

13. Ларионов Г.А., Краснов С.Ф. Вероятностная модель размыва почв и связных грунтов // Почвоведение. 2000. № 2. С. 235–242.
14. Мирцхулава Ц.Е. Инженерные методы расчета и прогноза водной эрозии. М.: Колос, 1970. 239 с.
15. Кузнецов М.С., Глазунов Г.П. Эрозия почв. М.: Изд-во МГУ, 1985. 215 с.
16. Nearing M.A. A probabilistic model of soil detachment by shallow turbulent flow. Trans. ASAE. 1991. V. 34. P. 81–85.

Московский государственный университет
Географический факультет

Поступила в редакцию
09.04.2007

RECENT DEVELOPMENT OF MAKKAVEYEV'S IDEAS OF SLOPE EROSION MECHANISMS

S.F. KRASNOV, G.A. LARIONOV, L.F. LITVIN

S u m m a r y

The ideas concerned with soil erosion were chosen from the extensive scientific heritage of N.I. Makkaveyev. His views on the role of kinetic energy in soil erosion were proved experimentally. The raindrops impact increases the erosive action by the order of magnitude. The other of his ideas (erosion and sediment transport are proportional to the flow power; suspended load influence sufficiently on soil loss) served as a cornerstone for physically based soil erosion model. The simple computations showed that soil erosion rate is proportional to the third power of flow velocity. The influence of sediment concentration was studied experimentally. The equations, which describe this influence, were developed.

УДК 551.435.162

© 2008 г. Е.Ф. ЗОРИНА, И.И. НИКОЛЬСКАЯ

ОВРАГИ – ОДНО ИЗ ЗВЕНЬЕВ ЕДИНОЙ ЭРОЗИОННОЙ СЕТИ¹

Основным объектом исследований Николая Ивановича Маккавеева была гидрографическая сеть. Его основополагающий труд “Русло реки и эрозия в ее бассейне” [1] – пример всестороннего анализа развития артерий стока от их зарождения в виде первичных борозд на склоне водосбора до формирования крупных рек. Единый эрозионно-аккумулятивный процесс объединяет сеть водотоков с разными закономерностями строения, своеобразными русловыми формами, а также характерными гидрологическими и гидравлическими параметрами. Этот подход к изучению флювиальных процессов позволил установить не только различия в закономерностях развития широкого комплекса форм линейной эрозии, но и создать учение об эрозионно-аккумулятивном процессе, объединяющим все виды потоков на водосборе. Разработанная схема анализа позволяет получить конкретные количественные характеристики для описания проявления линейной и, в частности, овражной эрозии в разных регионах и выявить общие принципиальные закономерности, составляющие суть закона “саморазвития” эрозионных форм.

Всю сложнейшую сеть потоков Н.И. Маккавеев разделяет на три основные звена: склоновые нерусловые потоки – верхнее, временные русловые (овражно-балочная сеть) – среднее и реки – нижнее звено. Условиями образования русловых потоков являются: 1) площадь водосбора, обеспечивающая глубину и скорость, при которых поток может вынести материал, поступающий с водосбора; 2) уклон местности, превышающий гидравлический уклон в среднем и нижнем течении потока.

¹ Выполнено при поддержке РФФИ (проект 06-05-64637) и гранту Президента РФ для поддержки ведущих научных школ (проект НШ-790.2008.5).

Каждое звено эрозионной сети – источник наносов для последующего характеризуется присущими только ему закономерностями развития, механизмом функционирования и пространственно-временными соотношениями эрозии, транспорта и аккумуляции наносов.

В своей монографии Н.И. Маккавеев, анализируя эрозионный процесс в речном бассейне, уделяет большое внимание моменту концентрации “распластанного” склонового стока в единое русло. Именно в этот период происходит увеличение глубины и скорости потока, снижение влияния выступов шероховатости, что в совокупности приводит к повышению энергии потока, его размывающей и транспортирующей способности. Вся совокупность потоков на водосборе, начиная от мелкоручейкового стока до овражно-балочной сети, обязательна для большинства речных систем.

