УДК 631.613

DOI: 10.31774/2222-1816-2020-2-35-55

В. М. Ивонин

Новочеркасский инженерно-мелиоративный институт имени А. К. Кортунова – филиал Донского государственного аграрного университета, Новочеркасск, Российская Федерация

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОВРАГОВ ДЛЯ ЦЕЛЕЙ ЛЕСНОЙ МЕЛИОРАЦИИ

Цель: моделирование процессов оврагообразования в легкоразмокаемых и размываемых горных породах для обоснования мероприятий лесной мелиорации. **Методы:** физическое моделирование в лабораторных условиях с учетом требований динамического подобия натуральных и модельных водных потоков при обеспечении подобия литологии прорезаемых оврагами горных пород. **Результаты.** Анализ количественных характеристик оврагообразования показал, что средний регрессивный прирост равен 3,5 м/год, режим глубинной эрозии характеризуется сменой периодов врезки и его подавления аккумуляцией, средний прирост площади между бровками равен 72,4 м²/год, а прирост оврага по объему – 335,6 м³/год. К 10 годам своего развития овраг стремится к булавовидной форме в плане, впоследствии вытягиваясь в длину. Качественные характеристики складывались из ступенчатого врезки, его регрессивного развития с активизацией склоновых процессов на бортах и выходом вершины на присетевой склон. Брызги от разбиения струи воды, падающей через вершинный перепад на дно оврага, способствовали размоканию и оползанию прорезанного материала. Спорадически возникают и обрушиваются нависающие над водобойным колодцем и вдоль бровок козырьки, имитирующие гумусовый (дерновый) слой почвы. Это меняет напряжения в толще породы с раскрытием на склоне трещин, что вызывает суффозию и скачкообразный регрессивный прирост. Днище оврага постоянно меняет продольный профиль с активизацией аккумуляции или глубинной эрозии. **Выводы.** Не рекомендуется строительство гидротехнических сооружений на оврагах, прорезающих легкоразмокаемые и размываемые горные породы, в связи с высокой вероятностью аварийных ситуаций. Необходимо содействовать зарастанию таких оврагов травянистой и древесной растительностью, для чего создают приовражные лесные полосы из корнеотпрысковых древесных видов. Их размещают вдоль бровок с учетом среднегодовой регрессивной эрозии и среднегодового прироста площадей между бровками. Участки склонов между лесной полосой и овражной бровкой занимают дерниной многолетних трав.

Ключевые слова: физическое моделирование; овраг; лесомелиорация; противоэрозионное гидротехническое сооружение; приовражная лесная полоса.

V. M. Ivonin

Novocherkassk Engineering and Land Reclamation Institute – a branch of the Don State Agrarian University, Novocherkassk, Russian Federation

GULLY MODELING FOR FOREST RECLAMATION PURPOSES

Purpose: modeling of gully processes in easily soaked and erodable rocks to justify forest reclamation practices. **Methods:** physical modeling in laboratory conditions, with consideration of the requirements of dynamic similarity of natural and model water flows while ensuring the similarity of rock lithology cut by gullies. **Results.** An analysis of the quantita-

tive characteristics of gullying showed that the average regressive growth is 3.5 m per year, the deep erosion regime is characterized by a change in the intervals of downcutting and its suppression by accumulation, the average area growth between the rims is 72.4 m² per year, and the gully growth by volume is 335,6 m³ per year. By the 10th year of its development the gully tends to a club-like shape in plan, subsequently stretching in length. The qualitative characteristics consisted of a stepped cutting, its regressive development with the activation of slope processes on the sides and the output of the peak to the channel slope. The splashes from splitting a water fluent falling through the gully overfall to the bottom contributed to the soaking and slump of the cut material. Canopies overhanging above sump gully and along the rims, imitating the humus (sod) soil layer sporadically appear and collapse. It changes the stresses in the rock mass with the opening of cracks on the slope, which causes suffusion and spasmodic regression growth. The gully bottom is constantly changing the longitudinal profile with the activation of accumulation or deep erosion. **Conclusions.** It is not recommended to build hydraulic structures on gullies cutting through easily soaked and eroded rocks, due to the high probability of emergency situations. It is necessary to contribute to the overgrowing of such gullies with grassy and woody vegetation by creating gully forest belts made of sprouting tree species. They are placed along the rims taking into account the average annual regressive erosion and the average annual area growth between the rims. The slope locations between the forest belt and gully rim are occupied by the perennial grasses sod.

Key words: physical modeling; gully; forest reclamation; erosion control hydraulic structure; gully forest belt.

Введение. Обычно для целей лесомелиорации оврагов (их закрепления и хозяйственного освоения с помощью гидросооружений и лесных насаждений) анализируют природные (сумма и интенсивность осадков, геология, уклоны и др.) и антропогенные (распаханность водосбора, севооборот и др.) факторы линейной эрозии [1]. Также ведут наблюдения за регрессивным и боковым приростом [2–4], используя как традиционные методы (линейные измерения, тахеометрическую съемку), так и новые (сканирование и фотограмметрическое обследование и др.), связанные с высокоточным оборудованием и специализированным программным обеспечением [5]. При этом анализируют карты овражной расчлененности, а также количественно оценивают овраги [6–8]. Кроме этого, определяют связи показателей оврагов с распаханностью бассейнов, количеством осадков, залуженностью [9] и другими характеристиками.

