

**МЕТОДИКА НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

УДК 551.4.014 : 551.435.162

**Б. Ф. КОСОВ, И. И. НИКОЛЬСКАЯ****ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА  
РАЗВИТИЯ ОВРАГА**

Опыт по изучению процесса развития линейной эрозионной формы под влиянием стока дождевых вод, проведенный в Проблемной лаборатории эрозии почв МГУ, позволил выявить особенности механизма процесса овражной эрозии, а также последовательность изменения во времени скоростей роста и размеров разных параметров оврага — длины, глубины, ширины и др. Оврагообразование осуществляется взаиморегулируемыми эрозионными и склоновыми процессами. Изменение их интенсивности во времени, определяющие скорости роста морфометрических параметров оврага, связаны с неоднородностью исходной поверхности рельефа модели, изменениями формы и размеров оврага самими этими процессами, изменениями размеров водосбора в точке роста его вершины. Все параметры оврага растут неравномерно: увеличение скоростей их роста неоднократно сменяется замедлением. Количество, размеры и форма этих «волн» скоростей неодинаковы для разных параметров. По преобладающей тенденции роста выделяется семь наиболее характерных этапов. Первые четыре этапа характеризуются наибольшими скоростями и неравномерностью роста параметров. Например, за первый этап глубина оврага достигает 70%, длина овражной системы — 26%, а объем — только 6% своих предельных размеров. На этих этапах изменения соотношения скоростей роста находят достаточно четкое выражение в особенностях морфологии оврага. На последующих этапах при продолжающемся значительном росте оврага (напрямую, объема) его морфология изменяется в меньшей степени.

Известно, что интенсивность роста оврагов находит закономерное выражение в их морфологическом облике. По стадиям морфологического развития оврагов принято судить о потенциальных возможностях их роста.

Несмотря на большую литературу по вопросам эрозии, данные по росту оврагов разных морфологических стадий весьма немногочисленны и относятся почти исключительно к линейному росту овражных вершин.

Поиск взаимосвязи между показателями морфологии и динамики оврагов представляет большой практический интерес, поскольку дает возможность прогнозирования роста линейных эрозионных форм. Для решения этой задачи необходимо прежде всего определение причин последовательных изменений динамики развития и морфологии оврагов во времени. Общей причиной является изменение условий оврагообразования. Оно происходит не только в результате воздействия внешних сил, влияющих на ландшафт. Динамика осадков и снеготаяния, тектонические движения земной коры, различные геоморфологические про-

цессы, изменяющие рельеф овражных водосборов, хозяйственное преобразование их территории — все это может возбудить, усилить или, наоборот, прервать процесс оврагообразования в отдельные периоды. Но некоторые общие закономерности развития оврагов и последовательность преобразования их формы не связаны с изменениями во времени этих внешних процессов. Известно, например, что в ходе развития оврага имеется определенная тенденция постепенного замедления его линейного роста, уменьшения интенсивности глубинной и боковой эрозии независимо от характера проявления внешних процессов.

Обязательным фактором, влияющим на изменение условий оврагообразования, определяющих закономерные изменения динамики роста оврагов, является направленное последовательное преобразование их формы и размеров, т. е. процесс саморазвития оврагов. Выявление закономерностей этого процесса, как и вообще процесса саморазвития геоморфологических, геологических, метеорологических и других объектов и явлений неживой природы, имеет большое принципиальное значение для разработки методов прогноза и управления природными процессами. Без выяснения этих общих закономерностей невозможно понять особенности развития отдельных взаимосвязанных элементов оврагов и влияния на них внешних факторов — геологических, метеорологических, биологических, антропогенных — в различных природных условиях.

Изучение процесса саморазвития оврага представляет значительные трудности по двум причинам. Во-первых, до настоящего времени почти совершенно не исследован механизм саморегулирования роста оврагов. Во-вторых, поскольку динамика роста оврага регулируется одновременно и процессом его саморазвития и современными изменениями внешних агентов, необычайно сложно выделить закономерности, обусловленные только саморазвитием. Наиболее обоснованное решение этих вопросов возможно путем изучения процесса развития оврагов в натуре. Но это требует организации широкой сети стационаров для производства многолетних систематических наблюдений. Кроме того, в настоящее время не разработана еще и общая методологическая схема исследований процесса саморазвития оврагов.

