

3. Кузнецов М.С., Григорьев В.Я., Хан К.Ю. Ирригационная эрозия почв и ее предупреждение при поливах дождеванием. М.: Наука, 1990. 119 с.
4. Маккавеев Н.И. Сток и русловые процессы. М.: Изд-во МГУ, 1971. 114 с.

Московский государственный университет
Географический факультет

Поступила в редакцию
28.05.96

GYLLY EROSION MECHANISM AND DYNAMICS OF CHANNEL FORMS

M.V. VERETENNIKOVA

S u m m a r y

The results of multiannual investigations of water runoff and solid flow in the typical gully catch basins are discussed. The test site was chosen in the central part of European Russia. Some regular features of gully channel process are established in the test site with the rocks of different density and granulometric composition. Quantitative characteristics of channels' morphometry and ephemeral flood streams' hydraulics are found. Some field data of gully's debris cone formation in the valley of Protva River are represented.

УДК 551.435.162

© 1998 г. **Е.Ф. ЗОРИНА, С.Н. КОВАЛЕВ, И.И. НИКОЛЬСКАЯ**

ПОДХОДЫ К ТИПИЗАЦИИ ОВРАГОВ¹

Возникновение и развитие оврагов, как и других эрозионных форм, связано с работой временных потоков дождевых и талых вод. Фундаментальные исследования этого процесса начались в конце XIX в., когда ошутимо стали проявляться негативные последствия оврагообразования на плодородных пахотных землях Юга Нечерноземья и Черноземной зоны России. Известны работы Массальского [1], Козменко [2], Соболева [3], Арманда [4], Рожкова [5], Косова [6], Лидова, Сетунской [7, 8], Казанской школы геоморфологов (Дедков, Бутак-ков, Мозжерин) [9] и многих других исследователей, занимающихся вопросами изучения появления и развития овражной эрозии, ее интенсивности и региональных особенностей.

Вместе с тем, до настоящего времени в научной литературе отсутствуют общепринятые классификации и терминология для обозначения линейных форм верхних звеньев эрозионной сети, в частности, оврагов. Это во многих случаях затрудняет понимание сути и сопоставление результатов работ, выполненных в различных регионах страны.

Основываясь на результатах ранее выполненных исследований, а также принимая во внимание характер исходных картографических материалов и данные экспериментов на модели оврагообразования в Гидрофизической лаборатории МГУ [10], нами приняты и используются в дальнейших работах изложенные ниже основные признаки оврагов и их классификации. Принятые классификационные признаки в наибольшей степени применимы к овражным формам равнинных областей земледельческой зоны России. Нами не рассматриваются линейные врезы горных областей, поскольку их генезис и развитие значительно отличаются от эрозионных форм равнинного рельефа. Интересны, по-видимому, классификация овражных форм и их морфометрия в зависимости от геологии и преобладающих склоновых процессов, что является предметом самостоятельного исследования. В зависимости от тектоники и строения речной сети может быть разработана классификация форм планового расчленения территории овражной сетью, что также остается за рамками настоящей работы.

Само понятие "овраг", отличающее его от прочих линейных эрозионных образований, принято связывать в первую очередь с его разрушительной способностью, соответственно с

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 97-05-64096).

определенными размерами эрозионной формы; во-вторых – с характерной формой продольного и поперечного профиля и, наконец, с динамическим состоянием всей эрозионной системы: водосбор–водоток–овраг.

Наиболее типичным оврагом для земледельческой зоны России является эрозионная линейная форма, которая в определенных природных условиях может развиваться в длину не менее чем на 80 м, в глубину – не менее 1,5–2,0 м. Придержки эти, в значительной степени условные, тем не менее связаны с характерной морфометрией склонов балочных водосборов, являющихся основным местом оврагообразования. При глубинах местных базисов эрозии склоновых водосборов 20–40 м, характерных уклонах от бровки к дну балки 15–20° (0,3–0,4), длина участка склона от подошвы до бровки оказывается равной 80–90 м. Разрушительная способность оврага обычно проявляется после выхода его вершины за бровку склона на приводораздельное пространство, т.е. когда его длина достигает 80–100 м. Землеустроители фиксируют овраги тоже после появления их вершин на поле, следовательно, с момента, когда их длина приближается к 100 м. С размерами оврага связана и особенность его развития во времени по сравнению с малыми эрозионными формами (промоины, ложбины, рывины, водороины и т.д.) на склонах, поскольку овраги – результат многолетней работы потоков дождевых и талых вод разной интенсивности.