Концентрацию стока в едином русле Н.И. Маккавеев считает основным стимулирующим фактором активного оврагообразовательного процесса. Занимая промежуточное положение как во времени, так и в пространстве, овраги большую часть своей “жизни” выполняют роль зоны транзита материала, размытого на водосборе и переносимого потоками талых и ливневых вод в более крупные звенья эрозионной сети. Овраг – связующее звено между поверхностью бассейнов и долинами рек и балок, непосредственно влияющее, как на эрозионные процессы на площади водосбора, так и на эрозионные и русловые процессы на реках и в днищах балок. Овраги образуются на крутых склонах долин рек, балок, суходолов потоками дождевых и талых вод. Овраг отличается от других линейных эрозионных образований тремя основными особенностями: 1) характерными размерами; 2) формой поперечного и продольного профиля; 3) динамическим состоянием.

В районах активного развития овражной эрозии (земледельческая полоса России) овраги обычно приурочены к нижним частям склонов на расстоянии 300–800 м от водораздела при уклонах 0.25–0.4. Это определяет перистое строение овражной сети, что отличает ее от древовидной, характерной как для мелкоручейкового стока на водосборе, так и для подавляющего большинства рек равнинных областей России.

Исключительно продуктивно для анализа возможности развития оврага на склоновом водосборе высказывание Н.И. Маккавеева [1] об условиях врезания русла, которое выражается соотношением $\alpha_1 > \alpha_2$, где α_1 – угол, составленный поверхностью склона с горизонтальной поверхностью; α_2 – угол, образованный горизонтальной плоскостью и касательной к кривой продольного профиля в устьевой части эрозионной формы. В связи с этим положением возможность появления и развития оврага на склоновом водосборе может быть установлена по соотношению уклона склона, на котором развивается овраг ($I_{\text{скл}}$) и критического ($I_{\text{кр}}$), создающего в конкретных природных условиях возможность развития овражной формы ($I_{\text{скл}} > I_{\text{кр}}$). Расчет критического уклона выполняется в соответствии с зависимостью

$$I_{\text{кр}} = I_0 + I_{\text{доп}}, \quad (1)$$

где I_0 – уклон склона, при котором создаются условия размыва слагающих его грунтов; $I_{\text{доп}}$ – дополнительный уклон, создающий условия образования овражной формы ($I_{\text{доп}} \approx 0.03–0.05$).

Условие образования и развития оврага – возможность беспрепятственного выноса за пределы эрозионного вреза размытого и поступающего с бортов грунта. Н.И. Маккавеев [1, с. 45] указывал на это, как на первое условие, способствующее образованию линейной эрозионной формы, развивающейся за счет регрессивного врезания верховий. “Поток должен, хотя бы периодически, иметь такие скорости течения, при которых не только будет вынесен по тальвегу материал, приносимый в русло склоновыми потоками..., но также углубиться...”. Это может осуществляться в том случае, когда по длине оврага увеличивается транспортирующая способность сконцентрированного в русле водного потока. Этому способствует увеличение расходов за счет нарастания по длине оврага площади водосборного бассейна и выпуклая форма склона, когда от

верховий к подошве увеличивается уклон. На прямых и вогнутых склонах формирования оврагов наблюдается значительно реже.

Большое значение в процессе линейной эрозии имеет тип устьевых створа склонового водосбора, куда из развивающейся формы выносятся грунт. При условии его беспрепятственного отвода не происходит явлений подпора, снижения скорости потока и, как следствие, регрессивной аккумуляции. В том случае, если устье оврага привязано к постоянному водотоку более крупного звена эрозионной сети, конус выноса оврага размывается в периоды, когда временный поток в самом овраге отсутствует. В маловодные годы развитие оврага замедленно, и речной поток, подмывая конус выноса и устье оврага, способствует образованию эрозионной ступени в устьевом створе и тем самым активизирует процесс регрессивной эрозии. Если склон опирается на днище балки или пойму реки, грунт поступает на субгоризонтальную поверхность этих форм, образуя конус выноса, с которого потоками ливневых вод или в период половодья он транспортируется вниз по балке или дальше за пределы поймы. Особые случаи представляет поступление более крупного, по сравнению с речным, материала из развивающихся оврагов в реки и образование в приустьевой зоне кос и своеобразных перекатов – “высыпок” [2].