Учитывая все эти обстоятельства, с целью первого приближения к решению задачи в Проблемной лаборатории эрозии почв и русловых процессов МГУ была поставлена серия опытов по моделированию процесса оврагообразования. Опыты выполнялись в лотке размером  $1,8 \times 1,2$  м с дождевальной установкой. Лоток заполнялся люберецким песком с небольшой (15%) примесью суглинка. Мощность этой толщи составляла 16 см. Вывороченная поверхность грунта слабо наклонена ( $1^\circ$ ) к внешней части лотка, где она обрывается крутым ( $35^\circ$ ) откосом. На поверхности модели по ее оси была заложена пионерская ложбина стока с двумя ветвями, впадающими в нее справа и слева на разных расстояниях от устья. Ложбины разделены водораздельными грядами и имеют примерно равные площади водосборов. Склоны гряд наклонены к ложбинам стока под углом от  $1^\circ$  в верхней части модели до  $5^\circ$  в нижней, у бровки откоса. Превышения водоразделов над дном ложбин составляют соответственно от 1 до 3 см. Влажная поверхность модели посыпалась сухой глинистой пылью, которая, проникая в песок, образовала корку толщиной 2 мм, не разрушаемую дождевыми каплями. В то же время комочки этой корки, попадающие в русло, быстро разрушались потоком, не образуя откоски.

Опыт проводился в стабильных внешних условиях. Положение лотка не менялось. Грунт во время дождевания был насыщен водой. Продолжительность дождевания составляла 3 мин. Интенсивность дождей равнялась 3,4 мм/мин. Всего в опыте было проведено 500 дождеваний общей продолжительностью 25 час, что по критерию подобия Струхала

равно 21400 час. В природных условиях средней полосы это соответствует ~40—50 годам времени развития оврага.

Измерения длины, ширины и глубины оврага проводились специальным прибором — координатометром, сконструированным сотрудником лаборатории К. К. Борисовым; площадь определялась по снимкам аэрофотокамерой, объем овражной системы — по твердому стоку. Измерения всех этих параметров в начале опыта, при быстром его течении, проводились после каждого дождя, а далее, по мере замедления процесса роста оврага, все более разреженно. За время опыта выполнено 35 синхронных измерений: длины главного оврага ( $l$ ) и всей овражной системы ( $\Sigma l$ ), глубины в приустьевом сечении оврага ( $h$ ), ширины между бровками ( $B$ ) и ширины дна ( $b$ ) в том же сечении, площади дна ( $f$ ) и площади между бровками ( $F$ ), объема овражной системы ( $W$ ). Размеры оврага в конце опыта приведены в табл. 1.

Таблица 1

Размеры оврага в конце опыта

| $l$ , см | $\Sigma l$ , см | $h$ , см | $b$ , см | $B$ , см | $f$ , $\text{дм}^2$ | $F$ , $\text{дм}^2$ | $W$ , $\text{дм}^3$ |
|----------|-----------------|----------|----------|----------|---------------------|---------------------|---------------------|
| 167      | 392             | 15       | 32       | 54       | 4,8                 | 9,8                 | 88,8                |

Опыт показал, что оврагообразование представляет собой не только эрозионный русловой процесс. Оврагообразование осуществляется совместной взаимообусловленной деятельностью эрозионных и «склоновых» процессов. Саморегулирование этих процессов проявляется через взаимное изменение условий, определяющих интенсивность их развития. Глубинная, боковая и регрессивная эрозия, изменяя высоту и крутизну бортов оврага, а также площадь его водосбора, регулируют интенсивность склоновых процессов. Последние, в свою очередь, влияют на интенсивность роста ширины и площади оврага между бровками, а также на удлинение его вершины. Склоновые процессы, изменяя уклоны и сечение русла, мутность потока, а также площадь водосбора, регулируют интенсивность развития эрозионных процессов, осуществляющих углубление оврага, рост ширины и площади его дна и отчасти также удлинение его вершины. Таким образом, выявляется, так сказать, органическая закономерная взаимосвязь роста различных параметров оврага. До сих пор это явление мало привлекало к себе внимание исследователей и характер указанной связи оставался невыясненным.