Форма продольного и поперечного профиля оврага отличается от профилей таких линейных эрозионных врезов, как ложбины, рывины, водороины, длина которых того же порядка, что и длина оврага. Для оврага характерен продольный профиль, отличающийся от профиля склона и имеющий уклон, превосходящий крутизну склона в привершинной части и значительно снижающийся, нередко доходящий до "нуля" в приустьевой зоне. Поперечный профиль оврага изменяется как по длине оврага, так и во времени. В начальный период своего развития овраг на всем протяжении имеет обрывистые, осыпные или оползневые склоны, лишенные растительности: крутизна склонов нередко значительно превосходит уклоны естественного откоса. На поздних стадиях развития в устьевой и средней части оврага склоны обычно выполаживаются и зарастают, что наиболее характерно для гумидных зон. Нередко в определенных климатических и литологических условиях отвесные склоны длительное время сохраняются на всем протяжении крупного одиночного оврага или целой овражной системы. Склоны оврага в его привершинной части, как правило, сохраняют признаки роста весь период его активной жизни, даже тогда, когда линейный рост прекращается, но продолжают увеличиваться площадь оврага и его объем.

Третий основной признак оврага – его динамическое состояние – предполагает, что эрозионная форма находится в стадии активного развития в настоящее время или не потеряла возможность активизации в современных природных условиях, а также сохраняет признаки растущей формы, закончив основную этап развития в недалеком прошлом. Это свойство оврагов положено в основу ряда классификаций эрозионных форм, в которых овраг рассматривается как одна из промежуточных стадий развития от рывины к балке.

Классификация оврагов, по нашим представлениям, целесообразна по следующим основным признакам: по происхождению, по месту развития (типу водосбора), по стадии развития.

По происхождению овраги принято делить на естественные и антропогенные.

Естественные овраги образовывались и образуются в настоящее время, как правило, на водосборах значительной площади, где концентрируются потоки со скоростями, достаточными для размыва почвенного покрова, защищенного естественной растительностью. Импульсом к развитию линейного эрозионного вреза на склоне балочного водосбора или на склоне речной долины могут быть процессы меандрирования и подмыва берега с образованием эрозионного уступа, а также комплекс воздействия сопутствующих оврагообразованию склоновых процессов (карст, возникновение трещин в прибровочной части склона, осыпи и осывы и т.п.), катастрофические ливни и другие природные аномалии.

Антропогенные овраги – формы, образование которых обусловлено антропогенным вмешательством в природные ландшафты. По виду и степени антропогенной нагрузки могут быть выделены три достаточно крупные группы:

1) Овраги, местом образования которых являются естественные природные водосборы, процесс линейной эрозии на которых начинается при нарушении естественного природного комплекса – распашке, сведении естественного растительного покрова, усиленном обводнении территории и т.п.

2) Овраги, образование которых связано с искусственно сформированными концентраторами стока (при относительно малых водосборах, не способных в обычных условиях

создать необходимые объемы стока воды) путем создания новых линий стока – разъемными бороздами на пашне, скотопрогонными тропами, межеванием. Сюда же относятся дорожные овраги, разрушающие кюветы и полотно дорог, т.е. это овраги, сформировавшиеся на искусственных водосборах под действием атмосферных осадков. К этой группе относятся все т.н. "береговые" овраги, прорезающие крутые части склонов рек и балок, не имеющие морфометрически выраженных склоновых водосборов и не выходящие вершинами за бровку склона.

3) Техногенные овраги, образование которых происходит под действием стока промышленных вод при добыче ископаемых, строительных работах, сбросных вод разного рода предприятий. Формирование оврагов этого типа практически полностью подчинено антропогенной деятельности, может быть запланировано при составлении проекта землеустроительных работ и корректироваться в ходе их выполнения.

По месту развития (типу морфометрии водосбора) выделяются две группы оврагов.

1) Овраги, формирующиеся на склоновых водосборах, где продольные уклоны тальвега водосбора намного превышают уклоны к основной ложбине стока (поперечного профиля). Эти овраги начинают развитие на склоне в то время, когда формирующийся эрозионный врез дренирует незначительную часть склонового водосбора. Нарастание расхода в линейной форме проходит, как правило, до периода прорыва бровки склона и выхода на участки, продольные и поперечные уклоны которых сопоставимы между собой. В процессе дальнейшего развития овраг формирует морфометрию своего водосбора, увеличивая поперечные уклоны склона, образуя отвершки. В момент прорыва бровки склона вершина оврага практически становится замыкающим створом склонового водосбора. В дальнейшем линейный врез дренирует до 80% склонового стока.