В развитие мыслей Н.И. Маккавеева о происхождении линейных эрозионных форм, разделение оврагов на естественные и антропогенные рассматривается как их основной классификационный признак. Естественные овраги относятся к линейным эрозионным формам, происхождение которых, вне зависимости от периода возникновения, не связано с хозяйственной деятельностью на водосборе. Антропогенные овраги образуются при вмешательстве человека в формирование стока воды и наносов в пределах склонового водосбора. В обоих случаях наблюдаются два разных импульса к возникновению оврагов: в первом случае – это исключительные (экстремальные) сочетания природных факторов, во втором – результат вмешательства человека в природные процессы. В дальнейшем овраги обоих типов растут в соответствии с законами развития естественных эрозионных форм (процесс регрессивной и поступательной эрозии, обрушение бортов, активизация роста в начальный период развития и последующее его замедление, формирование продольного профиля).

Н.И. Маккавеев рассматривал овраги, как естественные формы, на интенсивность появления и развития которых влияет антропогенный фактор. Своеобразие в развитии оврагов в разных регионах в первую очередь определяется комплексом природных особенностей, присущих данному региону. Основными из природных факторов оврагообразования являются гидролого-климатические (осадки, температурный режим) и геолого-геоморфологические (глубина базиса эрозии рек и балок, площадь водосбора, уклоны, длина и экспозиция склона, размываемость пород). Гидролого-климатические и геоморфологические факторы опосредственно, через особенности формирования стока на водосборе, влияют на скорость, расход, размывающую и транспортирующую способность потоков талых и дождевых вод. Геологические факторы при значительной вариабельности их количественных параметров определяют степень подверженности грунтов размывающему действию склоновых потоков на водосборе. Как правило, от геолого-геоморфологических факторов зависят региональные различия в заовраженности территорий. Вместе с тем анализ распространения овражной эрозии на крупных территориях выявляет весьма значительное антропогенное воздействие на линейную эрозию. Следствие антропогенного воздействия в разных условиях хозяйственного освоения – изменение количественных характеристик всего или части комплекса природных факторов образования оврагов, состав которых остается практически постоянным.

Образование оврага, как и любой линейной эрозионной формы, происходит при наличии потока со скоростями, превышающими размывающие для грунтов, слагающих конкретный склон. Площадь овражного водосбора определяет объем стока воды, а также расходы воды и наносов. От конфигурации водосбора зависит интенсивность нарастания расходов воды по длине склона и взвесенесущая способность потока. По-

токи формируются на склоновых водосборах, плановые морфометрические характеристики которых отличаются от таковых для бассейнов рек. Н.И. Маккавеев в своих работах [1, 3] предлагает единый вид зависимости между длиной эрозионной формы и площадью ее водосбора, которую в общем виде можно представить как:

$$L = B\sqrt{F}, \quad (2)$$

где L – длина эрозионной формы, км; F – площадь водосбора, км²; B – коэффициент, во многом характеризующий степень вытянутости водосбора. Он равен отношению длины водосбора к его средней ширине. Н.И. Маккавеев отмечает, что для оврагов и горных рек коэффициент B значительно меньше, чем для крупных равнинных рек. Если использовать эту зависимость для характеристики водосбора овражной формы, необходимо учесть, что сам овраг на склоне существенно короче длины водосбора. Вершина оврага в очень редких случаях доходит до линии водораздела в отличие от рек, исток которых, как правило, располагается близко к этой линии. Если в приведенной зависимости длину оврага ($l_{\text{ов}}$) представить как 0.7–0.8 длины водосбора, то коэффициент B будет близок к значениям этого параметра для речного водосбора. Для равнинных рек СССР, Китая, США, по Н.И. Маккавееву, в зависимости (2) $L = 2.9F^{0.5}$, а для оврагов и горных рек – $l_{\text{ов}} = 2.37F^{0.5}$. Представив $l_{\text{ов}}$ равной $0.8L$, получим $0.8L = 2.37F^{0.5}$, откуда длина склонового водосбора (L), на котором развивается овраг, выражается зависимостью:

$$L = \frac{2.37}{0.8}F^{0.5} = 2.96F^{0.5}. \quad (3)$$

Таким образом, можно считать, что соотношения между средней шириной и длиной водосборов линейных форм разного порядка близки между собой.