Систематические измерения различных параметров оврага в ходе его развития выявили волнообразный характер темпов их роста: периоды повышения скоростей роста чередуются с периодами падения. Общий ход развития оврага графически можно представить в виде асимметричной волны. Сначала темпы роста ускоряются и достигают максимума в течение очень короткого периода, составившего всего 3% от времени роста оврага. Затем скорости роста затухают и в конечном этапе развития, отмечающем «возраст» оврага, снижаются практически до нуля. Указанная общая тенденция роста осложнена вторичными наложенными волнами изменения скоростей также асимметричной формы с быстрыми подъемами и постепенными снижениями скоростей. Волнообразный характер изменения скоростей и режим этих изменений обусловлены двумя основными причинами. Первая — неоднородность исходных условий развития эрозионных процессов на модели, заключающаяся в резком изменении уклона поверхности грунта от  $1^\circ$  на водосборе до  $35^\circ$  на откосе и в наличии двух отверстий основной ложбины стока. Вторая причина — скачкообразные преобразования эрозионными

и склоновыми процессами уклонов тальвега различных морфометрических параметров оврага, а также площади водосбора.

Резкий перелом уклона на крутом откосе в нижней части модели является главной причиной ускоренного роста оврага в начальной стадии. Здесь быстро образуется глубокая ложбина с отвесными стенками в вершине. Постепенное повышение вершинного обрыва в результате размыва его подошвы падающей струей вызывает интенсивные обвалы и регрессивное продвижение вершины по линии стока. Возникает крутостенный короткий овраг, быстро увеличивающий свою длину. В то же время нарастание высоты бортов оврага относительно его дна под влиянием глубинной эрозии вызывает увеличение интенсивности гравитационных процессов и, следовательно, скорости расширения оврага между бровками.

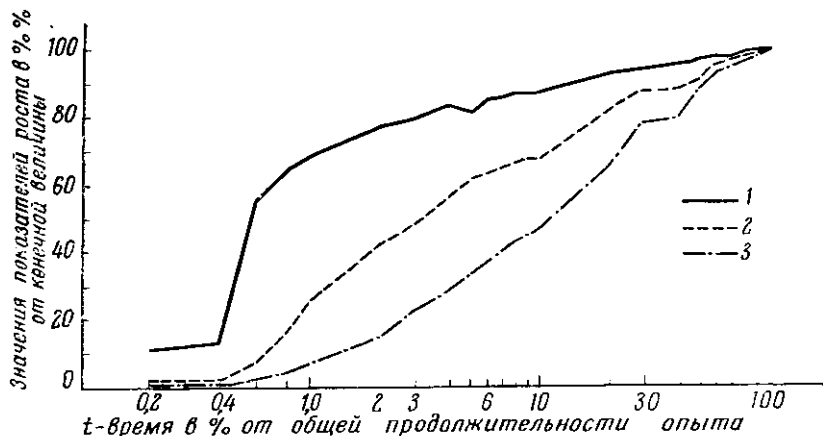
Спад скоростей линейного и глубинного роста оврага после достижения их максимальной интенсивности происходит в результате: а) убывания расхода воды, поступающей в овражную вершину вследствие уменьшения вышележащей площади водосбора, вызываемого линейным ростом оврага; б) снижения энергии падающей струи в вершинном перепаде вследствие снижения высоты перепада при выходе вершины откоса на ровную поверхность водосбора; в) образования у подножия перепада «водобойного» колодца, заполняемого в паводок водой и гасящего энергию падающей струи; г) уменьшения уклона поверх-

Таким образом, описанная выше общая волна изменений темпа роста всех параметров оврага — быстрое нарастание их в начале и постепенное последующее снижение — обусловлена соответствующим изменением интенсивности эрозионных и склоновых процессов, связанным с неравномерностью уклона первичной поверхности модели и уменьшением площади привершинного водосбора по мере роста оврага.