2) Овраги, развивающиеся в морфометрически отчетливо выраженных линейных формах водосбора (балки, ложбины, суходолы и т.д.). Они используют водосборы ранее образованной эрозионной формы. С момента своего возникновения, благодаря преобладанию поперечных уклонов, дренируют 70–80% стока с площади водосбора, прилегающей к вершинному створу. Средние скорости роста таких оврагов обычно выше средних скоростей линейного роста оврагов первого типа, имеют меньшую вариабельность, что обусловлено также особенностями морфометрии водосборов. Практически отсутствует стадия увеличения скорости роста, связанная в оврагах первого типа с периодом привлечения в эрозионный врез расходов с возрастающей водосборной площади. Принятые различия достаточно надежно могут читаться по гипсометрическим картам крупных масштабов, начиная от 1 : 25000, т.е. тех, по которым может выполняться расчет количества и протяженности овражных форм, начиная от минимальных размеров 80–100 м.

Классификация оврагов **по стадийности их развития** разработана в основном применительно к типичным склоновым оврагам (естественным и антропогенным). Основана она на результатах анализа развития оврагов в природных условиях и экспериментах в лаборатории. Определяя стадии развития собственно оврага, мы умышленно отказываемся от названий "стадия промоины" и "стадия балки", поскольку далеко не каждая промоина или водороина на склоне в ходе развития превращается в овраг, т.е. не каждый склоновый водосбор является оврагообразующим. Считаем также, что заросший овраг может называться балкой лишь условно, поскольку балки как специфическая эрозионная форма создавались в отличных от современных условиях климата, морфологии и морфометрии рельефа. Известно также, что многим древним эрозионным формам, представляющим в настоящее время типичные балки, не предшествовала стадия оврага.

I стадия оврага – зарождение на крутом участке склона, характеризуется разрывами дернины, постепенной концентрацией склонового потока в едином русле, выработкой ложа склонового потока, его углублением, увеличением расхода потока и его скорости. Эта стадия легко определяется визуально. Вместе с тем, определение времени прохождения оврагом этой стадии развития представляет значительные трудности из-за непредсказуемо большого числа природных и чисто случайных антропогенных факторов. Это период, когда рычаги саморазвития оврага только начинают свое воздействие. В лабораторных условиях, где случайность антропогенного воздействия заменена искусственно создаваемой бороздой на склоне, а условия дернового покрова – более плотным равномерным покрытием модели, эта стадия занимает около 1% общего времени оврагообразования. Считаем, что при дальнейшем анализе оврагообразовательного процесса по данным эксперимента и составлении расчетного алгоритма развития от этого периода следует абстрагироваться и за начало оврагообразования принимать четко фиксируемый момент промыва бровки склона, когда овраг начинает рост как специфическая линейная форма.

II стадия – период наиболее активного роста практически всех параметров оврага, а особенно его длины и глубины. Продолжительность периода составляет около 10–15% общего времени оврагообразования. За это время длина оврага вырабатывается на 70–80%, объем – на 40%. Нарастание объема во времени для этого периода может быть представлено как:

$$\frac{W_i}{W_\Sigma} = 2,5 \left(\frac{t_i}{T} \right)^{0,87}, \quad (1)$$

где W_i – современный объем оврага, W_Σ – максимальный объем на завершающей стадии развития, t_i – время выработки современного объема, T – общее время оврагообразования для конкретной овражной формы.

III стадия – практической выработки полной длины оврага и 60–80% его объема. Изменение объема оврага во времени на этой стадии развития подчиняется следующей зависимости:

$$\frac{W_i}{W_\Sigma} = 1,2 \left(\frac{t_i}{T} \right)^{0,476}. \quad (2)$$

Обозначения те же, что и в предыдущей зависимости.

Эта стадия завершает наиболее активный период, занимающий около 40% общего времени развития оврага. Вторая и третья стадии оврагообразовательного процесса характеризуются наиболее интенсивным падением скоростей линейного и объемного роста, что является следствием уменьшения привершинной площади и снижения, по мере роста длины оврага, среднего уклона продольного профиля. При этом форма продольного профиля на этих стадиях остается выпуклой, при которой транспортирующая способность потоков (особенно дождевых) нарастает вниз по течению. Если в качестве показателя интенсивности развития оврага принять ежегодное приращение его объема, т.е. объем ежегодного выноса ($\text{м}^3/\text{год}$), то снижение этого показателя за период второй и третьей стадий можно представить как:

$$V_{i_w} = \frac{V_{\text{макс}w}}{t_i^{0,56}}, \quad (3)$$

где $V_{\text{макс}w}$ – интенсивность на момент прорыва бровки склона, $\text{м}^3/\text{год}$. V_{i_w} – интенсивность объемного роста на период времени t_i , $\text{м}^3/\text{год}$, t_i – относительное время, % от общего времени развития оврага.