Скорости глубинной эрозии и аккумуляции в оврагах Мексики связывают с уклоном русла и шириной его поперечного сечения [10].

В целом количественные исследования (периодическая фиксация некоторых размеров оврагов) не обеспечивают получение объективной кар-

тины эрозионно-аккумулятивных процессов с учетом литологии прорезаемых пород. Так, на Лессовом плато Китая овражная эрозия усложнена просадочными и суффозионными процессами [11], что затрудняет их изучение и обоснование гидротехнических и лесомелиоративных мероприятий для борьбы с оврагами.

Определенную надежду познания картины овражной эрозии с учетом литологии горных пород дают вероятностные модели размыва [12], а также физическое моделирование оврагообразования [13].

Новые монографии [14] среди вопросов экологии оврагов и методов их мелиорации с помощью агролесоводства рассматривают разработку эффективных и надежных моделей размыва почв и грунтов. Особую трудность вызывает физическое моделирование оврагов в легкоразмокаемых и размываемых породах (лессовых, супесчаных и др.), что определяет необходимость совершенствования методики физического моделирования оврагов [15, 16].

В связи с вышеуказанным целью данной работы являлось физическое моделирование процессов оврагообразования в легкоразмокаемых и размываемых горных породах для обоснования мероприятий лесной мелиорации.

Материалы и методы. Овраг моделировали в трехстенном гидравлическом лотке с устройством для напуска воды и водоприемным оборудованием (рисунок 1). В проведении эксперимента принимали участие В. А. Прахов, Ю. М. Суковатов.

Добивались равенства критерия подобия физико-механических свойств горных пород (в натуре) и эквивалентных материалов (на модели) по слоям эрозионных врезов.

Этот критерий имеет вид: $K_p^m = K_p^n$ (критерий размокаемости соответственно модельного и натурального материалов – $K_p = \frac{T_i}{T_{\text{ср.взв.}}}$, отношение

размокаемости горных пород и эквивалентных материалов по слоям эрозивного вреза к средневзвешенной размокаемости). На зачищенных бортах оврага-аналога по слоям прорезанных пород (выделенных по цвету, плотности, составу) отбирали образцы (ГОСТ 12071-2000¹) для определения размокаемости на приборе ПРГ.

**Рисунок 1 – Гидравлический лоток для моделирования оврагов
(автор фото В. М. Ивонин)**

В эксперименте учитывали требования методики моделирования динамического подобия натуральных и модельных водных потоков (достигается равенством критериев Фруда при критериях Рейнольдса ≥ 1500) при обеспечении подобия литологии прорезаемых оврагами горных пород.

Для построения модели склона в гидравлическом лотке использовали песчано-цементные смеси, эквивалентные натурным горным породам по зернистости, водопроницаемости, механической прочности и др. При этом определяли размокаемость эквивалентных материалов (T^M), принимая масштабный коэффициент моделирования (M_T) размокаемости горных пород природы (T^H) ($T^M = T^H / M_T$).

¹ ГОСТ 12071-2000. Грунты. Отбор, упаковка, транспортирование и хранение образцов. – Взамен ГОСТ 12071-84; введ. 2001-07-01. – М.: Госстрой России, ЦПП, 2001. – 21 с.

Размокаемость эквивалентных материалов регулировали изменениями содержания цемента (марка 400) в смеси с сухим песком. Соотношение песка и цемента в каждом образце устанавливали с помощью построенного рабочего графика (рисунок 2) с последующим определением масштабных коэффициентов.

Рисунок 2 – Зависимость размокаемости от содержания цемента в песчано-цементной смеси эквивалентного материала

Коэффициенты геометрического подобия определили с учетом размеров гидравлического лотка, обеспечивающего размыв модельного склона водным потоком с относительно стабилизированным режимом течения. В процессе калибровки модели при достижении подобия оврага-аналога (натуры) и модели оврага установили масштаб времени и расходов.

С учетом этого определился следующий порядок эксперимента:

- в натуре подбирали овраг-аналог, на зачищенных бортах которого слои прорезанных горных пород отличались по цвету, составу, плотности и пористости (в этих слоях обирали образцы, в которых определяли размокаемость и другие свойства);

- длина натурального оврага равнялась 35 м, глубина – 3–4, ширина – 12 м, уклоны тальвегов – 0,149–0,337, площадь между бровками – 3000 м², объем 900 м³, возраст – 10 лет;

- в соответствии с рабочим графиком (см. рисунок 1) и с учетом

масштаба моделирования назначали соотношение песка и цемента по слоям модельного материала, которые последовательно укладывали на дренажный слой гравия по дну гидравлического лотка;

- поверхности модельного склона придавали натурные уклоны (прибалочного склона и уступа балочного склона к днищу) и с помощью шаблона формировали пологую водоподводящую ложбину на прибалочном склоне;

- толщина эквивалентных материалов в лотке увлажнялась и выдерживалась для стабилизации свойств в течение двух недель;

- продолжительность напуска воды (серии опыта) составила 2 мин, интервал между напусками – 30 мин, количество напусков – семь (вплоть до достижения линейных размеров модели параметров натурального оврага).