Вторичные волны изменений интенсивности роста параметров оврага на крыльях этой главной волны также обусловлены соответствующими изменениями интенсивности эрозионных и склоновых процессов. В образовании вторичных волн немаловажную роль играет опять-таки некоторая неоднородность первичного рельефа модели, заключающаяся уже не в различиях уклона ее поверхности, а в неравномерном распределении на водосборе сети ложбин, по которой развивается овражная сеть. Ложбинная сеть состояла из главного ствола и двух отвершков, ответвляющихся на разном расстоянии от его устья под разными углами. Оврагообразование по отвершкам начиналось в разное время. Развитие оврага в каждом отвершке усиливает в главном овраге интенсивность глубинной и боковой эрозии: первой — в результате увеличения объема стока по овражной системе пропорционально дренируемой площади водосбора, второй — в результате бокового смещения (отжима) главного потока мощной струей из отвершка, а позже его конусом выноса. В результате указанных процессов уже в самом начале оврагообразования наблюдались два вторичных максимума интенсивности глубинной и боковой эрозии и роста параметров оврага. Общее число вторичных максимумов достигло семи. Кроме первых двух, остальные максимумы не связаны с неоднородностью первичного рельефа. Скачкообразные или более спокойные изменения темпов роста обусловлены неравномерными изменениями условий развития эрозионного и склоновых процессов в самом овраге в результате изменения его размеров и формы. Наиболее резкие изменения условий развития эрозионного и склоновых процессов происходят при достижении различными параметрами оврага некоторых критических значений. Такие явления наблюдаются: а) в начале оврагообразования — главным образом в результате достижения под воздействием глубинной эрозии критических зна-

чений высоты и крутизны бортов в низовьях оврага, вызывающих интенсивное развитие склоновых деформаций; б) несколько позже — в результате линейного роста оврага, вызывающего удлинение фронта указанных критических глубин и быстрое возрастание объема грунта, поступающего в русло; в) еще позже — в результате периодического локального нарастания крутизны овражных откосов под влиянием боковой эрозии, в частности на участках излучин.

Как показывают наблюдения, скачкообразные повышения любого из оврагообразующих процессов — глубинной эрозии, бокового размыва, гравитационных процессов — всегда возбуждают цепь последовательных, взаимосвязанных волнообразных изменений скоростей роста всех



Рост относительных размеров глубины оврага, длины и объема овражной системы, % к их конечным значениям.

1 — глубина оврага; 2 — длина овражной системы ( $\Sigma l$ ); 3 — объем овражной системы

параметров оврага. При этом рост одних из этих параметров сначала ускоряется, а затем замедляется, других, напротив, сначала замедляется, а позже ускоряется, третьих — прерывается, сменяясь редукцией.

Кроме того, хотя все изменения скоростей и вызваны общим импульсом и описываются в общем сходными волнообразными кривыми, распределение волн во времени, их размеры и форма неодинаковы. Так, например, лавинообразный характер гравитационных процессов вызывает обычно в течение короткого времени резкие изменения скоростей роста почти всех параметров оврага. Расширение оврага между бровками в этом случае мгновенно достигает максимальной скорости, и последующее ее снижение идет также довольно быстро. Что касается других параметров оврага, то время пиков скоростей их роста (максимумов и минимумов) оказывается всегда несколько более поздним, а последующий подъем и спад скоростей — почти всегда значительно более продолжительным, чем первого параметра.

Некоторыми особенностями отличается рост длины и объема оврага, осуществляемый эрозийными процессами. Волнообразные изменения скоростей роста этих параметров наиболее плавные по сравнению с другими параметрами оврага.

Из сказанного следует один общий вывод о неравномерности и несинхронности роста различных параметров оврага: ускорение роста одних параметров оврага может сопровождаться замедлением роста других, прекращение роста в одном направлении — началом или продолжением роста в других. Это общее положение иллюстрирует график роста оврагов (см. рисунок). На графике выделяется семь этапов разной продолжительности, характеризующихся наиболее существенными изменениями тенденций роста отдельных параметров оврага (табл. 2).

