

МЕТОДИКА НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 551.4.012 : 551.435.162

ИВОНИН В. М., ПРАХОВ В. А., СУКОВАТОВ Ю. М.

МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
ОВРАГООБРАЗОВАНИЯ

При изучении целостных картин оврагообразования данные натуральных наблюдений необходимо дополнять результатами исследований на физических моделях. Опыт построения и исследования таких моделей весьма ограничен. Наиболее полно он изложен в работах Б. Ф. Косова с сотр. [1 и др.]. Учитывая результаты этих исследований и пожелания по их совершенствованию [2], нами разработана методика экспериментов.

Исследования проводились в трехстенном гидрлотке с водоприемным оборудованием и устройством для напуска воды при выполнении общих требований методик моделирования гидравлических явлений [3, 4] с обеспечением подобия литологического строения склонов [5]. Последнее требование обеспечивалось равенством гидродинамического или гидростатического критериев моделирования

$$K_1^M \Leftarrow K_1^H \text{ или } K_2^M = K_2^H, \quad (1)$$

где $K_1 = R_i/R_{\text{ср. в.}}$ — гидродинамический критерий, характеризующий отношение эрозионной прочности породы (эквивалентного материала) i -го слоя (R_i) к средневзвешенной эрозионной прочности ($R_{\text{ср. в.}}$) по сумме слоев эрозионного вреза; $K_2 = T_i/T_{\text{ср. в.}}$ — гидростатический критерий, характеризующий отношение размокаемости породы (эквивалентного материала) i -го слоя (T_i) к средневзвешенной размокаемости ($T_{\text{ср. в.}}$) по сумме слоев эрозионного вреза. Эрозионная прочность пород и эквивалентных материалов определялась по методике, описанной в работе Г. В. Бастракова [6], а размокаемость на специальном приборе (ПРГ).

Для построения моделей склонов использовались песчано-цементные смеси, эрозионная прочность и размокаемость которых регулировалась содержанием цемента. Соотношение песка и цемента в каждом образце устанавливалось с помощью графиков, построенных по данным специальных исследований. Использовались: ергенинский песок и цемент марки-400. Эрозионная прочность и размокаемость образцов эквивалентных материалов определялись по зависимостям

$$R^M = R^H/M_r \text{ и } T^M = T^H/M_t, \quad (2)$$

где M_r и M_t — соответственно масштабные коэффициенты для эрозионной прочности и размокаемости пород (для глинистых и пылеватых пород $M_r = M_t$).

Для верхнего почвенно-растительного слоя (практически не размокаемого) принимались условное время размокания 2880 мин (2 сут) и эрозионная прочность около 3000 Н. Масштабные коэффициенты геометрического подобия (M_e) определялись с учетом размеров экспериментальной установки, обеспечивающей размыв модельного склона потоком с относительно стабилизированным режимом течения. Динамическое подобие натуральных и модельных потоков достигалось равенством

критериев Фруда (Fr) при показателях критерия Рейнольдса (Re) больше определенного значения (в наших опытах $Re_{кр} = 1500$), когда при турбулентном течении модельного потока силами вязкости пренебрегают. Эти требования определялись условиями

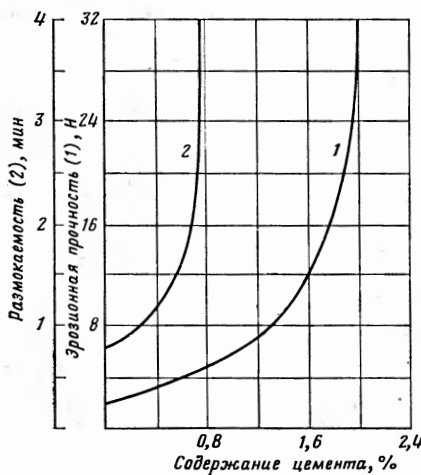
$$\begin{aligned} K_3 &= Fr = V^2/gH = igem, \\ K_4 &= Re = VH/\nu > Re_{кр}, \end{aligned} \quad (3)$$

где V — скорость, м/с; H — глубина потока, м; ν — коэффициент кинематической вязкости.