После каждого напуска воды фиксировали формы и размеры модели оврага: плановые положения снимали на кальку, измеряли глубины, уклоны днища, размеры донных врезов и водобойных колодцев, нависающих козырьков, имитирующих дернину, и др. Во время проведения четвертой серии опыта модель оврага достигла длины и глубины натурального оврага. Это позволило уточнить примерный масштаб времени развития модели за каждую серию опыта (3 года).

Полученные данные обрабатывали с помощью компьютерных программ Statistics 7.0 и Microsoft Office Excel.

Результаты и обсуждение. Морфометрические показатели модели оврага (материалы, эквивалентные легкоразмокаемым и размываемым горным породам), пересчитанные на натуру по сериям опыта, приведены в таблице 1.

Используя данные таблицы 1, построили связи (рисунки 3 и 4), анализ которых привел к уравнениям, характеризующим регрессивную и глубинную эрозию.

Таблица 1 – Основные морфометрические характеристики модели оврага, пересчитанные на натуру по сериям эксперимента

Серия опыта	Возраст оврага, лет	Длина, м	Средняя глубина, м	Площадь между бровками, м ²	Объем, м ³	Коэффициент	
						формы в плане ($B_{\max} / L$)	относительной ширины ($B_{\max} / H_{\text{ср}}$)
1	3	21,0	3,0	144,9	434,7	0,428	3,0
2	6	30,0	4,5	304,2	1368,9	0,510	3,4
3	9	33,0	4,5	494,6	2225,7	0,618	4,5
4	12	47,4	4,1	855,7	3508,4	0,601	6,9
5	15	51,8	4,1	1142,6	4684,7	0,466	7,0
6	18	63,6	5,3	1148,4	6086,5	0,453	5,4
7	21	79,2	4,5	1501,6	7207,2	0,388	6,7

Примечание – $B_{\max}$ – максимальная ширина оврага, м; L – длина оврага, м; $H_{\text{ср}}$ – средняя глубина оврага, м.

Рисунок 3 – Связь длины оврага с его возрастом

Рисунок 4 – Связь глубинной эрозии с возрастом оврага

Уравнение связи длины (L_0) и возраста (n_0) оврага имеет вид:

$$L_0 = 3,102n_0 + 9,343 \text{ при } R^2 = 0,972. \quad (1)$$

При прогнозе линейное уравнение (1) имеет ограничения по возрасту оврагов от 3 до 21 года.

Такой прогноз показывает, что в легкоразмокаемых и размываемых породах к возрасту 20 лет овраг достигает длины 71 м (средний регрессивный прирост равен 3,5 м/год).

Связь глубины (h_0 , м) и возраста оврага представлена рисунком 4.

Соответствующее уравнение связи имеет вид:

$$h_0 = -0,0006n_0^4 + 0,0301n_0^3 - 0,516n_0^2 + 3,557n_0 - 3,829 \text{ при } R^2 = 0,937. \quad (2)$$

При анализе уравнения (2) и данных рисунка 4 приходим к выводу, что режим глубинной эрозии (контролируется местным базисом эрозии – дренажным слоем гравия) характеризуется сменой периодов усиленного вреза и его подавления за счет аккумуляции, реализуемой при обвальнo-оползневых процессах на овражных бортах.

Динамика приростов оврага по площади между бровками приведена на рисунке 5. Рисунок 5 характеризует линейное уравнение, имеющее такие же ограничения, как и зависимости (1), (2):

$$S_0 = 77,88n_0 - 110,35 \text{ при } R^2 = 0,973. \quad (3)$$

В уравнении (3) принято: S_0 – площадь оврага между бровками, м².

Рисунок 5 – Связь площадей между бровками с возрастом оврага

Анализ данных рисунка 5 и соотношения (3) дает основание полагать, что средний прирост площади между бровками такого оврага за 20 лет развития равен 72,4 м²/год.

Прирост оврага по объему (V_0 – объем оврага, м³) представлен рисунком 6 и уравнением с аналогичными ограничениями по возрасту:

$$V_0 = 383,47n_0 - 956,51 \text{ при } R^2 = 0,995. \quad (4)$$

Рисунок 6 – Связь объемов с возрастом оврага

Анализ соотношения (4) позволяет утверждать, что средний прирост оврага по объему составляет 335,6 м³/год.

Динамика плановых конфигураций (см. таблицу 1) позволяет полагать, что овраг в легкоразмокаемых породах к 9–10 годам стремится к булавовидной форме ($B_{\max} / L = 0,6$). К 20 годам овраг в плане приобретает вытянутую форму, как и в возрасте 3 лет ($B_{\max} / L = 0,4$).