Таблица 2

Продолжительность этапов роста оврага, % от общего времени опыта

| № этапа                | I | II | III | IV | V | VI | VII |
|------------------------|---|----|-----|----|---|----|-----|
| Продолжи-<br>тельность | 1 | 1  | 1   | 3  | 4 | 20 | 70  |

Таблица 3

Соотношение морфометрических параметров оврага по этапам

| Относительные<br>размеры | Этапы роста |     |     |     |     |     |     |
|--------------------------|-------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|                          | I           | II  | III | IV  | V   | VI  | VII |
| $h$                      | 1           | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   |
| $b$                      | 0,4         | 0,4 | 0,8 | 1,7 | 1,7 | 1,4 | 2,1 |
| $\Sigma l$               | 10          | 15  | 17  | 22  | 22  | 24  | 27  |

В целом все параметры оврага достигают 70—95% своих предельных значений за первую треть жизни оврага. Именно в это время, в особенности на первых этапах, наблюдается и наиболее неравномерный рост различных параметров: глубина и длина главного оврага уже за время около 1% возраста оврага достигают почти 70% своих предельных величин, между тем как объем и длина всей овражной системы за то же время — в 10 раз меньше. На последующих этапах относительные приращения объемов превышают приращения глубины и длины основного оврага и на последнем этапе  $\Delta W$  становится, в свою очередь, в 10 раз больше  $\Delta h$ . Неравномерный рост различных параметров оврага находит определенное отражение в изменениях по этапам его морфометрии, что показано в табл. 3, где величина глубины оврага принята за единицу.

Из таблицы видно, что на первых этапах развития морфологическая структура оврага достаточно выразительно отражает особенности динамики его роста. Два первых этапа отчетливо выделяются по изменению соотношения глубины к длине, а два следующих — главным образом по отношению  $h : b$ . Далее заметные изменения морфологической структуры оврага наблюдаются лишь на седьмом этапе. Но на пятом и шестом этапах заметных трансформаций морфологической структуры оврага не обнаруживается, хотя за это время, составляющее около 25% возраста оврага, происходят значительные изменения тенденций роста параметров и вместе с тем значительный прирост их значений. Например,  $\Delta h = 27$ ,  $\Delta \Sigma l = 32$ ,  $\Delta W = 42$ ,  $\Delta i = 33\%$  от предельных.

Таким образом, на поздних стадиях развития в течение длительного времени морфологическая структура оврага не может служить сама по себе показателем динамической стадии и интенсивности его роста.

Таблица 4

Соотношение морфометрических параметров оврага и водосбора на различных этапах оврагообразования

| Параметры             | Этапы роста |      |      |      |     |     |      |
|-----------------------|-------------|------|------|------|-----|-----|------|
|                       | I           | II   | III  | IV   | V   | VI  | VII  |
| $\Sigma l : \Sigma L$ | 0,35        | 0,55 | 0,6  | 0,7  | 0,8 | 0,8 | 0,85 |
| $h : H$               | 0,65        | 0,75 | 0,75 | 0,75 | 0,8 | 0,9 | 0,95 |

Для суждения о последних следует привлекать дополнительные показатели, характеризующие отношение размеров оврагов к размерам элементов рельефа водосбора: длины оврага ( $\Sigma l$ ) к длине склона ( $\Sigma L$ ), глубины ( $h$ ) к глубине базиса эрозии ( $H$ ) и т. п. (табл. 4).

Из табл. 4 видно, что V этап заметно отличается от IV степенью приближения длины овражной системы к водоразделу, а VI от V — степенью приближения глубины оврага к глубине базиса эрозии, в то время как соотношение  $h : \Sigma l$  на этих этапах (табл. 3) практически не меняется (1 : 22 или 1 : 24).

Морфологическая структура оврага и относительные значения ее параметров являются наиболее легко определяемыми, но не единственными возможными показателями для выявления в натуре динамических стадий роста оврага. Выявление закономерностей эволюции овражных склонов и особенностей формирования овражного пролювия позволило бы иметь более полный и надежный комплекс таких показателей. Изучение этих закономерностей представляет одну из задач дальнейших исследований лаборатории.

Географический факультет  
МГУ

Поступила в редакцию  
9.VI.1972 г.

---

## EXPERIMENTAL STUDIES OF THE GULLY DEVELOPMENT PROCESS

B. F. KOSOV, I. I. NIKOLSKAYA

### Summary

Artificial rain set experiments on the gully formation allowed to reveal some special features of erosional and slope processes interacting at the gully forming as well as sequence of changes of rate of gully's dimensions growth — length, width, depth etc. Interdependence of the changes and their sequence in time allows to distinguish several stages of the gully growth. The elucidation of morphometric parameters of gully development stages makes it possible to develop methods for the forecast of the landforms growth.

---