В конце третьей стадии, когда в длину овраг практически прекращает рост, интенсивность его объемного роста снижается по сравнению с максимальной в 7–8 раз.

IV стадия соответствует, при близком к постоянному среднему уклоне, выработке профиля "равновесия", чередованию по длине оврага участков эрозии и аккумуляции, постепенному углублению верхнего и среднего участков, перемещению в верхнюю часть продольного профиля стрелы максимального прогиба. Постепенно на все большем протяжении продольный профиль оврага становится зоной транзита наносов и их аккумуляции. Это этап длительного, медленного и относительно спокойного развития, занимающий около 60% общего времени оврагообразования. Интенсивность объемного роста оврага в этот период можно представить в следующем виде:

$$V_i = V_{\text{макс}} \left(\frac{3,16 \cdot 10^3}{t_i^{2,73}} - 0,01 \right), \quad (4)$$

Обозначения те же, что и в предыдущей зависимости.

V стадия – овражная форма достигает своих предельных размеров; в зависимости от климатических, геолого-почвенных и гидрологических условий овраг определенный период сохраняет признаки активной формы. Параметры оврага на завершающей стадии развития являются функцией комплекса природных характеристик регионов. Объем оврага на завершающей стадии развития рассчитывается как:

$$W_\Sigma = K \left(\frac{h^2 HQ^{0,67}}{V_p^{2,7} n^2} \right), \quad (5)$$

Изменение относительных отметок продольного профиля по длине эрозионной формы на стадии выработанного профиля

Расстояние от устья	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
Отметка продольного профиля	0,03	0,07	0,11	0,16	0,2	0,29	0,37	0,49	0,67	1,0

где h – средняя глубина оврага на завершающей стадии развития, м; H – глубина местного базиса эрозии, м; Q – расходы паводочного стока или половодья расчетного процента обеспеченности, м³/сек; V_p – размывающая скорость как характеристика грунтов, слагающих склон, м/сек; n – коэффициент шероховатости русла оврага (0,03–0,05); K – обобщенный эмпирический коэффициент – функция формы склона, конфигурации водосбора, формы русла, типа осадков и их распределения в пределах водосборного бассейна.

Период времени, необходимый для формирования оврага, определяется по зависимости:

$$T = \frac{W_{\Sigma}}{CV_{\max}}, \quad (6)$$

где W_{Σ} – объем, определяемый в соответствии с зависимостью (5); V_{\max} – интенсивность выноса грунта за пределы овражной формы на период прорыва бровки склона (максимум активности роста), м³/год; C – эмпирический коэффициент, функция формы склона; по данным экспериментальных исследований изменяется от 0,14 на крутых выпуклых склонах до 0,25 – на склонах прямых с малыми глубинами базисов эрозии.

Для расчета максимальной интенсивности выноса грунта предлагается зависимость:

$$V_{\max} = V_0 P = V_0 \left(\frac{I - I_0}{0,2 + 0,65(I - I_0)} \right), \quad (7)$$

где P – объемное содержание грунта в потоке, V_0 – сток воды в период, соответствующий наибольшим скоростям склонового потока в замыкающем створе овражной формы (расчет по "Инструкции ГГИ"), I – уклон склона в прибровочной части, I_0 – "критический" уклон – энергетический градиент потока на перемещение по склону со скоростями, близкими к размывающей:

$$I_0 = \beta^{0,67} V_p^{2,7} n^2 Q^{-0,67}, \quad (8)$$

где β – эмпирический коэффициент, для начальных стадий формирования оврага близкий к 4,0, V_p – размывающая скорость, м³/с, n – коэффициент шероховатости, который для начальных стадий формирования оврага при глыбистом, ступенчатом русле, больших уклонах и скоростях потока, как правило, значительно превосходит величину, закладываемую в расчет максимального объема (формула 5) и близок к 0,08–0,1, Q – расход с водосборной площади, обеспечивающий размывающие скорости в прибровочной части склона, м³/с.