Уравнение связи коэффициентов формы в плане (K_{ϕ}) с возрастом оврага имеет вид:

$$K_{\phi} = 0,0002n_0^3 - 0,0083n_0^2 + 0,1096n_0 + 0,1559 \text{ при } R^2 = 0,878. \quad (5)$$

Графическое решение полинома (5) приведено на рисунке 7.

Динамика коэффициентов относительной ширины (см. таблицу 1) представлена данными рисунка 8.

Рисунок 7 – Связь коэффициентов формы в плане с возрастом оврага

Рисунок 8 – Связь коэффициентов относительной ширины с возрастом оврага

Линейное уравнение, отображающее связь коэффициентов относительной ширины оврага ($K_{ш}$) с его возрастом, имеет вид:

$$K_{ш} = 0,209n_0 + 2,757 \text{ при } R^2 = 0,652. \quad (6)$$

По данным рисунка 8 и уравнению (6), при зарождении оврага (возраст до 3 лет) коэффициент относительной ширины равен 3,4, а в возрасте 20 лет – 6,9, что свидетельствует о постепенном увеличении соотношения максимальной ширины и средней глубины.

В целом в заключительной серии опыта коэффициенты формы в плане и относительной ширины отображают внешний вид модели оврага

(рисунок 9), который напоминает натурный овраг, прорезающий лессовые породы (рисунок 10).

Рисунок 9 – Внешний вид модели оврага в легкоразмокаемых породах (автор фото В. М. Ивонин)

Рисунок 10 – Овраг в лессовых породах (автор фото В. М. Ивонин)

Следует отметить, что полученные на модели и пересчитанные на натуру среднегодовые показатели регрессивной эрозии и приросты пло-

щадь между бровками могут применяться при проектировании трасс приовражных лесных полос, которые размещают вдоль бровок, огибая вершины оврагов, на расстояниях, равных тройной величине среднегодовой регрессивной эрозии. При этом участки склонов между лесной полосой и овражной бровкой (не менее тройной величины среднегодового прироста площади оврага между бровками) оставляют под дерниной многолетних трав.

Данные о среднегодовых приростах овражных объемов, изменении их плановых конфигураций и других количественных показателях используют при прогнозе развития овражных систем, темпов выноса твердого стока в балки и долины малых рек.

Качественную картину оврагообразования наблюдаем с начала первой серии опыта, когда водный поток прорезал нижний участок крутого уступа (имитирующего балочный склон) до дренажного слоя гравия. При этом стал регрессивно развиваться вершинный перепад, а на бортах этого размыва активизировались склоновые процессы, материал которых удалялся донным потоком в водоприемный лоток. В конце первой серии опыта на крутом уступе (балочном склоне) образовался размыв трапециевидальной поперечной формы с водобойным колодцем у вершины. Уклон дна этого размыва соответствовал уклону крутого уступа.

Во время второй серии опыта поперечный профиль размыва в виде трапеции постоянно искажался при оползании бортов. Отмечена цикличность эрозионно-аккумулятивного процесса: регрессивная эрозия с подрезкой потоком бортов с их обрушением и оползанием, отеснение обрушенного материала к центру днища, временная стабилизация размыва и вынесение аллювия за его пределы.

В начале второй серии опыта размыв преобразовался в овраг, в устье которого возник и стал размываться конус выноса, а продольный профиль оврага приобрел вогнутую форму. При этом средняя глубина оврага, площадь между бровками и объем резко возросли. После прекращения напус-

ка во время добегания воды склоновые процессы на бортах продолжались и днище было затянуто аллювием.

В третьей серии опыта форма оврага в плане не изменилась, но при росте его линейных размеров активизировались склоновые процессы, поставляющие продукты аккумуляции на днище, что сдерживало глубинный врез. Отмечено разрушающее воздействие брызг воды, образующихся при разбивании падающей через вершинный перепад струи. При этом происходило оплывание нижних слоев модельного материала в вершине оврага и на прилегающих участках его бортов с возникновением нависающих козырьков, имитирующих гумусовый (неразмокаемый) слой, насыщенный корнями (дернина).

Аккумулятивная толща в овраге способствовала формированию вогнуто-выпуклого продольного профиля днища. Максимальное накопление наносов отмечено в средней части оврага. Эрозионный врез соответствовал темпам аккумуляции.

К окончанию третьей серии опыта у вершины оврага поперек водоподводящей ложбины раскрылась трещина, которая перехватывала часть поступающей воды. Это привело к суффозии, обрушению кровли пустот, расширению русла оврага и его выходу через бровку балки (крутого уступа) на прибалочный склон в четвертой серии опыта, когда овраг приобрел булавовидную форму в плане.

Поперечные профили по длине оврага изменялись: у вершинного перепада прямоугольная и трапецевидная формы часто сменяли друг друга при проявлении оползней и размывании их шлейфов, в средней (наиболее широкой) части трапецевидный профиль нарушался при обрушении (под собственной тяжестью) нависающих козырьков «гумусового слоя». Нагромождения материалов обрушений на днище сдерживали оползневые процессы на одних участках бортов и активизировали их на других. Эти нагромождения (контрбанкеты вертикальных бортов) перерабатыва-

лись и выносились к устью оврага донным потоком. В приустьевой части оврага образовались плотины подпора, вызывающие усиленную аккумуляцию рыхлого материала. В развитии оврага наметилась тенденция преобразования вогнуто-выпуклого продольного профиля днища в выпуклый профиль в результате заполнения водобойного колодца материалом обрушенных козырьков.