Критерий $H/\Delta = igem$ (Δ — шероховатость поверхности), обязательный при моделировании срыва, при имитации оврагообразования искажается. Масштабы времени и расходов определялись не на основе критерия Фруда (Fr), а в процессе калибровки и экспериментальной проверки модели, что не противоречит практике моделирования [4 и др.].

В целом определен следующий порядок эксперимента. В натуре (опытное хозяйство ВНИАЛМИ «Качалинское» Волгоградской области) подбирались овраги-аналоги, на защищенных бортах которых выделялись слои породы по цвету, составу, плотности и пористости. Определялась их эрозионная прочность и размокаемость. В соответствии с принятым масштабом моделирования при помощи рабочих графиков (рис. 1) выбирался состав песчано-цементной смеси для каждого из слоев модельного материала. Мощности натуральных и модельных слоев соответствовали друг другу при равенстве критериев K_1 или K_2 .

Рис. 1. Рабочие графики для определения содержания цемента в цементно-песчаной смеси по ее эрозионной прочности (1) и размокаемости (2)



При построении модели днище лотка выстилалось слоем гравия (для дренажа), на который последовательно укладывались слои модельного материала. Поверхности модели по оси лотка с помощью специального шаблона была придана форма пологой ложбины. Толща модельного материала в лотке увлажнялась (20%) и выдерживалась до стабилизации свойств в течение двух недель. Напуск воды по сериям опытов осуществлялся при соблюдении условия (3) и выполнения требования равенства уклонов в сходных точках натурального и модельного склонов. При проверке соответствия качественной картины оврагообразования вносились необходимые поправки в исходные физические условия: уточнялись время напуска и расходов воды, устанавливалось количество напусков (серий) в каждом опыте. Время напуска воды (продолжительность серии опыта) составило 2 мин, интервалы между напусками — 30 мин. Качественная картина оврагообразования достигалась в продолжении семи напусков в каждом из опытов.

Динамика морфометрических показателей, пересчитанных на натуре (таблица), показывает, что как в первом, так и во втором опытах модели оврагов достигали длины и глубины натуре во время проведения 4-й серии. При обследовании оврагов-аналогов был установлен их возраст, равный около 10 лет. В результате определен примерный масштаб времени развития модельного оврага за каждую серию опытов, соответствующий трем годам развития натурального оврага. Используя этот масштаб и данные таблицы, мы рассчитали темпы прироста основных размеров модельных оврагов за условный год, средний для каждой серии опытов (рис. 2, 3). Сравнение полученных данных с результатами

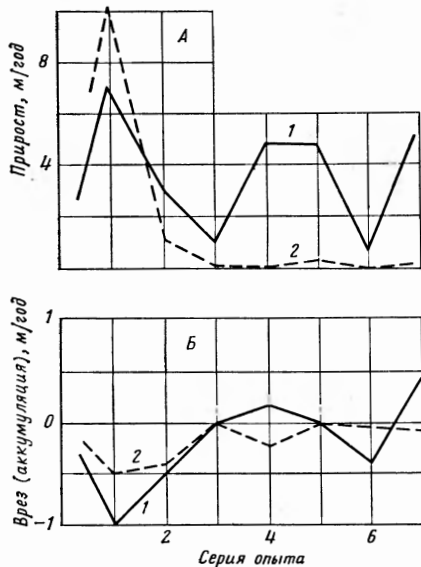


Рис. 2. Динамика средних (по сериям опытов) за условный год приростов в длину (А) и эрозионных врезов (Б) оврагов, моделируемых по критериям K_2 (1) и K_1 (2)