От конфигурации водосбора во многом зависит и продольный профиль эрозионной формы. Форма продольного профиля подавляющего большинства речных систем по Н.И. Маккавееву близка к форме так называемого “выработанного”, для которого им предложено выражение, определяющее изменение уклона по длине реки:

$$I = \frac{A}{Q^a}, \quad (4)$$

где Q – расход воды на участке с уклоном I , A – эмпирический коэффициент, a – коэффициент, равный 1.3. Экспериментальные исследования формирования оврагов [4] выявили ту же, что и на реках, закономерность изменения уклона по длине продольного профиля оврага на завершающей стадии его развития. В отличие от рек, для оврагов величина коэффициента a , по результатам опытов в условиях разной морфометрии склона, оказывается равной 1. Получение кривой продольного профиля для оврагов с близким к речному характером изменения уклонов по длине является важным моментом для понимания ряда закономерностей строения эрозионной сети, структуры и порядков постоянных и временных водотоков и всего разнообразия форм проявления процесса линейной эрозии.

Для изучения закономерностей формирования оврага Н.И. Маккавеевым была предложена идея так называемого “свободного моделирования”, когда моделируется не конкретный овраг, а типичная овражная форма. В проведенных экспериментальных исследованиях [5] рассматривалось образование оврага на склоновом водосборе в широком диапазоне гидрологических и геоморфологических параметров (осадки, глубина базиса эрозии, форма и уклоны склона, площадь и конфигурация водосбора). При этом проводилось комплексное изучение динамики роста оврага и взаимосвязь параметров оврага в процессе его развития.

На основании результатов лабораторных экспериментов и натурных исследований в природном комплексе “склоновый водосбор – овраг” выявлены закономерности развития и основные связи, взаимодействие которых составляет сущность оврагооб-

разовательного процесса. Развитие оврага в целом определяется наличием восходящей и нисходящей ветвей интенсивности изменения скоростей роста во времени. Восходящая ветвь соответствует периоду, когда саморазвитие оврага до определенного момента интенсифицирует рост овражной формы. Это – период формирования линейного вреза и образования русла, концентрирующего сток с водосборной площади, в связи с чем повышается скорость и, как следствие, размывающая и транспортирующая способность потока [1]. В начальный период постепенно увеличивается дренируемая линейным врезом водосборная площадь, а, следовательно, увеличиваются расходы воды, поступающей в развивающуюся линейную форму. К этому времени относится и постепенное формирование единого русла с меньшей ступенчатостью и постепенно уменьшающейся шероховатостью. Замедление роста оврага по всем параметрам по мере продвижения вершины вверх по склону связано с преобразованиями на склоновом водосборе вследствие развития самой овражной формы, видоизменяющей породивший его водосбор. По мере продвижения на плакорную часть водосбора вершины оврага, поток из состояния активной, размывающей силы, какой он был на крутой части склона, преобразуется в транспортирующую артерию со скоростями, близкими к неразмывающей, способную переносить наносы с вышележащего водосборного пространства, не производя при этом размыва днища оврага. Для оврага характерна неравномерность роста всех его морфометрических параметров – нарастание скоростей роста одного влечет снижение скорости роста другого. Это объясняется чередованием активности эрозионного и склонового процессов. Усиление глубинной и боковой эрозии происходит асинхронно, что в наибольшей степени сказывается на соотношении роста длины и объема оврага. В начальный период овраг резко растет в длину. Наиболее равномерен рост объема оврагов, аккумулирующего в себе особенности развития каждого из параметров.