В продолжение пятой серии опыта регрессивный прирост оставался малозаметным, но продолжалась боковая эрозия при балансе поступающего и выносимого материалов в овраге. При этом выпуклый продольный профиль дна оврага вновь трансформировался в выпукло-вогнутый с образованием нового водобойного колодца у вершины и уменьшением толщи аккумуляции в приустьевой части. Над водобойным колодцем образовался новый козырек «гумуса», выше которого поперек ложбины раскрылись трещины. К окончанию этой серии в толще аккумуляции на днище возникло блуждающее между обрушившимися блоками породы русло, местами исчезающее в суффозионных пустотах.

В продолжение шестой серии боковая эрозия прекратилась. Регрессивная эрозия отмечена при обрушении козырька (нависшего над водобойным колодцем), ограниченного трещиной. При разработке днища продольный профиль постепенно принял вогнутую форму. Но при этом сохранялись осередки, которые изменяли траектории водяных струй, способствующих оползанию модельного материала и возникновению нависающих козырьков по периметру бровок.

Максимальная длина козырьков отмечена в зоне водобойного колодца и прилегающих к нему участков бортов (брызги воды провоцировали оползание нижних слоев модельного материала). Это подготовило скачкообразный прирост оврага в длину в заключительной серии опыта.

В заключительной (седьмой) серии опыта произошло резкое увеличение длины оврага, плановая конфигурация которого приобрела форму

шестигранника, вытянутого по медиане противоположных сторон. Обвалы вершинных блоков породы происходили дважды. Период между обвалами характеризовался усиленным оползанием нижних слоев вертикальных овражных бортов и возникновением нависающих козырьков. Усиленная аккумуляция подавляла эрозионный врез.

В целом эта сложная картина эрозионно-аккумулятивных, оползневых, обвальных, суффозионных и других процессов дала основание полагать, что овраги, прорезающие легкоразмокаемые и размываемые породы (например, лессовые), нецелесообразно закреплять с помощью гидротехнических сооружений (водозадерживающих валов, сопрягающих сооружений в вершинах, донных запруд и др.) в связи с высокой вероятностью аварийных ситуаций.

Проводить трудоемкие посадки леса на откосах оврагов не имеет смысла, так как они гибнут при осыпаниях грунта. Считают, что перед облесением такие откосы необходимо выполяживать [17].

Однако на оврагах в легкоразмокаемых породах выполяживание откосов усилит процессы оползания.

Более перспективными являются мероприятия, способствующие самозаращению рыхлых горных пород овражных бортов и днищ травянистой и древесной растительностью.

Натурные наблюдения показали, что зарастание в течение 25–30 лет способствует проявлению ранних стадий почвенного онтогенеза на овражных бортах. Это связано как с осыпанием (обрушением) гумусового слоя почвы прибрежной зоны при боковой эрозии, так и с особенностями почвообразовательного процесса под многолетними травами и древесными насаждениями [18].

Процессам зарастания оврагов древесными и травянистыми растениями способствует создание из корнеотпрысковых пород (робинии псевдоакалии и др.) приовражных лесных полос, трассы которых следует разме-

щать вдоль бровок с обходом вершин оврагов на расстояниях не менее тройной величины среднегодовой регрессивной эрозии. Участки склонов между лесной полосой и овражной бровкой оставляют под дерниной многолетних трав. При этом на бортах и днищах оврагов появляются не только многолетние травы и самосев, но и корневые отпрыски древесных пород.

Выводы. В легкоразмокаемых и размываемых породах (лессовых, супесчаных и др.) трудно изучать в натуре процессы оврагообразования (раздельная или одновременная регрессивная, боковая и глубинная эрозия в сопровождении аккумулятивных, оползневых, просадочных, суффозионных и других процессов). Такие процессы можно исследовать при физическом моделировании с получением количественных и качественных характеристик оврагов, что поможет совершенствовать лесомелиоративные технологии их закрепления и хозяйственного использования.

При моделировании получены и пересчитаны на натуру количественные характеристики оврагообразования, которые представлены графиками и уравнениями регрессии. Их анализ показал, что к возрасту 10 лет овраг достигает в длину 40 м, а к возрасту 20 лет – 71 м, средний регрессивный прирост за первые 20 лет развития равен 3,5 м/год. Режим глубинной эрозии, контролируемый местным базисом эрозии, характеризуется сменой периодов усиленного глубинного вреза и его подавления за счет аккумуляции, реализуемой при обвально-оползневых процессах на овражных бортах. Средний прирост площадей между бровками в первые 20 лет равен 72,4 м²/год, а прирост оврага по объему за этот период составил 335,6 м³/год. Динамика коэффициентов формы в плане показала, что к 9–10 годам овраг стремится к булавовидной форме ($B_{\max} / L = 0,6$), к 20 годам овраг в плане приобретает вытянутую форму, как в начальном периоде 3 лет ($B_{\max} / L = 0,4$). При зарождении оврага (период 3 лет) коэффициент относительной ширины равен 3,4, а в возрасте 20 лет – 6,9

(это свидетельствует об увеличении со временем боковой эрозии при подавлении глубинного вреза).