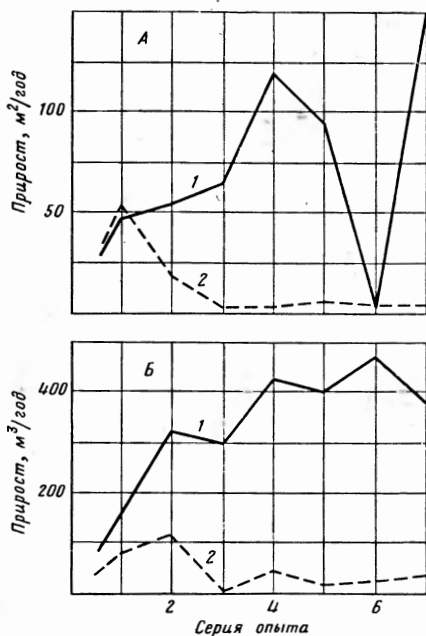


Рис. 3. Динамика средних (по сериям опытов) за условный год приростов по площадям между бровками (А) и объемом (Б) оврагов, моделируемых по критериям K_2 (1) и K_1 (2)

исследований природных оврагов [7], развивающихся в лёссовидных породах, показало сходство качественных картин оврагообразования (одинаковые соотношения площадей между бровками и средних глубин) при проведении экспериментов по критерию K_2 .

Полученная на моделях качественная картина оврагообразования в различных породах заключается в следующем. При моделировании оврагообразования в легкоразмокаемых породах (критерий K_2) размыв начался в начале 1-й серии напуска, когда поток прорезал нижний участок крутого уступа до дренажного слоя и образовал вершинный перепад, который начал регрессивно развиваться. Одновременно активизировались склоновые процессы, размыйтый материал полностью удалялся донным потоком. В конце серии на крутом уступе возник овраг, уклон плоского днища которого соответствовал уклону лотка или основного (балочного) склона. Трапециевидная форма оврага в плане преобразовалась во время 2-й серии в булавовидную. Поперечный профиль напоминал трапецию, форма которой постоянно искажалась при оплывании и оползании бортов. Зафиксированы три последовательно сменяющихся цикла эрозионно-аккумулятивного процесса: регрессивная эрозия с подрезанием потоком склонов оврага; обрушение и оползание склонов с оттеснением потока образующимися шлейфами к центру днища и образованием конуса выноса; временная стабилизация размеров оврага с выносом твердого материала за пределы овражной формы и размывом конуса выноса. По сравнению с 1-й серией средняя глубина, площадь и объем оврага резко возросли, а прямая форма продольного профиля преобразовалась в вогнутую. После прекращения подачи воды в процессе ее добегаания процессы на склонах и в вершине размыва продолжались, и на днище отлагался аллювий.

Во время 3-й серии размыв своей вершиной приблизился к бровке балочного склона. Форма его в плане не изменилась. При росте линейных размеров оврага заметно активизировались склоновые процессы, поставляющие основной объем аккумуляции и сдерживающие эрозионный врез. Зафиксировано разрушающее воздействие капель, образующихся при разбиении водной струи, падающей через вершинный пере-

Динамика основных размеров моделей оврага по сериям опытов

Номер серии	Длина, м	Средняя глубина, м	Площадь, м	Объем, м³	Коэффициент	
					формы в плане V_{max}/L	относительной ширины V_{max}/\bar{H}
Опыт 1. Моделирование по критерию K_2						
1	21,0	3,0	144,9	434,7	0,428	3,0
2	30,0	4,5	304,2	1368,9	0,510	3,4
3	33,0	4,5	494,6	2225,7	0,618	4,5
4	47,4	4,1	855,7	3508,4	0,601	6,9
5	61,8	4,1	1142,6	4684,7	0,466	7,0
6	63,6	5,3	1148,4	6086,5	0,453	5,4
7	79,2	4,5	1601,6	7207,2	0,388	6,7

Опыт 2. Моделирование по критерию K_1

1	30,6	1,4	159,8	223,7	0,261	5,7
2	33,9	2,5	216,5	541,2	0,301	4,1
3	33,9	2,5	223,6	559,0	0,301	4,1
4	33,9	3,0	231,8	695,4	0,301	3,4
5	34,8	3,0	247,1	741,4	0,339	3,9
6	34,8	3,1	257,9	799,5	0,344	3,9
7	35,4	3,3	271,9	897,3	0,367	3,9