Высказанные Н.И. Маккавеевым положения о том, что овраг представляет собой равноправное звено эрозионной сети, послужило отправной точкой для изучения особенностей развития овражно-балочных систем в общем контексте исследований эрозионно-аккумулятивных процессов на водосборах. На первой стадии развития линейная эрозионная форма на крутом участке склона долины реки или балки практически не влияет на процессы эрозии почв на водосборе и накопление материала в нижних звеньях эрозионной сети. Последующие стадии, начиная с выхода оврага на водосборную площадь, связаны, как с влиянием растущего оврага на условия эрозии почв и формирования стока наносов в русловой сети, так и с воздействием на развитие оврага эрозионных процессов на водосборе и в руслах долин и балок. Увеличиваясь в размерах и перемещая продукты ручейковой эрозии на водосборе в более низкие звенья эрозионной сети, овраг тем самым непосредственно влияет на весь комплекс эрозионных форм разных порядков – балки, суходолы, реки. При этом воздействие связано как с размывами по тальвегу и ростом оврага, выносом продуктов размыва с площади овражного водосбора, так и с аккумуляцией наносов. В днищах балок, суходолов, и в руслах рек формируются конуса выноса, отесняющие водные потоки, что приводит к подмыву бортов балок и берегов рек, формированию на них перекатных участков. Чем значительнее линейные размывы в днищах крупных эрозионных форм, тем большее количество размывого и перемещенного потоками материала поступает в речную сеть. С овражной эрозией во многом связан процесс заиления и отмирания малых рек первых порядков, их переход в балочные формы [1, 6]. К периоду интенсивного развития оврагообразовательного процесса относится возникновение неблагоприятных условий судоходства на многих реках Центра Европейской части России.

Н.И. Маккавеевым рассматриваются характерные особенности формирования стока воды и наносов склоновыми, в частности овражными потоками. Он отмечает неустановившийся и неравномерный характер течения, наличие ежедневных “волн пуща”, связанных с температурными колебаниями, а также образованием в связи с заторами “волн прорыва”. Все это влечет за собой возможность перемещения в русле крупных фракций наносов. Этому способствуют также, по мнению Н.И. Маккавеева,

значительные уклоны тальвега, что уменьшает сопротивление частиц грунта сдвигающему усилию. Он утверждает, что удерживающая сила, которая должна быть преодолена потоком для начала движения частицы, на склоне крутизной 10° будет приблизительно вдвое меньше, чем на склоне крутизной 1° . Уменьшение уклона склона, а, следовательно, транспортирующей способности потока по мере развития эрозионной формы, входило в расчет модели изменения интенсивности роста оврага во времени [5].

К овражным потокам, которые в отличие от речных характеризуются значительной турбулентностью, неравномерным неустановившимся режимом течения, применение расчетных зависимостей, справедливых для речных потоков, не совсем корректно. Однако Н.И. Маккавеев считал допустимым использование зависимости Шези–Маннинга для характеристики потоков на отдельных участках русла оврагов, что и использовалось нами в полной мере при анализе гидрологических и гидравлических характеристик потоков в оврагах. Натурные исследования стока воды и наносов на склоновом водосборе при реализации такого подхода позволили получить величины коэффициента шероховатости для участков оврага в различных по механическому составу породах [7]. На разных стадиях формирования стока воды и наносов проведен анализ зависимости между полученными характеристиками и скоростями течения. Величина сопротивления движению потока зависит от комплекса местных сопротивлений на днище оврага, состояния его бортов, глубины и скоростей течения.

Н.И. Маккавеевым была выполнена интересная работа по определению количества водосборов русловых систем относительно приемного бассейна [1]. Им было выявлено уменьшение количества овражных водосборов по мере удаления от берега реки (на примере участка реки Волги в Волгоградской области). Предложенная методика, основывающаяся на расчетном определении соотношения между шириной и длиной водосбора, была применена нами для определения количества оврагов, которые могут возникнуть на склонах долин рек и балок. Однако можно отметить некоторые особенности формирования овражных водосборов, развивающихся на склонах по длине эрозионных форм. Это связано с двумя моментами. Во-первых, со значительными вариациями условий оврагообразования – переменной длиной склоновых водосборов и глубиной местных базисов эрозии. Во-вторых, с несоответствием между количеством оврагов и количеством водосборов. Небольшие по протяженности водосборы в устьевых частях балок не обеспечивают скоростей и расходов водных потоков для образования эрозионной формы. В привершинной части при более длинных склонах снижаются глубины базиса эрозии и образующиеся линейные формы по морфометрическим параметрам также не соответствуют оврагам, оказываясь ближе к водоразделам и промоинам. То же относится и к водосборам, расположенным между крупными оврагами и имеющими длину меньшую чем расстояние до водораздела. Примененный к расчету количества водосборов и овражных форм подход позволил предложить метод определения возможного количества оврагов на склоновых водосборах, привязанных к тальвегу балки или пойме (урезу) реки [8].