Качественные характеристики развития оврага обусловлены следующими процессами. В первую очередь образуется ступенчатый врез на крутом уступе, который имитирует склон балки. Далее ступенчатый врез регрессивно развивается (преобразуется в овраг) с активизацией склоновых процессов на его бортах, боковой эрозией и выходом вершины на присетевой склон. При этом возникают в вершине и вдоль бровок нависающие козырьки, имитирующие гумусовый (дерновый) слой, которые обрушиваются под влиянием собственного веса. У вершинного перепада оврага периодически образуется и исчезает водобойный колодец. На днище перерабатываются и удаляются водным потоком материалы обрушений и оползней с последующим глубинным врезом оврага. Такие явления составляют цепь последовательных событий, протекают одновременно или спорадически опережают друг друга в привершинной части оврага, ниже которой образуется постоянная зона аккумуляции.

В период регрессивного прироста существенную разрушительную роль играли брызги, образованные при разбиении струи воды, падающей через вершинный перепад на дно оврага. Под влиянием брызг нижние слои прорезанной оврагом породы размокали и оползали. При этом неразмокаемый «дерновый» слой нависал в виде козырьков над водобойным колодцем и прилегающими к вершине вертикальными бортами. Такие козырьки по мере роста обрушиваются под влиянием собственного веса. Это меняет напряжения в толще породы, что вызывает раскрытие трещин на склоне перед вершиной и дальнейший скачкообразный прирост оврага в длину.

Материал оползней и обрушений в активной фазе оврагообразования подавлял глубинную эрозию и способствовал накоплению толщи аккумуляции по всей длине оврага или на его отдельных участках. Увеличение толщи наносов ограничивало склоновые процессы на бортах, а значит, и боковую

эрозию. Это определяло время подготовки оврага к очередному активному регрессивному периоду. При такой подготовке возникали трещины перед вершинным перепадом, уменьшалась толща аккумуляции, размывались контрбанкеты овражных бортов, сдерживающих боковую эрозию.

В процессе оврагообразования продольный профиль днища непрерывно преобразовывался в результате исчезновения и возникновения водобойного колодца, уменьшения и возрастания толщи аккумуляции с проявлением суффозии, активизацией и подавлением глубинной эрозии на всем протяжении днища или на его отдельных участках.

Такая сложная картина эрозионно-аккумулятивных, оползневых, обвальных, суффозионных и других процессов дает основание не рекомендовать закрепление оврагов в легкоразмокаемых и размываемых породах с помощью гидротехнических сооружений (водозадерживающие валы перед вершиной, сопрягающие сооружения в вершинах, террасы на бортах, донные запруды и др.) в связи с высокой вероятностью аварийных ситуаций.

Не рекомендуется также коренная мелиорация таких оврагов (их выполаживание или засыпка с последующим облесением или другим хозяйственным использованием площади).

Более перспективным является содействие зарастанию оврагов травянистой и древесной растительностью с формированием на их бортах примитивных почв. Такому зарастанию способствует создание приовражных лесных полос из корнеотпрысковых древесных видов. Трассы приовражных лесных полос размещают вдоль бровок с обходом вершин оврагов на расстояниях, равных тройной величине среднегодовой регрессивной эрозии. При этом участки склонов между лесной полосой и овражной бровкой (не менее тройной величины среднегодового прироста площади оврага между бровками) оставляют под дерниной многолетних трав. «Козырьки» этой дернины при боковой эрозии обрушиваются в овраг, способствуя его зарастанию травянистой растительностью. Древесная расти-

тельность на бортах и днище оврага появляется в результате самосева и корневых отпрысков.

Список использованных источников

1 Естественные и антропогенные факторы в развитии оврагов (на примере оврага Узкий, Сатинский полигон МГУ) / Е. А. Еременко, В. Р. Беляев, И. А. Каревская, А. В. Панин // Геоморфология. – 2005. – № 3. – С. 52–65.

2 Ковалев, С. Н. Особенности развития овражной эрозии во времени и в различных природных условиях / С. Н. Ковалев, Б. П. Любимов // Геоморфология. – 2006. – № 3. – С. 66–76.

3 Рожков, А. Г. Интенсивность роста оврагов в Центрально-Черноземной зоне / А. Г. Рожков, Г. И. Бахирев, В. Б. Горин // Почвоведение. – 1993. – № 4. – С. 84–88.

4 Thompson, I. R. Quantitative effect of watershed variables on rate of gully-head advancement / I. R. Thompson // Trans. Am. Soc. Agric. Engineers. – 1964. – № 7. – P. 54–55.

5 Сатдаров, А. З. Методы исследования регрессивного роста оврагов: достоинства и недостатки / А. З. Сатдаров // Ученые записки Казанского университета. Серия: Естественные науки. – 2016. – Т. 158, кн. 2. – С. 277–292.