пад на дно оврага. При этом нижние слои породы (обладающей мгновенной скоростью размокания) быстро оплывали и над водобойным колодцем нависали карнизы (kozyрьки) верхних, практически не размокаемых слоев (имитирующих гумусовый слой почвы). В среднем эрозионный врез соответствовал темпам аккумуляции; глубина оврага по сравнению с его глубиной в предыдущей серии не изменилась. К концу 3-й серии поперек ложбины в прибровочной зоне балочного склона образовалась трещина, видимо, в связи с изменением напряжений в толще модельного материала, вызванным подходом к бровке (со стороны уступа) овражного русла и образованием в нем нависающих карнизов. Трещина перехватывала часть проходящей по ложбине воды и направляла ее в толщу модельного материала за пределы воздействия поверхностного потока. Это привело к резкому расширению русла при его выходе через бровку на балочный склон в последующей (4-й) серии опыта, когда овраг в плане приобрел цирковидную форму. Поперечные профили по длине оврага изменялись следующим образом: в привершинной зоне (активного разрушения) прямоугольная и трапециевидная формы сменяли друг друга при активизации оползней и удалении оползневых шлейфов донным потоком; в средней, наиболее широкой части оврага устойчивая трапециевидная форма нарушалась блоками обрушений нависающих карнизов. Нагромождения блоков занимали участки днища и склонов, сдерживая оползневые процессы в одних местах и активизируя их в других. Блоки обрушений перерабатывались донным потоком, образующиеся глыбы переносились в приустьевую часть оврага. Скопления глыб выполняли роль плотин, временно подпруживающих поток и вызывающих усиленную аккумуляцию рыхлого материала, который быстро заполнял свободные промежутки между глыбами. Увеличение аккумулятивной толщи привело к уменьшению средней глубины оврага по сравнению с глубиной его в предыдущей серии опыта.

Основная масса материала поступила в овраг в результате обрушения нависающих карнизов «гумусового» слоя. Одновременно участки склонов осложнялись оползнями: придонный шлейф рыхлого материала размывался струей, траектория движения которой определялась бортовыми «останцами». В прибровочной овражной зоне возникла трещина — закол; массив породы (ограниченный трещиной) вертикально сместился, образовав участок террасы оседания и новый придонный шлейф, размываемый при аналогичном повторении процесса.

В течение 5-й серии опыта прироста оврага в длину не наблюдалось, но продолжалась боковая эрозия при сохранении баланса поступающего и выносимого материала. Поэтому средняя глубина оврага оставалась неизменной. В процессе напуска выпуклый продольный профиль вновь преобразовывался в выпукло-вогнутый с уменьшением аккумулярованной толщи в приустьевой и образованием водобойного колодца в привершинной частях оврага. Нижние слои вершинного перепада оплывали, и над водобойным колодцем образовался новый нависающий карниз, выше которого поперек водоподводящей ложбины раскрылись трещины. К концу 5-й серии растущие шлейфы, протягивающиеся вдоль бортов, и контрбанкеты (обрушенных ранее глыб), играющие роль побочных, препятствовали подрезающему воздействию водяных струй, оттесняя их к центру днища.

В течение 6-й серии боковая эрозия полностью отсутствовала. Прирост модели оврага в длину произошел только за счет обрушения участка нависшего карниза, ограниченного трещинами. Материал обрушений заполнил водобойный колодец. При переработке толщи наносов продольный профиль постепенно преобразовался в вогнутый. На днище остались осередки, которые способствовали изменению траектории движения водяных струй, размывающих присклоновые шлейфы. Это активизировало склоновые процессы — нижние слои модельного материала оползали. Поэтому нависающие карнизы образовывались по всему периметру активной части оврага, достигая наибольшей величины в зоне вершинного перепада, что подготовило скачкообразные приросты оврага в длину в последующей серии опыта.

В продолжение 7-й (заключительной) серии овраг своей вершиной вышел на прибалочный склон модели и приобрел в плане форму шестигранника, вытянутого по медиане противоположных сторон. Вершинные обвалы происходили дважды. Период между обвалами характеризовался усиленным оползанием и оплыванием нижних слоев породы, слагающей овражные склоны. В донных завалах промежутки между глыбами быстро заполнялись рыхлым материалом, поступающим со склонов оврага при гравитационных процессах. В результате аккумуляция подавляла эрозионный врез, и средняя глубина оврага вновь уменьшилась (по сравнению со средней глубиной предыдущей серии опытов). К концу опыта на днище сформировалась местами суживающаяся, местами расширяющаяся псевдопойма со специфичным микрорельефом: побочными по овражному склону, осередками (глыбы обрушений), руслом (местами замаскированным блоками обрушений) в толще наносов.

