, особенно при их массовой разработке [15].

Глобальные природные и природно-антропогенные изменения факторов русловых процессов ставят на «повестку дня» разработку долгосрочных и перспективных прогнозных оценок изменений в морфологии и динамике русел рек. Они возможны на основе палеорусловых реконструкций, опирающихся на зависимости параметров русел от водности рек и стока наносов. Имея их, можно экстраполировать изменения русловых процессов на отдаленную перспективу при наличии сценариев возможных изменений водности [1, 16].

Для степной зоны ЕТР, например, установлено, что около 18 тыс. лет назад наступил период повышенного стока воды, продолжавшийся 2-3 тыс. лет и проходивший в условиях разреженной перигляциальной растительности. Он был в 2-4 раза больше современного и сопровождался интенсивной эрозией (~ 500 т/км² в год) по всей длине эрозионно-русловых систем. Последовавшее затем сокращение стока привело к тому, что в начале голоцена его величина достигла современной. Это уменьшение стока сопровождалось аккумуляцией наносов по всей длине переуглубленной русловой и эрозионной сети со скоростью в среднем 31 т/км² в год.

За последние 300 лет (период интенсивного землепользования) в степной зоне ЕТР интенсивность смыва в среднем для всех речных бассейнов составляла около 300 т/км² в год. 95% этого материала аккумуляровалось в днищах балок и суходолов и образовало слой намывных почв со средней мощностью 0,9-1,0 м. Некоторое количество наносов отложилось также на поймах рек.

Режим эрозии, переноса и аккумуляции наносов в эрозионно-русловой системе степной зоны ЕТР существенно различался для периодов преобладания естественных процессов и интенсивного сельскохозяйственного освоения. В первом случае главными факторами были как изменения климата, так и состояния подстилающей поверхности. Эрозия и аккумуляция происходили во времени последовательно и захватывали все элементы эрозионно-русловых систем. Во втором случае главным фактором являлось состояние подстилающей поверхности, т.е. распашка склонов долин и водораздельных поверхностей. Эрозия и аккумуляция происходили практически одновременно и охватывали в основном склоны и верхние звенья эрозион-

но-руслowych систем; в остальных частях систем происходил в основном транзит наносов.

Изложенное представляет собой квинтэссенцию положений теории эрозионно-руслowych систем, в которой с единых методологических позиций рассматривается совокупность эрозионно-аккумулятивных процессов, продуцируемых всеми водными потоками на земной поверхности. Их изучение опирается, во-первых, на гидромеханическую природу механизмов взаимодействия потоков с подстилающими грунтами на склонах [17], в оврагах [18], балках и в руслах рек [5, 6]; во-вторых, на различиях, обусловленных неодинаковыми водностью, стоком наносов и морфометрическими характеристиками потоков, обуславливающих многообразие форм проявления процессов; в-третьих, на взаимосвязи процессов во всех звеньях водных потоков, образующих каскадную систему от элементарных водосборов на склонах до устьев крупнейших рек; в-четвёртых, на единстве физической сущности процессов, заключающемся в образовании и перемещении потоков наносов, их размыве, аккумуляции и неоднократном переотложении в ходе транспортировки [19]; в-пятых, на признании того, что, по Н.И. Маккавееву [3] эрозионно-аккумулятивные процессы развиваются в конкретной географической среде и их режим и форма проявления определяется ландшафтными (геолого-геоморфологическими, почвенными, геоботаническими) особенностями водосборов и их хозяйственной освоённостью [10,14, 20]. В этом заключается суть научной школы «эрозия почв на водосборах и русловые процессы», созданной Н.И. Маккавеевым и развиваемой его учениками и последователями.

1. Эрозионно-руслowe системы. – М.: ИНФРА-М, 2017. – 702 с.
2. *Докучаев В.В.* Овраги и их значение // Тр. Вольного экономич. об-ва. Т. 3, вып.2. – СПб., 1877. – С. 167-178.
3. *Маккавеев Н.И.* Русло реки и эрозия в ее бассейне. – М.: Изд-во АН СССР, 1955. — 346 с.
4. *Кондратьев Н.Е.* О дискретности русловых процессов // Проблемы русловых процессов. – Л.: Гидрометеиздат, 1959. – С. 6-20.
5. *Сидорчук А.Ю.* Структура рельефа речного русла. – С Пб.: Гидрометеиздат, 1992. — 126 с
6. *Чалов Р.С.* Русловедение: теория, география, практика. Т. 1. Русловые процессы: факторы, механизмы, формы проявления и условия формирования русел. – М.: ЛКИ/URSS, 2008. – 608 с
7. *Ларионов Г.А., Краснов С.Ф.* Гидрофизическая концепция эрозии почв // Почвоведение. 1997, № 5. – С. 616–624.
8. *Golosov V.N.* Special considerations for areas affected by Chernobyl fallout // F. Zapata (ed.) Handbook for the Assessment of Soil Erosion and Sedimentation Using Environmental Radionuclides. – Kluwer Academic Publishers Dordrecht, 2002. – P. 165–183.
9. *Golosov V.N., Walling D.E., Konoplev A.V., Ivanov M.M., Sharifullin A.G.* Application of bomb- and Chernobyl-derived radiocaesium for reconstruct-

- ing changes in erosion rates and sediment fluxes from croplands in areas of European Russia with different levels of Chernobyl fallout // *J. Environ. Radioact.*, 2018, No 186. – P. 78–89.
10. *Литвин Л.Ф.* География эрозии почв сельскохозяйственных земель России. – М.: Академкнига, 2002. – 255 с.
 11. *Литвин Л.Ф., Кирюхина З.П., Краснов С.Ф., Добровольская Н.Г.* География динамики земледельческой эрозии почв на Европейской территории России // *Почвоведение*. 2017, № 11. – С. 1390–1400.
 12. Пространственно-временные закономерности развития современных процессов природно-антропогенной эрозии на Русской равнине. – Казань: Изд-во АН РТ. 2019. – 372 с.
 13. *Иванов М.М., Иванова Н.Н., Голосов В.Н., Шамигурина Е.Н.* Оценка накопления сорбированного изотопа ¹³⁷Cs в верхних звеньях флювиальной сети в зоне чернобыльского загрязнения // География и природные ресурсы. 2016, № 4. – С. 156–163.
 14. *Беркович К.М.* Географический анализ антропогенных изменений русловых процессов. – М.: ГЕОС, 2001. 164 с.
 15. *Беркович К.М.* Русловые процессы и русловые карьеры. – М.: Географ. ф-т МГУ, 2005. – 109 с.
 16. *Сидорчук А.Ю., Панин А.В., Чернов А.В., Борисова О.К., Ковалюх Н.Н.* Сток воды и морфология русел на Русской равнине в поздневалдайское время и в голоцене (по данным палеоруслового анализа) // Эрозия почв и русловые процессы. Вып. 12. – М.: Изд-во МГУ, 2000. – С. 196-230.
 17. *Ларионов Г.А.* Эрозия и дефляция почв: основные закономерности и количественные оценки. – М.: Изд-во МГУ, 1993. – 200 с.
 18. *Зорина Е.Ф.* Овражная эрозия: закономерности и потенциал развития. – М.: ГЕОС, 1981. – 170 с.
 19. *Голосов В.Н.* Эрозионно-аккумулятивные процессы в речных бассейнах освоенных равнин. – М.: ГЕОС. 2006. – 296 с.
 20. *Чалов Р.С.* Географические исследования русловых процессов. – М.: Изд-во МГУ. 1979. – 232 с.