6 Martinez-Casasnovas, J. A. A spatial information technology approach for the mapping and quantification of gully erosion / J. A. Martinez-Casasnovas // Catena. – 2003. – Vol. 50, № 2–4. – P. 293–308.

7 Чендев, Ю. Г. Проявления линейной эрозии на участках с разной длительностью земледельческого освоения юга Среднерусской возвышенности / Ю. Г. Чендев, М. В. Близнюк // Проблемы региональной экологии. – 2005. – № 6. – С. 124–129.

8 Accuracy of methods for field assessment of rill and ephemeral gully erosion / J. Casali, J. Loizu, M. A. Campo, L. M. de Santisteban, J. Alvarez-Mozos // Catena. – 2006. – Vol. 67, № 2. – P. 128–138.

9 Медведева, Р. А. Пространственно-временная оценка овражной эрозии в зоне интенсивного земледелия европейской части России / Р. А. Медведева, В. Н. Голосов, О. П. Ермолаев // География и природные ресурсы. – 2018. – № 3. – С. 29–37.

10 Vazquez, R. Factors controlling erosion/deposition phenomena related to lahars at Volcan de Colima, Mexico / R. Vazquez, L. Capra, V. Coviello // Natural Hazards and Earth System Sciences [Electronic resource]. – 2016. – Vol. 16. – P. 1881–1895. – Mode of access: <https://www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/16/1881/2016/>. – DOI: <https://doi.org/10.5194/nhess-16-1881-2016>.

11 Lee, H.-T. Soil conservation in China's Loess Plateau / H.-T. Lee // J. Soil and Water Conserv. – 1984. – № 5. – P. 306–307.

12 Ларионов, Г. А. Вероятностная модель размыва почв и связных грунтов / Г. А. Ларионов, С. Ф. Краснов // Почвоведение. – 2000. – № 2. – С. 235–242.

13 Косов, Б. Ф. Моделирование оврага / Б. Ф. Косов, И. И. Никольская, В. А. Галкин // Эрозия почв и русловые процессы. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1973. – Т. 3. – С. 73–86.

14 Dagar, J. C. Ravine Lands: Greening for Livelihood and Environmental Security / J. C. Dagar, A. K. Singh. – Springer, 2018. – 636 p.

15 Боголюбова, И. В. Вопросы формирования и развития оврагов / И. В. Боголюбова, А. В. Караушев // Режим, теория, методы расчета и изменения наносов. Труды ГГИ. – Л.: Гидрометеиздат, 1979. – Вып. 257. – С. 5–25.

16 Ивонин, В. М. Методика и результаты физического моделирования оврагообразования / В. М. Ивонин, В. А. Прахов, Ю. М. Суковатов // Геоморфология. – 1987. – № 2. – С. 23–29.

17 Миронов, О. В. Из опыта борьбы с оврагообразованием / О. В. Миронов // Лесохозяйственная информация [Электронный ресурс]. – 2017. – № 2. – С. 78–90. – Режим доступа: http://hi.vniilm.ru/PDF/2017/2/LHI_2017_02-08-Mironov.pdf. – DOI: 10.24419/LHI.2304–3083.2017.2.08.

18 Ивонин, В. М. Зарастание и устойчивость склонов оврагов / В. М. Ивонин // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации [Электронный ресурс]. – 2015. – № 2(18). – С. 46–69. – Режим доступа: http://rosniipm-sm.ru/dl_files/udb_files/udb13-rec338-field6.pdf.

References

1 Eremenko E.A., Belyaev V.R., Karevskaya I.A., Panin A.V., 2005. *Estestvennye i antropogennye faktory v razvitiі ovragov (na primere ovraga Uzkiy, Satinskiy poligon MGU)* [Natural and anthropogenic factors in gully development (on the example of the gully Nar-row, Satinsky research station of Moscow State University)]. *Geomorfologiya* [Geomorphology], no. 3, pp. 52–65. (In Russian).

2 Kovalev S.N., Lyubimov B.P., 2006. *Osobennosti razvitiya ovrazhnoy erozii vo vremeni i v razlichnykh prirodnikh usloviyakh* [The temporal characteristics of gully erosion under different natural conditions]. *Geomorfologiya* [Geomorphology], no. 3, pp. 66–76. (In Russian).

3 Rozhkov A.G., Bakhirev G.I., Gorin V.B., 1993. *Intensivnost' rosta ovragov v Tsentral'no-Chernozemnoy zone* [The intensity of the gully growth in the Central Black Earth zone]. *Pochvovedenie* [Soil Science], no. 4, pp. 84–88. (In Russian).

4 Thompson I.R., 1964. Quantitative effect of watershed variables on rate of gully-head advancement. *Trans. Am. Soc. Agric. Engineers*, no. 7, pp. 54–55.

5 Satdarov A.Z., 2016. *Metody issledovaniya regressivnogo rosta ovragov: dostoinstva i nedostatki* [Research methods of the regressive growth in gullies: advantages and disadvantages]. *Uchenye zapiski Kazanskogo universiteta. Seriya: Estestvennye nauki* [Transactions of Kazan University. Series: Natural Sciences], vol. 158, pt. 2, pp. 277–292. (In Russian).