Особенности качественной картины оврагообразования во время проведения второго опыта (при моделировании по гидродинамическому критерию K_1) выражались в следующем. За 1-ю серию на протяжении крутого откоса возник шнуровидный размыв. Врезаясь и постепенно расширяясь к устью, размыв приобрел облик оврага, вершинный перепад которого не достиг бровки откоса. Прямой продольный профиль оврага соответствовал первоначальному профилю крутого откоса. Поперечные профили изменялись по длине оврага: в привершинной части — прямоугольный, далее — трапециевидный с постепенным переходом в приустьевой части в копьевидный.

С началом 2-й серии активизировалась регрессивная эрозия с выходом вершины оврага за бровку откоса. Одновременно продолжался глубинный врез, и образовался донный уступ в самой узкой части овражного русла. Водобойный колодец приобрел в плане форму эллипса, вытянутого по оси оврага. В приовражной зоне на склоне образовались трещины. В привершинной части оврага усилились склоновые процессы: участки склонов расчленились на блоки; обрушивались карнизы, оползали участки нижележащих слоев породы. В конце серии овраг приобрел булавовидную форму в плане и вогнутый поперечный профиль с донным уступом.

В течение 3-й серии регрессивная эрозия наблюдалась лишь на участке склона, ограниченного трещинами. При этом нависающий над

перепадом карниз исчез. В то же время карнизы сохранились по склонам оврага в привершинной части. Водобойный колодец частично заполнился материалом обрушения; остатки колодца образовали по дну оврага выемку, которая медленно разрабатывалась донным потоком. Продольный профиль приобрел выпукло-вогнутую форму. Поперечные профили получили своеобразное развитие — в средней части оврага откосы приняли пилообразную форму с неровными зубьями. Вырабатываясь, зубья превращались в нависающие карнизы (по два на каждой стороне оврага), распределяющие капли подтекающей воды от вершины оврага к его середине, где активизировались склоновые процессы и усилилась аккумуляция. Оплывание и оползни-осовы способствовали формированию V-образного профиля в приустьевой части оврага.

4-я серия опыта характеризовалась интенсивными склоновыми процессами. При этом зубья-террасы (привершинная зона) перерабатывались, а овражные склоны пересекались сетью частых параллельных водоросин. Одновременно межводоросинные гребни оплывали и оползали, оставляя верхний «гумусовый» слой. Продолжался медленный рост водобойного колодца. Донный врез получил свой водобойный колодец. Сохранялся выпукло-вогнутый продольный профиль.

С началом 5-й серии усилилась боковая эрозия при обрушении нависающего карниза с левой стороны оврага. Все процессы сосредоточились лишь в привершинной части оврага; морфология и морфометрия срединной и приустьевой частей оставались неизменными. Донный врез и глубина водобойного колодца у его основания увеличились. Поперечные профили по длине оврага не изменялись.

В продолжение 6-й серии наблюдался медленный прирост оврага в длину. Наметилась тенденция соединения выемки привершинного водобойного колодца (разработанной потоком) с донным врезом, который вновь увеличился.

В заключительной (7-й) серии зафиксирован лишь медленный пятый рост донного вреза и увеличение длины нависающих карнизов при их обтекании каплями воды, усиливающими оползание нижележащих слоев породы.

Выводы

1. При исследовании оврагообразования на моделях основными показателями могут служить размокаемость и эрозионная прочность пород, величины которых входят в соответствующие критерии подобия литологического сложения склонов. Первый из них применяют при имитации овражной эрозии в легкоразмокаемых (пылеватых и легких глинистых) породах, второй — в тяжелых суглинках, глинах, опоках и мелах.