Учение о единстве эрозионно-аккумулятивного процесса в пределах речного водосбора явилось логическим обоснованием для выделения водосборов рек в качестве количественных ареалов при расчетном определении потенциала овражной эрозии. Это позволяет определять параметры изменения состояния речных систем под воздействием процессов эрозии и аккумуляции в их бассейнах и прогнозировать развитие эрозионно-аккумулятивных процессов на водосборах при изменении направленности русловых деформаций в разных звеньях речной сети.

Единство эрозии, транспорта и аккумуляции наносов, как составных частей единого процесса и взаимосвязь эрозионно-аккумулятивных процессов в разных звеньях гидрографической сети составляют сущность закона о едином эрозионно-аккумулятивном процессе, изложенного в монографии “Русло реки и эрозия в ее бассейне”. Кроме большой научной ценности, работы Николая Ивановича Маккавеева имеют программный характер. Разработанные им методические приемы позволяют опреде-

лять и анализировать общие черты и различия в развитии звеньев эрозионной сети, получить региональные характеристики параметров, обосновывать комплекс связей между морфологическими особенностями водосборов и гидрологическими характеристиками потоков в разных звеньях эрозионной сети.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Маккавеев Н.И.* Русло реки и эрозия в ее бассейне. М.: Изд-во АН СССР, 1955. 348 с.
2. *Зорина Е.Ф., Прохорова С.Д., Чалов Р.С.* Роль овражной эрозии в формировании речных перекатов // Геоморфология. 2000. № 4. С. 76–82.
3. *Маккавеев Н.И.* Сток и русловые процессы. М.: Изд-во МГУ, 1971. 114 с.
4. Овражная эрозия. М.: Изд-во МГУ, 1989. 168 с.
5. Экспериментальная геоморфология. М.: Изд-во МГУ, 1978. Вып. 5. С. 113–140.
6. *Голосов В.Н., Иванова Н.Н., Литвин Л.Ф., Сидорчук А.Ю.* Баланс наносов в речных бассейнах и деградация малых рек Русской равнины // Геоморфология. 1992. № 4. С. 69–75.
7. *Веретенникова М.В.* Механизм овражной эрозии и динамика русловых форм // Геоморфология. 1998. № 2. С. 66–75.
8. *Зорина Е.Ф.* Овражная эрозия: закономерности и потенциал развития. М.: ГЕОС, 2003. 169 с.

Московский государственный университет
Географический факультет

Поступила в редакцию
09.04.2007

GULLIES – ONE OF THE LINKS OF SINGLE EROSION NETWORK

E.F. ZORINA, I.I. NIKIL'SKAYA

Summary

The paper concerns gully erosion as the component of erosion-accumulation process on the catch basin. The analysis is based on some ideas of N.I. Makkaveyev. The gully being the link between the area of watershed and the river and balka valleys has different functions – from the main source of silt load moving to the larger links of drainage network to the transboundary flux or accumulation zone.

УДК 551.435.12→551.312.3

© 2008 г. В.Н. ГОЛОСОВ

КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАНОСОВ В ВЕРХНИХ ЗВЕНЬЯХ ФЛЮВИАЛЬНОЙ СЕТИ: ДОСТИЖЕНИЯ И ПРОБЛЕМЫ¹

Н.И. Маккавеев впервые сформулировал положение о единстве эрозионно-аккумулятивного процесса в речном бассейне, подразумевая тесную связь между процессами смыва, размыва и переотложения наносов на всем пути их перемещения от склонов междуречья до речной дельты [1]. Верхние звенья флювиальной сети, согласно идее Н.И. Маккавеева, занимают промежуточное звено между склонами, на которых в зависимости от сочетания природно-антропогенных факторов с различной интенсивностью формируется часть бассейновой составляющей наносов, и собственно руслами рек в единой цепи перемещения наносов. Усиление интенсивности

¹ Выполнено при поддержке РФФИ (проект 07-05-00193)) и гранту Президента РФ для поддержки ведущих научных школ (проект НШ-790.2008.5).