6 Martinez-Casasnovas J.A., 2003. A spatial information technology approach for the mapping and quantification of gully erosion. *Catena*, vol. 50, no. 2–4, pp. 293–308.

7 Chendev Yu.G., Bliznyuk M.V., 2005. *Proyavleniya lineynoy erozii na uchastkakh s raznoy dlitel'nost'yu zemledel'cheskogo osvoeniya yuga Srednerusskoy vozvyshennosti* [Manifestations of linear erosion in areas with different duration of agricultural development in the south of the Central Russian Upland]. *Problemy regional'noy ekologii* [Problems of Regional Ecology], no. 6, pp. 124–129. (In Russian).

8 Casali J., Loizu J., Campo M.A., De Santisteban L.M., Alvarez-Mozos J., 2006. Accuracy of methods for field assessment of rill and ephemeral gully erosion. *Catena*, vol. 67, no. 2, pp. 128–138.

9 Medvedeva R.A., Golosov V.N., Ermolaev O.P., 2018. *Prostranstvenno-vremennaya otsenka ovrazhnoy erozii v zone intensivnogo zemledeliya evropeyskoy chasti Rossii* [Spatio-temporal assessment of gully erosion in the intensive agriculture zone of the European part of Russia]. *Geografiya i prirodnye resursy* [Geography and Natural Resources], no. 3, pp. 29–37. (In Russian).

10 Vazquez R., Capra L., Coviello V., 2016. Factors controlling erosion / deposition phenomena related to lahars at Volcan de Colima, Mexico. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol. 16, pp. 1881–1895, available: <https://www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/16/1881/2016/>, DOI: <https://doi.org/10.5194/nhess-16-1881-2016>.

11 Lee H.-T., 1984. Soil conservation in China's Loess Plateau. *J. Soil and Water Conserv.*, no. 5, pp. 306–307.

12 Larionov G.A., Krasnov S.F., 2000. *Veroyatnostnaya model' razmyva pochv i svyaznykh gruntov* [Probabilistic model of soil and cohesive ground erosion]. *Pochvovedenie* [Soil Science], no. 2, pp. 235–242. (In Russian).

13 Kosov B.F., Nikol'skaya I.I., Galkin V.A., 1973. *Modelirovanie ovrage* [Gully Modeling]. *Eroziya pochv i ruslovyie protsessy* [Soil Erosion and Canal Processes]. Moscow, Moscow University Publ., vol. 3, pp. 73-86. (In Russian).

14 Dagar J.C., Singh A.K., 2018. *Ravine Lands: Greening for Livelihood and Environmental Security*. Springer, 636 p.

15 Bogolyubova I.V., 1979. *Voprosy formirovaniya i razvitiya ovragov* [Issues of gullies formation and development]. *Rezhim, teoriya, metody rascheta i izmeneniya nanosov. Trudy GGI* [Regime, Theory, Methods of Calculating Sediment Changes. Proc. of the GGI]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., iss. 257, pp. 5-25. (In Russian).

16 Ivonin V.M., Prakhov V.A., Sukovatov Yu.M., 1987. *Metodika i rezul'taty fizicheskogo modelirovaniya ovragoobrazovaniya* [Methods and results of physical modeling of gully formation]. *Geomorfologiya* [Geomorphology], no. 2, pp. 23-29. (In Russian).

17 Mironov O.V., 2017. *Iz opyta bor'by s ovragoobrazovaniem* [Gallying Control Experience]. *Lesokhozyaystvennaya informatsiya* [Forestry Information], no. 2, pp. 78-90, available: http://hi.vniilm.ru/PDF/2017/2/LHI_2017_02-08-Mironov.pdf, DOI: 10.24419/LHI.2304-3083.2017.2.08. (In Russian).

18 Ivonin V.M., 2015. [Overgrowing and stability of gully slopes]. *Nauchnyy Zhurnal Rossiyskogo NII Problem Melioratsii*, no. 2(18), pp. 46-69, available: http://rosniipm-sm.ru/dl_files/udb_files/udb13-rec338-field6.pdf. (In Russian).

Ивонин Владимир Михайлович

Ученая степень: доктор сельскохозяйственных наук

Ученое звание: профессор

Должность: профессор

Место работы: Новочеркасский инженерно-мелиоративный институт имени А. К. Кортунова – филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Донской государственный аграрный университет»

Адрес организации: ул. Пушкинская, 111, г. Новочеркасск, Ростовская область, Российская Федерация, 346428

E-mail: Ivoninfores@yandex.ru

Ivonin Vladimir Mikhaylovich

Degree: Doctor of Agricultural Sciences

Title: Professor

Position: Professor

Affiliation: Novocherkassk Engineering and Land Reclamation Institute – a branch of the Don State Agrarian University

Affiliation address: st. Pushkinskaya, 111, Novocherkassk, Rostov region, Russian Federation, 346428

E-mail: Ivoninfores@yandex.ru