2. Определена качественная картина оврагообразования как совокупность явлений: образования ступенчатых врезов или шнуровидных размывов с вершинными перепадами, активизации склоновых процессов в вершинных перепадах и на прилегающих к ним участках склонов, регрессивной и боковой эрозии при обрушении нависающих карнизов гумусового слоя, переработки и удалении материала обрушений и оползней донным потоком с последующим глубинным врезом. Эти явления могут составлять последовательную цепь, протекать одновременно или спорадически опережать друг друга в привершинной части оврага, ниже которой обычно формируется зона аккумуляции.

3. В легкоразмокаемых породах существенную роль в оврагообразовании играют водяные брызги, образующиеся при разбиении струи, падающей через вершинный перепад на дно оврага. При этом порода нижних слоев вершинного перепада мгновенно размокает и оползает, вызывая обрушение вышележащих слоев, исключая гумусовый, практически не размокаемый слой, нависающий в виде карниза над водобойным колодцем. Обрушение карниза происходит по мере его роста, в основном под влиянием собственного веса.

4. Оползни, осы и обрушения корректируют эрозионно-аккумулятивные процессы в активные фазы развития оврагов, подавляя глубокий врез и способствуя аккумуляции по отдельным участкам или на всем протяжении русла. Растущие оползневые шлейфы, протягивающиеся вдоль склонов, глыбы обрушений и увеличивающаяся толща донных наносов ограничивают склоновые процессы и боковую эрозию, определяя время подготовки очередного эрозионного периода.

5. Поступление больших расходов (или объемов) стока в овраги, подготовленные к проявлению очередных эрозионных периодов, может приводить к максимальным приростам в длину и глубинным врезам. Если же овраги не подготовлены к периоду эрозионного развития, то их линейные размеры значительно не увеличиваются даже в многоводные годы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Косов Б. Ф., Никольская И. И., Зорина Е. Ф. Экспериментальное исследование оврагообразования//Экспериментальная геоморфология. Вып. 3. М.: Изд-во МГУ, 1978. С. 113—140.
2. Боголюбова И. В., Караушев А. В. Вопросы формирования и развития оврагов//Тр. ГГИ. Режим, теория, методы расчета и измерения наносов. Л., 1979. Вып. 267. С. 5—25.
3. Леви И. И. Моделирование гидравлических явлений. Изд. 2. Л.: Энергия, 1967. 235 с.
4. Шарп Дж. Гидравлическое моделирование. Пер. с англ. М.: Мир, 1984. 280 с.
5. Методика инженерно-геологических исследований высоких обвальных и оползневых склонов/Под ред. Золотарева Г. С., Янича М. М.: Изд-во МГУ, 1980. 184 с.
6. Бастратов Г. В. Эрозионная прочность горных пород//Геоморфология. 1977. № 2. С. 52—55.
7. Ивонин В. М. Агролесомелиорация разрушенных оврагами склонов. М.: Колос, 1983. 174 с.

Новочеркасский инженерно-мелиоративный институт, Всесоюзный НИИ агролесомелиорации

Поступила в редакцию
16.VIII.1985

PHYSICAL MODELS OF GULLY FORMATION: METHODS AND RESULTS

IVONIN V. M., PRAKHOV V. A., SUKOVATOV Yu. M.

Summary

Physical models elucidated some qualitative aspects of gullies formation on various rocks. They revealed the importance of water stream splashing when it falls over the edge of gully slope as well as the significance of landslides and landfalls which correct the process of erosion and deposition. The importance is ascertained of the period of gully preparation for the next active phase of erosion.

УДК 551.4.012 : 551.435.8

ПРИЛЕПИН В. М.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ФАКТОРНОГО АНАЛИЗА ДЛЯ ОБРАБОТКИ АЗИМУТАЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ПРИ ОЦЕНКЕ ВЗАИМОСВЯЗЕЙ ПРИРОДНЫХ УСЛОВИЙ КАРСТООБРАЗОВАНИЯ

При изучении карста в зоне влияния Камского водохранилища применялись методы многомерного статистического (факторного и регрессионного) анализа распределения поверхностных карстовых форм (воронки) в зависимости от комплекса природных условий [1, 2]. Использовались 40 показателей основных природных условий карстообразования (геолого-структурных, литологических, геоморфологических, гид-