Зависимости, позволяющие рассчитать параметры оврага на заключительной стадии развития, получены на основе анализа кривой продольного профиля оврага, достигнувшего т.н. "равновесия", или "выработанного" продольного профиля. В таблице, представлено относительное изменение отметок "выработанного" продольного профиля линейной эрозионной формы, развивающейся под действием временных потоков, формирующихся на склоновых водосборах в периоды дождей и таяния снега (при относительно равномерном его залегании и таянии на водосборе). Форма водосбора, определяющая в значительной степени нарастание расхода по длине эрозионной формы, принята типичной для центральной России, осредненной по данным обработки картографических материалов и анализу натуральных наблюдений.

Изменение уклонов по длине эрозионной формы, определяющее полученные отметки продольного профиля, хорошо согласуется с рекомендациями по расчету изменений этих характеристик для речных бассейнов, предложенными Н.И. Маккавеевым [11]. Анализ продольных профилей овражных форм показывает, что практически все они находятся еще в стадии развития и имеют отметки профилей более высокие, чем расчетные. Типичные

заросшие овраги Орловской области (Мценский район) имеют профиль, приближающийся к расчетному [12].

Интересно сопоставление расчетного предельного профиля с продольными профилями балок, конфигурация водосборных бассейнов которых близка к склоновым водосборам оврагов. Такая работа была выполнена В.П. Бондаревым [13] по результатам анализа балочных форм региона Центрального Черноземья.

Расчетная кривая (таблица) занимает среднее промежуточное положение между кривыми, характеризующими наиболее и наименее выработанные по длине профили балок, т.е. оно достаточно надежно характеризует как форму профиля, так и относительные значения отметок. Большинство современных балок имеют днище с отметками несколько выше расчетных, что может быть как результатом последующих аккумулятивных процессов, так и "недовыработанности" продольного профиля в некоторых балочных формах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Массальский В.И.* Овраги черноземной полосы России, их распространение, развитие, деятельность. СПб., 1897. 251 с.
2. *Козменко П.С.* Борьба с овражной эрозией почв на сельскохозяйственных угодьях. М.: Сельхозгиз, 1963. 206 с.
3. *Соболев С.С.* Развитие эрозионных процессов на территории Европейской части СССР и борьба с ними. Т. 1. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1948. 307 с.
4. *Арманд Д.Л.* Антропогенные эрозионные процессы // *Сельскохозяйственная эрозия и борьба с ней.* М.: Изд-во АН СССР, 1956. С. 7–46.
5. *Рожков А.Г.* Борьба с оврагами. М.: Колос, 1981. 200 с.
6. *Косов Б.Ф.* Рельефообразующая роль антропогенной эрозии // *Вестн. МГУ. Сер. 5, География.* 1978. № 5. С. 19–26.
7. *Лидов В.П.* Некоторые закономерности размыва в овражных системах и стадийность в развитии внутренней морфоструктуры оврагов // *Вестн. МГУ. Сер. 17. Почвоведение.* 1960. № 4. С. 61–67.
8. *Лидов В.П., Сетунская Л.Е.* Результаты исследования процессов эрозии количественным методом посредством анализа серии специальных карт (на примере Приволжской возвышенности) // *Тр. Ин-та леса АН СССР.* 1959. Т. 64. С. 5–34.
9. Овражная эрозия востока Русской равнины / Под ред. А.П. Дедкова. Казань: Изд-во Казан. ун-та, 1990. 142 с.
10. *Никольская И.И.* Экспериментальные исследования развития оврагов: Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. М.: МГУ, 1980. 26 с.
11. *Маккавеев Н.И.* Русло реки и эрозия в ее бассейне. М.: Изд-во АН СССР, 1955. 347 с.
12. *Зорина Е.Ф.* Расчетные методы определения потенциала овражной эрозии // *Эрозия почв и русловые процессы.* Вып. 7. М.: Изд-во МГУ, 1979. С. 81–90.
13. *Бондарев В.П.* Геоморфологический анализ и прогноз оврагообразования (на примере Центрального Черноземья): Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. М., 1994. 25 с.

Московский государственный университет
Географический факультет

Поступила в редакцию
15.11.97

APPROACHES TO GULLY TYPIFICATION

E.F. ZORINA, S.I. KOVALEV, I.I. NIKOL'SKAYA

S u m m a r y

Characteristic features of gullies, extrinsic to other erosion forms, are under discussion. Gully formation is considered as one of constituent elements of relief development. It is dynamic form of curtain shape and extent. Classification principles based on different characteristics were suggested. The classification by developmental stages is one of the most interesting one. Five stages classified by value of growing velocity were deduced.